

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



TESIS

**CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DEL ORO CONTENIDO EN
MINERALES SULFURADOS USANDO PERÓXIDO DE
HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE – PLANTA DE
BENEFICIO ESPAÑOLITA S.A.C – CHALA – AREQUIPA**

PRESENTADO POR:

Br. ALDO SABINO FLORES SAPACAYO
Br. OCRAN WILNER HUAMAN CCOTOHUANCA
**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

DR. ABEL FRANKLIN CANAL CESPEDES

CUSCO - PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: LIANURACIÓN POR AGITACIÓN DEL ORO CONTENIDO EN MINERALES SULFURADOS USANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE - PLANTA DE BENEFICIO ESPAÑOLITA SAC - CHALA - AREQUIPA

Presentado por: FLORES SAPACAYO, ALDO SABINO DNI N° 78005804

presentado por: HUAMAN ECOTOHUANCA, OCRAN WILNER DNI N°: 76095754

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 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 08 %.

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** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 16 de ABRIL de 2025



Firma

Post firma CANAL CÉSPEDES ABEL FRANKLIN

Nro. de DNI 23875439

ORCID del Asesor 0000-0003-4619-7569

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:449376334

Aldo Sabino/Ocran Wilner FLORES SAPACAYO/HUA...

Cianuración por agitación del oro contenido en minerales sulfurados usando peróxido de hidrógeno com

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:449376334

146 Páginas

Fecha de entrega

15 abr 2025, 9:15 a.m. GMT-5

28.469 Palabras

153.555 Caracteres

Fecha de descarga

16 abr 2025, 11:58 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

CCOTOHUANCA FLORES VERSION FINAL DE TESIS.pdf

Tamaño de archivo

2.7 MB


Aldo Sabino Ocran
César Céspedes
profesor

8% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Cited Text
- ▶ Small Matches (less than 15 words)

Exclusions

- ▶ 52 Excluded Matches

Top Sources

- 8%  Internet sources
- 0%  Publications
- 3%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.


Abel Canal Céspedes
profesor

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas Y Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del jurado.

En cumplimiento al artículo 18° del reglamento de grados y títulos vigentes de la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica y de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra consideración el trabajo de investigación intitulada:

CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DEL ORO CONTENIDO EN MINERALES SULFURADOS USANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE – PLANTA DE BENEFICIO ESPAÑOLITA S.A.C – CHALA - AREQUIPA.

El propósito del presente trabajo de investigación es incrementar la extracción de oro usando el peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación del oro contenido en minerales sulfurados que llega a 50 % - 70 % de extracción con cianuro en la planta de beneficio Españolita del Perú SAC.

Atentamente:

Bach. Flores Sapacayo Aldo Sabino

Bach. Huaman Ccotohuanca Ocran Wilner

DEDICATORIA

A Dios, por iluminarme y mostrarme siempre el camino del bien, guiando mis pasos, y por darme fe y esperanza en los momentos de incertidumbre.

A mis hermanos, Roger, Bertha, Lidia, Guido, Marleny, Lourdes y Sayda, por su apoyo constante. Cada uno de ustedes ha sido una fuente de fortaleza y compañía, y gracias a ustedes soy la persona que soy ahora.

A mis docentes, familiares, amigos de trabajo y de universidad, y a todas las personas que, de alguna manera, han sido parte de mi camino, brindándome su apoyo, confianza y amor. Sin ustedes, este proceso no habría sido posible. ¡Gracias de corazón!

A mis padres, Sabino y Plácida, por dedicar su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional a sus hijos, por enseñarnos desde pequeños valores éticos y por brindarnos un hogar lleno de amor.

A mi novia, Karen, por su amor, apoyo incondicional y motivación, que me impulsa a continuar formándome como persona y profesional.

FLORES SAPACAYO, Aldo Sabino

DEDICATORIA

A Dios por ser la fuente de mi fortaleza, salud, sabiduría y guiarme en mi trayecto profesional y personal en el día a día.

A mis padres Hermógenes Huamán Vidia y Gloria Ccotohuanca Ccoa, por darme la vida, por el apoyo constante en todo momento, sus consejos, motivación y por todos los valores que me inculcaron para ser una persona de bien y hacerme ver que yo si puedo hacer la diferencia.

A mi hermano Dayber, quien pese a su situación es mi impulso y motivo para seguir adelante y esa palabra que siempre está en mi mente "TU PUEDES LOGRARLO".

Agradecer a toda mi familia como primos, tíos, por el apoyo incondicional y en especial a mi tío Rolando y tía Hilda por sus palabras sabias y guiarme desde que aún estaba en el colegio y insistirme en completar esta etapa de mi formación profesional como Ingeniero Metalurgista.

A mi novia Fany por su amor, tiempo y apoyo para concluir esta hermosa etapa que es el comienzo para seguir creciendo profesionalmente.

HUAMAN CCOTOHUANCA, Ocran Wilner

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, quien nos ha dado la oportunidad de conocer, explorar e incrementar conocimientos, competencias y herramientas para volvernos el mejor profesional posible en la rrama.

Agradecimiento profundo a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por las enseñanzas impartidas en cada una de las sesiones de clase, con el único propósito de ser excelentes profesionales en la vida.

Profundo agradecimiento a la Empresa Minera Españolita S.A.C., encabezado por el gerente general Sr Teobaldo Apaza Jauregui, por concedernos los permisos para hacer uso de las distintas áreas para realizar las pruebas requeridas para el trabajo de investigación.

A nuestro asesor Dr. Abel Franklin Canal Cespedes, que con su experiencia y conocimiento nos brindó asesoramiento, recomendaciones para mejorar el trabajo de investigación y nos guio en todo el camino para poder concluir el presente trabajo.

A nuestros padres a quienes les debemos la vida por darnos amor, comprensión y las enseñanzas de seguir luchando en el camino de la vida.

A nuestros hermanos por el gran apoyo brindado para concluir el trabajo de investigación, por motivarnos en seguir adelante y ser mejor persona y profesional.

A nuestros familiares y amigos que forman parte de nuestras vidas, por los consejos y apoyo incondicional en los momentos más críticos y viceversa.

A mi compañero de tesis por el esfuerzo, dedicación y tiempo que le puso para concluir el presente trabajo.

Los tesisistas

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS Y TÉRMINOS	xvi
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	xxi

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Situación problemática.....	1
1.2	Formulación del problema.....	2
1.2.1	Formulación del problema general	2
1.2.2	Problemas específicos	2
1.3	Justificación de la investigación	2
1.3.1	Conveniencia	2
1.3.2	Social	3
1.3.3	Tecnológica.....	3
1.3.4	Económica	3
1.3.5	Valor teórico	4
1.3.6	Utilidad metodológica	4

1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	General	4
1.4.2	Específicos.....	5

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1	Internacionales.....	6
2.1.2	Nacionales	7
2.1.3	Locales.....	8
2.2	Bases teóricas	10
2.2.1	Cianuración	10
2.2.2	Teorías para la cianuración de oro.....	11
2.2.3	Termodinámica de la cianuración de oro	13
2.2.4	Mecanismo electroquímico.....	15
2.2.5	Cinética de reacción.....	19
2.2.6	Cianuración por agitación.....	23
2.2.7	Factores que influyen en el proceso de lixiviación	25
2.2.8	Minerales cianicidas o influencia de impurezas en la cianuración.....	33
2.2.9	Lixiviación del oro mediante proceso PAL (Lixiviación ayudado por peróxido de hidrógeno)	36
2.2.10	Cinética de la extracción de oro	41

2.2.11	H ₂ O ₂ en la disolución de oro en solución de cianuro	43
2.2.12	Importancia del uso del H ₂ O ₂ en la cianuración	44
2.2.13	Ventajas y desventajas con la aplicación de peróxido de hidrógeno.....	44
2.2.14	Diseño experimental.....	48
2.3	Definiciones conceptuales	51

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1	Hipótesis	54
3.1.1	General	54
3.1.2	Específicas	54
3.2	Variables	54
3.2.1	Dependiente	54
3.2.2	Independientes	54
3.2.3	Intervinientes	54
3.3	Operacionalización de variables e indicadores	56

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1	Ámbito del estudio:	57
4.2	Localización política y geográfica	57
4.3	Vías de acceso	58
4.4	Caracterización mineralógica	58

4.5	Diseño de la investigación: método, tipo y nivel.....	59
4.5.1	Método de investigación.....	59
4.5.2	Tipo de investigación.....	59
4.5.3	Diseño metodológico experimental	59
4.5.4	Alcance de la investigación	60
4.5.5	Alcances y limitaciones de la investigación	60
4.6	Población y muestra	60
4.6.1	Población	60
4.6.2	Muestra	61
4.7	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	61
4.7.1	Técnica de muestreo.....	61
4.7.2	Herramienta de muestreo.....	61
4.7.3	Instrumento de recolección de datos.....	61
4.7.4	Métodos de ensayos de laboratorio	62
4.8	Plan de análisis de datos y diseño experimental	62
4.9	Procedimiento experimental.....	62
4.9.1	Materiales de laboratorio y equipos.....	62

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1	Planificación y desarrollo de pruebas experimentales	66
5.1.1	Preparación mecánica del mineral y muestreo.....	66

5.1.2	Preparación de la muestra para cianuración	66
5.1.3	Pruebas experimentales de cianuración	67
5.1.4	Procedimiento para la prueba metalúrgica	67
5.1.5	Procedimiento con el uso del peróxido de hidrógeno	71
5.1.6	Procesamiento y análisis de data	75
5.1.7	Determinación del número de experimentos	75
5.1.8	Análisis de datos	76
5.2	Resultados experimentales	77
5.2.1	Primera etapa: ensayos por cianuración convencional	77
5.2.2	Segunda etapa: ensayos de cianuración con adición de peróxido de hidrogeno 82	
5.2.3	Aplicación factorial 2 ² utilizando minitab	85
5.2.4	Interpretación de graficas del diseño factorial	95
5.3	Interpretación y discusión de resultados	104
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	108
	ANEXOS	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Solubilidad de minerales de cobre a 23°C con cianuro	34
Tabla 2: Solubilidad de minerales de hierro con cianuro	35
Tabla 3: Descripción de las características físicas del peróxido de hidrogeno	39
Tabla 4 Distintas maneras de escribir los tratamientos del diseño 2 ²	51
Tabla 5: Operacionalización de variables e indicadores	56
Tabla 6: Vías de acceso a la planta de beneficio españolita del Perú SAC	58
Tabla 7 Caracterización del mineral a estudiar	58
Tabla 8: Variación de NaCN para pruebas preliminares	67
Tabla 9: Parámetros operacionales para la cianuración en planta de beneficio	67
Tabla 10: Valores iniciales para pruebas de cianuración convencional	71
Tabla 11: Rangos de operación para las pruebas de cianuración con adicción de peróxido de hidrógeno	71
Tabla 12: Variables a estudiar para las pruebas utilizando PAL	73
Tabla 13: Resumen de rango de las variables para iniciar pruebas con H ₂ O ₂	73
Tabla 14: Ley de cabeza de la muestra	77
Tabla 15: Rango de parámetros para la prueba de cianuración convencional	77
Tabla 16: Resumen de extracción de oro por prueba en cianuración convencional a 2000 ppm de NaCN	78
Tabla 17: Resumen de extracción de oro por prueba en cianuración convencional a 3000 ppm de NaCN	79
Tabla 18: Valores para determinar la ley calculada y % de extracción analizada y calculada	80
Tabla 19: Balance metalúrgico Prueba 01 cianuración convencional	81

Tabla 20: Balance metalúrgico Prueba 02 cianuración convencional	81
Tabla 21: Matriz codificada de resultados.....	82
Tabla 22: Condiciones iniciales de variables codificadas de concentración de H_2O_2 y tiempo de lixiviación.....	82
Tabla 23: Rango de variables operacionales para pruebas de cianuración con adición de peróxido de hidrógeno	83
Tabla 24: Prueba N° 01 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno a 3 mL y 72 horas	83
Tabla 25: Prueba N° 02 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 50 horas	83
Tabla 26: Prueba N° 03 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 72 horas	84
Tabla 27: Prueba N° 04 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 50 horas	84
Tabla 28: Prueba N° 05 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 5.5 mL y 62 horas (punto central)	84
Tabla 29: Prueba N° 06 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 72 horas (replica)	84
Tabla 30: Prueba N° 07 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 50 horas (replica)	85
Tabla 31: Prueba N° 08 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 72 horas (replica)	85
Tabla 32: Prueba N° 09 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 50 horas (replica)	85
Tabla 33: Resumen de diseño de pruebas experimentales	85
Tabla 34: Factores y niveles codificados de las variables independientes	86
Tabla 35: Matriz de diseño del experimento de adición de peróxido de hidrógeno en cianuración 2^2	86

Tabla 36: Plan de pruebas experimentales de diseño factorial 2^2 con dos replicas y 1 punto central	86
Tabla 37: Ajuste matricial del diseño factorial 2^2	87
Tabla 38: Efecto estimado para la extracción de oro en unidades codificadas	88
Tabla 39: Análisis de varianza (ANOVA)	89
Tabla 40: Resumen del modelo estadístico de la extracción del oro	90
Tabla 41: Análisis de residuo de valores observados y estimados para la extracción de oro	92
Tabla 42: Parámetros fundamentales de proceso	93
Tabla 43: Resultados de la optimización del proceso de cianuración con peróxido de hidrógeno	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Eh/pH para el oro y el aurocianuro.....	13
Figura 2: Diagrama de estabilidad potencial – pH para el sistema Au-H ₂ O-CN- a 25°C.....	15
Figura 3: Naturaleza electroquímica de la disolución de partículas de oro.....	16
Figura 4: Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea.....	17
Figura 5: Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones de cianuración, por corrosión electroquímica.....	19
Figura 6: Esquema del proceso de lixiviación por agitación.....	24
Figura 7: Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata	26
Figura 8: Efecto del pH vs % CN- y %HCN	27
Figura 9: Efecto del pH en la extracción de oro.....	28
Figura 10: Efecto de la temperatura en la cantidad de oro extraído.....	30
Figura 11: Comparación de la extracción de oro utilizando cianuración convencional y cianuración con adición de peróxido de hidrógeno.....	42
Figura 12: Comparación del consumo de cianuro de sodio en la cianuración convencional y con adición de peróxido de hidrógeno.....	45
Figura 13: Ubicación geográfica - planta de beneficio Españolita S.A.C.....	57
Figura 14: diagrama de flujo del proceso experimental.....	65
Figura 15: Balance de materia de la planta de beneficio Españolita SAC.....	74
Figura 16: Resumen por mes del porcentaje -200 malla.....	75
Figura 17: Porcentaje de extracción en función al tiempo para 2000 ppm de NaCN.....	78
Figura 18: Extracción de oro en función al tiempo para 3000 ppm de NaCN.....	79

Figura 19: Comparación en la extracción de oro con 2000 y 3000 ppm de NaCN.....	80
Figura 20: Grafica de interpretación para y (objetivo de extracción).....	95
Figura 21: Grafica de efectos estandarizados.....	96
Figura 22: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la incidencia del peróxido de hidrógeno.....	97
Figura 23: Grafica de residuos para la extracción de oro.....	98
Figura 24: Gráfica de efectos principales para la extracción de oro.....	99
Figura 25: Grafica de cubos (medias de los datos) para extracción de oro.....	100
Figura 26: Grafica de gradientes de color para la extracción de oro.....	101
Figura 27: Gráfica de superficies para la extracción de oro.....	102
Figura 28: Grafica de contorno para la extracción de oro.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

A	Área
ac	Acuoso
Ag	Plata
Au	Oro
Atm	Atmosferas
°C	Celsius
Ca	Calcio
CILO	Proceso de carbón en lixiviación con oxígeno
CIL	Carbón en lixiviación
CIP	Carbón en pulpa
CIC	Carbón en columna
CN ⁻	Ion Cianuro
CN	Cianuro
ΔG°	Variación de energía libre
ΔH°	Variación de Entalpia
E°	Potencial
g	Gramos
g/L	Gramos por litros
g/mL	Gramos por mililitros
g/T	Gramos por tonelada
g/m ³	gramos por metro cubico
G.E.	Gravedad especifica

Hrs	Horas
H	Hidrógeno
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
HCN	Acido Cianhídrico
K	Constante de equilibrio térmico
k	Constante cinética
KCN	Cianuro de Potasio
Kg	Kilogramo
Lix. Conv.	Lixiviación Convencional
LX	Proceso de lixiviación
l	Líquido
L	Litros
M	Malla ASTM
mL	Mililitros
mg	Miligramos
NaCN	Cianuro de Sodio
O	Oxígeno
Oz	Onzas
Oz/TC	Onzas por tonelada corta
P	Presión
PAL	Lixiviación asistida por peróxido de hidrógeno
PLS	Solución rica de lixiviación
pH	Potencial de hidrógeno
PPM	Partes por millón

ρ	Densidad
RPM	Revoluciones por minuto
s	Sólido
t	Tiempo
TM	Toneladas métricas
TMS	Toneladas métricas secas
TMH	Toneladas métricas húmedas
TMSD	Toneladas métricas secas día
TMHD	Toneladas métricas húmedas día
μ	Micrones
W	Peso
%	Porcentaje
%S	Porcentaje de Sólidos
[O ₂]	Concentración de oxígeno
[CN ⁻]	Concentración de iones de cianuro libre

RESUMEN

La presente investigación se centró en el uso de una tecnología poco estudiada, el PAL (lixiviación asistida con peróxido de hidrógeno), en el proceso de cianuración. Este reactivo se utilizó para evaluar la influencia en la extracción del oro, metal de interés de esta investigación. Se realizaron pruebas de cianuración convencional y cianuración con adición de peróxido de hidrógeno. El objetivo principal fue incrementar la extracción de oro en minerales sulfurados de baja extracción, aumentando la concentración de oxígeno disuelto, previniendo la formación de cianuro de hidrógeno (HCN) y pasivando minerales consumidores de cianuro mediante el uso del PAL. La metodología empleada es de tipo descriptivo-experimental, utilizando el método científico y el diseño factorial 2^2 para determinar el efecto de las variables. Los parámetros operacionales se ajustaron a los valores utilizados en la planta de beneficio Españolita del Perú SAC, de acuerdo con las condiciones de trabajo de dicha planta. En la primera etapa de la investigación, se realizaron pruebas preliminares para identificar variables de mayor efecto en cianuración convencional, estandarizando la granulometría y el pH de acuerdo a las variables operacionales de planta, y evaluando la concentración de cianuro en función tiempo como variable interviniente para la segunda etapa. En la segunda etapa, se tomó como variables intervinientes la granulometría, el pH y la concentración de cianuro, analizando la incidencia del peróxido de hidrógeno en la extracción. Como conclusión, se logró la reducción en el consumo de cianuro, pasando de 8.78 kg/TM a 8.34 kg/TM, y la disminución en el tiempo de lixiviación, de 72 a 50 horas. Además, se obtuvo la mejora en la extracción del oro, pasando del 65.78 % al 75.50 %.

Palabras claves: Peroxide Assisted Leaching (PAL), cianuración, extracción de oro, peróxido de hidrógeno, oxígeno disuelto, agente oxidante.

ABSTRACT

The present research focused on the use of a little-studied technology, Peroxide Assisted Leaching (PAL), in the cyanidation process. This reagent was used to evaluate its influence on gold extraction, the metal of interest in this study. Conventional cyanidation tests and cyanidation with the addition of hydrogen peroxide were conducted. The main objective was to increase gold extraction in low-recovery sulfide ores by increasing dissolved oxygen concentration, preventing the formation of hydrogen cyanide (HCN), and passivating cyanide-consuming minerals through the use of PAL. The methodology employed was descriptive-experimental, using the scientific method and a 2² factorial design to determine the effect of the variables. Operational parameters were adjusted according to the values used in the Españolita del Perú SAC beneficiation plant, based on the working conditions of the plant. In the first stage of the research, preliminary tests were carried out to identify the most influential variables in conventional cyanidation, standardizing particle size and pH according to the plant's operational variables, and evaluating cyanide concentration over time as an intervening variable for the second stage. In the second stage, the intervening variables considered were particle size, pH, and cyanide concentration, analyzing the effect of hydrogen peroxide on gold extraction. As a conclusion, a reduction in cyanide consumption was achieved, decreasing from 8.78 kg/TM to 8.34 kg/TM, along with a reduction in leaching time from 72 to 50 hours. Additionally, gold extraction improved, increasing from 65.78% to 75.50%.

Keywords: Peroxide Assisted Leaching (PAL), cyanidation, gold extraction, hydrogen peroxide, dissolved oxygen, oxidizing agent.

INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los 10 principales productores de oro a nivel mundial. Según (MINEM, 2024), la lixiviación de minerales auríferos representa aproximadamente el 78% de la producción de oro, mientras que otros métodos como la flotación y la gravimetría apenas alcanzan el 22%. En este contexto, es importante investigar e innovar las tecnologías de extracción para mejorar la extracción y eficiencia en los procesos de lixiviación.

El procesamiento de minerales auríferos ha representado un desafío importante en la metalurgia debido a la complejidad de las menas y gangas asociadas al oro. En el Perú, gran parte de las plantas de beneficio que procesan estos minerales son a nivel de mediana y pequeña minería, y utilizan métodos convencionales de lixiviación.

La planta de beneficio Españolita del Perú SAC acopia minerales provenientes de diversas regiones del país, enfrentando desafíos derivados de la heterogeneidad de los mismos, que incluyen sulfuros y minerales con bajas tasas de extracción. Además, con el aumento en el tratamiento de minerales auríferos, las leyes de explotación tienden a disminuir, lo que hace que los procesos de extracción sean más complejos. A esto se suman los retos relacionados con una legislación ambiental cada vez más estricta, que abarca tanto los aspectos socioambientales como la responsabilidad social empresarial.

En este escenario, el trabajo de investigación tuvo como objetivo incrementar la extracción de oro mediante una tecnología innovadora en el procesamiento de minerales auríferos. En la que se adicionó peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración para mejorar las tasas de extracción de oro, especialmente en minerales que muestran baja eficiencia con los métodos de cianuración convencional.

Para abordar este desafío, el estudio experimental utilizado es el diseño factorial 2^2 , que permitirá evaluar cómo la incorporación de peróxido de hidrógeno influye en la extracción de oro bajo diversas condiciones operativas.

La investigación se sostiene en la cartelización de minerales auríferos de baja extracción en la cianuración convencional, mediante la adición de peróxido de hidrógeno. Se propone que esta modificación podría mejorar las extracciones del oro con un menor consumo del agente lixivante, lo que sería un avance significativo tanto en términos de eficiencia como de costos operativos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La cianuración por agitación sigue siendo objeto de investigación, ya que busca optimizar los parámetros operativos para lograr la mayor extracción posible de oro en los minerales que lo contienen. Una de las ventajas de este método es su capacidad para procesar diversos tipos de minerales, como óxidos, sulfuros y carbonatos.

En la planta de beneficio Españolita del Perú SAC se procesan minerales provenientes de distintas regiones del país, entre ellos minerales sulfurados, los cuales alcanzan una extracción de oro del 50 % al 70 % con cianuro. El mineral caracterizado representa entre el 9 % y el 11 % del total de mineral que ingresa a la planta. Para alcanzar un 90 % de extracción en planta y asegurar que el relave tenga un contenido menor a 1 g/TM de oro, los minerales de baja extracción se mezclan en un 3 % a 5 % por campaña. Sin embargo, si la proporción de estos minerales supera el 5 %, la extracción total de la campaña se ve significativamente afectada.

Como consecuencia, cada mes se acumulan progresivamente en las canchas de mineral sin poder ser procesados ni extraer el oro contenido en ellos. La baja extracción de oro en los minerales sulfurados se debe a la presencia de pirita (micro y macro granular), arsenopirita, galena, pirrotita y otros minerales refractarios, lo que impide alcanzar extracciones superiores al 90 %. Además, estos minerales aumentan el consumo de reactivos (minerales cianicidas), requieren una mayor liberación de partículas (-200 M en más del 90 %) y prolongan el tiempo de residencia en los tanques de agitación. Como resultado, se requiere una mayor inversión en la adquisición de tanques de agitación, molinos de bolas y reactivos.

Actualmente, se investigan alternativas para procesar este tipo de minerales mediante el uso de sales ácidas, oxígeno puro, reactivos ecológicos o compuestos que adicionen oxígeno disuelto a la pulpa. La presente investigación propone la adición de peróxido de hidrógeno para mejorar la extracción de oro y procesar los minerales de baja extracción acumulados en las canchas de mineral. Para ello, se empleará un blending con lotes de mineral que presenten una extracción inferior al 70 %, según los resultados de las pruebas metalúrgicas de cianuración por agitación realizadas en la planta de beneficio Españolita MEDCSURSA. Que permita incrementar la cinética de extracción y reducir el tiempo de residencia en los tanques de agitación.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Formulación del problema general

¿Se logrará incrementar la extracción de oro contenido en minerales sulfurados por el proceso de cianuración por agitación con la adición de peróxido de hidrógeno como agente oxidante en la Planta de Beneficio Españolita SAC, Chala, Arequipa?

1.2.2 Problemas específicos

PE1 ¿Cuál será la concentración de peróxido de hidrógeno para incrementar la extracción de oro en la cianuración por agitación contenido de minerales sulfurados?

PE2-¿Cuál será el tiempo de cianuración que incrementa la extracción de oro con la adición de peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación contenido de minerales sulfurados?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Conveniencia

El incremento de la extracción del oro de minerales sulfurados con 50 - 70 % de extracción inicial se logró a través de la adición de peróxido de hidrógeno que se sostienen en la revisión bibliográfica. Que

indica que el uso de peróxido de hidrógeno incrementa la cinética de extracción y disminuye el consumo de reactivos y es conveniente económicamente. El proceso de lixiviación se realizó con los equipos disponibles y se procesando los minerales sulfurados, incrementando la extracción de oro; así mismo, se liberó espacio en las canchas de almacenamiento de lotes de mineral. El peróxido de hidrógeno es un reactivo accesible, con ventajas al usar aire forzado u oxígeno puro.

1.3.2 Social

Con el incremento de la extracción de oro de minerales auríferos sulfurados, con extracción de 50 - 70 %, adicionando peróxido de hidrógeno en la cianuración, se logró que la empresa tuviera una repercusión a nivel social en la mejora de las condiciones de vida de los trabajadores, beneficios sociales, estabilidad laboral, aceptación comunitaria y en la minimización de los conflictos laborales y sociales.

1.3.3 Tecnológica

Actualmente las plantas de beneficio de minerales auríferos utilizan el cianuro como agente lixivante. El peróxido de hidrógeno se propuso como una alternativa para el incremento en la extracción de metales preciosos de interés debido a la mejora de la extracción de oro y la reducción del consumo de cianuro.

El presente trabajo de investigación incrementó la extracción de oro contenido en minerales sulfurados con 50 - 70 % por el proceso de cianuración. La investigación opta la adición de peróxido de hidrogeno en el proceso de cianuración por agitación, teniendo en cuenta las variables: concentración de peróxido de hidrógeno y tiempo de lixiviación, quedando las otras variables por estudiar.

1.3.4 Económica

El incremento de la extracción de oro con la adición de peróxido de hidrógeno genera mayores ingresos a la empresa y consecuentemente a la estabilidad del empleo directo e indirecto en Chala, mejores condiciones de vida, mayores utilidades para los trabajadores y el aporte en rentas al Estado.

El uso del peróxido de hidrógeno permitió reducir los costos operativos. El incremento de la extracción del oro mayores a 75 %, obtendrá un incremento positivo en la rentabilidad de la empresa y su posición competitiva y tecnológica dentro de la región en la extracción de minerales auríferos sulfurados.

1.3.5 Valor teórico

Los resultados de la investigación contribuyen al enriquecimiento y conocimiento en el uso del peróxido de hidrógeno y puede variar según la naturaleza del mineral y las condiciones de procesamiento.

Los resultados de la presente investigación sirven de antecedente para futuras investigaciones, en el campo de la ingeniería metalúrgica e ingeniería de procesos, así como para el desarrollo de nuevas teorías en el ámbito de la extracción de minerales auríferos y otros.

1.3.6 Utilidad metodológica

En la presente investigación se incrementó el porcentaje de extracción de oro contenido en minerales sulfurados con una extracción de 50 – 70 % por cianuración convencional, lográndose con la adición de peróxido de hidrógeno incrementar la extracción a 75.5 %. Que se consiguió a través de pruebas metalúrgicas, evaluando la eficacia a determinadas concentraciones de peróxido de hidrógeno e intervalos de tiempo diferentes, obteniendo la máxima extracción de oro.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Incrementar la extracción del oro contenido en minerales sulfurados mediante la adición del peróxido de hidrógeno como agente oxidante por el proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio Españolita S.A.C, Chala, Arequipa.

1.4.2 Específicos

OE1 Determinar la concentración de peróxido de hidrógeno que permita incrementar la extracción de oro por el método de cianuración por agitación contenido en minerales sulfurados.

OE2 Determinar el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro con la adición de peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación contenido en minerales sulfurados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

En la planta de beneficio Españolita del Perú SAC no se conocen investigaciones realizadas respecto al uso de peróxido de hidrógeno.

2.1.1 Internacionales

Según Troya (1993) en su tesis titulada **“Procesos alternativos de la cianuración”** en Ecuador, tuvo como objetivo incrementar la concentración de oxígeno en la solución mediante procesos PAL y CILO.

El material que se utilizó para las pruebas PAL son relaves de la zona minera de Ponce Enríquez de la Provincia del Azuay. Consta de varias pruebas experimentales del proceso PAL, trata de averiguar la incidencia que tiene el uso que tiene el uso de peróxido de hidrógeno en la cinética de cianuración. Para lo cual se variaron las concentraciones de peróxido de hidrógeno presentes en la pulpa. Los resultados obtenidos en el laboratorio muestran mejoras los resultados obtenidos en procesos convencionales. Se obtuvo 78.8 % de disolución para la primera hora de agitación usando peróxido de hidrógeno, mientras que para la prueba sin este oxidante se obtuvo 27.83 % de disolución para el mismo período de tiempo.

Según el trabajo de investigación de Cardoña & Ordoñez (2006) titulada **“Estudio de la dilución de oro aplicando el proceso de cianuración, carbón activado por agitación CIP, presente en un mineral de la mina La Palmera del Municipio de Llanada del Departamento de Nariño”**, en Colombia. Tuvo como objetivo emplear tratamientos químicos como el peróxido de hidrógeno y el óxido plumboso para el proceso de extracción de oro. Para el trabajo se aplicó el diseño experimental bifactorial con

muestras de arena sin oro libre separado por gravimetría de la mina La Palmera y la veta corte negro localizados en el municipio de la Llanada. Se concluye que la extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación con adsorción en carbón activado CIP, presentó una recuperación de oro en 1.54 %, así mismo se aceleró el proceso de disolución de oro con respecto a la cianuración convencional y la disminución del consumo de cianuro en 26.88 %.

2.1.2 Nacionales

De acuerdo a la investigación de Zevallos (2014), titulada ***“Optimización de la recuperación de oro con el uso de peróxido de hidrógeno a nivel de laboratorio en la mina Arasi SAC”***, en Puno. Tuvo como objetivo optimizar la recuperación de oro mediante la adición de peróxido a nivel laboratorio, la metodología que utilizó fue a través del diseño experimental, corroborando la mejora en el proceso de lixiviación. Concluyendo que el peróxido de hidrógeno ayuda a la pasivación de minerales sulfuro, consumidores de cianuro, como también evitando la volatilización de cianuro. Aumentando la concentración de oxígeno junto al peróxido de hidrógeno se puede obtener mejoras en la cinética de lixiviación y por ende incrementar la extracción de oro. Se obtuvo mejor extracción de oro en una prueba experimental con H_2O_2 al 0.16 %, con una disolución de 90.75 %, obteniendo el incremento de la velocidad de disolución de Oro durante las primeras horas de agitación y de manera significativa cuando se añade peróxido de hidrógeno a la pulpa. Esto se debe, con seguridad a que después de este tiempo de H_2O_2 está disolviendo CN^- o atacando sulfuros, ya que la velocidad de disolución decrece significativamente.

Según, Morales (2016) en la tesis titulada ***“Extracción de plata y oro del relave sulfurado de la Minera Santa Fe por lixiviación con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo”***, en Lima. Tuvo como objetivo mejorar la extracción de Ag y Au en el proceso de cianuración convencional a partir de relave sulfurado de la planta de beneficio de la Minera Santa Fe Ancón - Lima. La investigación experimental empleada fue para mejorar las extracciones de los valores de Ag y Au incrementando el

nivel de oxígeno para la disolución y minimizar el consumo de cianuro y el tiempo de lixiviación, previniendo la volatilización en forma de ácido cianhídrico (HCN) y a la vez pasivar los minerales consumidores de cianuro mediante el proceso PAL y acetato de plomo, mejorando así la rentabilidad en el procesamiento de este relave ya mencionado.

En la investigación se realizaron cinco pruebas de cianuración convencional obteniendo bajas extracciones de oro y plata y partiendo de la prueba de mayor extracción de los valores metálicos y la adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo al proceso de cianuración, se obtuvo mejores comportamientos en la cinética de extracción de oro y plata, disminución de consumo de reactivos y reducción del tiempo de lixiviación. Las mejores extracciones se obtuvieron con granulometría de 95.4% a -200 malla, densidad de pulpa de 1330 g/L, pH de 11.05, tiempo de lixiviación de 72 horas, concentración de cianuro de sodio de 0.5 %, peróxido de hidrógeno al 50 % y acetato de plomo al 10 %; habiéndose logrado determinar NaCN: 8,85 kg/TM, NaOH: 2,75 kg/TM, H₂O₂: 3,0 kg/TM, acetato de plomo: 1 kg/TM. La extracción fue de 93,97 % de plata y 83,04 % de oro.

2.1.3 Locales

De acuerdo a la investigación de Guillen (2019) en la tesis titulada ***“Análisis del proceso PAL en la recuperación aurífera en la empresa minera Century Gold Mines SAC”***, en Condesuyos – Arequipa. Tuvo como objetivo optimizar la extracción del oro en la cianuración de concentrados de pirita aurífera, donde el tiempo se redujo en un 80 %, disminuyendo el desgaste en equipos y consumo de energía, además de reducir el consumo de NaCN en 55 %, mejorando la rentabilidad, teniendo en cuenta muchas consideraciones conservadoras. Para el experimento se usó el diseño factorial 2³ y determinadas los efectos e interacciones de los factores se obtuvo la extracción de 97.80% con los siguientes valores: cianuro de sodio 2.50 kg/TM, peróxido de hidrógeno 24 mL/min y tiempo de lixiviación de 36 horas. El proceso PAL es simple y seguro de operar.

Según Quispe (2020) en la tesis, ***“Implementación del proceso PAL para incrementar la recuperación de oro y plata en la Joya Mining SAC”***, en Camaná – Arequipa. Tuvo como objetivo establecer los parámetros para implementar el proceso PAL para mejorar la recuperación de oro y plata en la planta de beneficio Joya Mining SAC. Se empleó en la cianuración 0.01% de peróxido de hidrógeno y 0.2% de cianuro libre en solución, durante 72 horas. Ha demostrado mejorar la extracción de oro y plata, comparado con el tratamiento convencional, se logró la extracción del 82% de plata y 91% de oro en lugar del 78,9% de plata y 88,3% de oro. Para implementar este proceso, se recomienda usar 0,3526 litros de peróxido de hidrógeno por tonelada de mineral, flujo de pulpa de 13.6 m³/hora y procesar 150 toneladas métricas por día, lo que resultaría en un consumo diario de 52.89 litros de H₂O₂. Además, se concluyó que la concentración de cianuro libre por encima del 0.15% es beneficiosa para mejorar la extracción de oro y plata. El tiempo de lixiviación se redujo de 96 horas a 72 horas, lo que resulta en la reducción de costos y reactivos. La implementación de este proceso es viable económicamente.

De acuerdo con Aroquipa (2019) en la tesis titulada ***“Optimización del proceso de cianuración mediante el uso de peróxido de hidrógeno en planta metalúrgica Chala one SAC”***, Caravelí – Arequipa. Tuvo como objetivo mejorar la extracción de oro con el uso de peróxido de hidrógeno para un mineral de baja extracción y alto consumo de reactivo. Se optimizó las variables principales de mayor influencia como: grado de molienda a 90.22 % - 100 malla Tyler, concentración de peróxido de hidrógeno a 0.098% en un tiempo de 24 horas de modo que, aumentando la concentración de oxígeno, se obtuvo mejoras en la cinética de lixiviación e incremento en la extracción de oro. Se logró incrementar la extracción de oro de 52.59 % en 72 horas a 67 % a nivel laboratorio.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Cianuración

“La cianuración es el método más utilizado para el tratamiento de minerales auríferos y argentíferos. Consiste en disolver metales preciosos tales como el oro y la plata con soluciones diluidas de cianuro de sodio y potasio” (Gomez & Morales, 2012).

Según Rojas (2003). Menciona que el cianuro forma complejos estables con el oro y la plata para ser usado en los procesos de extracción. Este proceso de lixiviación se usa porque tiene relativamente un bajo costo y gran eficiencia para la disolución de estos metales nobles. El oxidante comúnmente utilizado en la lixiviación con cianuro es el oxígeno del aire, el cual contribuye a la economía de este proceso. La elección del proceso para la cianuración depende primeramente de la relación entre tamaño de partícula y extracción, costos de operación y capital y la velocidad de disolución en cada caso. Algunas veces otros factores tales como la extracción de otros metales de valor: plata y metales del grupo del platino, consideraciones medioambientales y disponibilidad de financiamiento de capital pueden jugar un importante rol en esta selección. (pág. 4).

Según García (2021). La cianuración es un proceso hidrometalúrgico basado en la utilización de soluciones de cianuros como medio químico para lixiviar el oro contenido en minerales. Los cianuros más importantes que se usan en este procedimiento son de potasio (KCN), sodio (NaCN) y calcio Ca (CN₂). Las sales de cianuro, se disuelven en el agua para formar sus respectivos cationes metálicos e iones de cianuro libre. Las sales mencionadas son fuentes eficientes de cianuro para la lixiviación. Sin embargo, el cianuro de sodio y cianuro de potasio son más solubles que el cianuro de calcio y están disponibles de forma más pura, lo cual tiene ventajas para el manejo del reactivo en

lixiviación. La elección del tipo de cianuro depende de la aplicación, costo y disponibilidad de la sal. (Pag. 76).

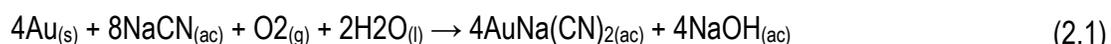
La producción de reactivos para el procesamiento de minerales para recuperar oro, cobre, zinc y plata representa aproximadamente el 13 % del consumo de cianuro a nivel mundial, y el 87 % restante de cianuro es utilizado en otros procesos industriales tales como plásticos, adhesivos y pesticidas. (Rosado, 2012).

2.2.2 Teorías para la cianuración de oro

Desde sus inicios, se buscó la forma de extraer el oro contenido en minerales auríferos. En 1783, Carl Wilhelm Scheele descubrió el cianuro y observó que este podía disolver el oro. Según (Aroquipa, 2019), a partir de este descubrimiento se desarrollaron las siguientes teorías:

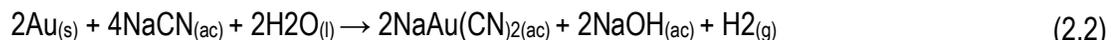
2.2.2.1 Ecuación de Elsner o teoría del oxígeno

En el año de 1846, L. Elsner, determinó que el oxígeno forma parte integral de la reacción y es absolutamente necesario en la disolución del oro, tal como se muestra en la siguiente ecuación:



2.2.2.2 Ecuación de Janin o teoría del hidrógeno

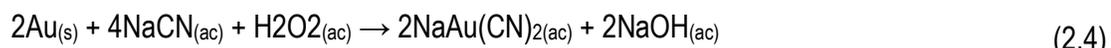
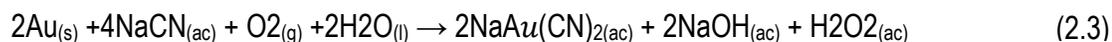
Janin demostró que durante la disolución del oro en soluciones de cianuro se generaba gas hidrógeno de acuerdo con la siguiente reacción, el oxígeno no es necesario.



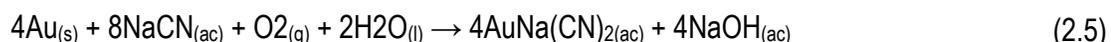
Pero, Mac Laurin y Christy hallaron en la misma época, que la velocidad de la reacción aumentaba con el incremento de cianuro y el oxígeno disuelto como lo cita (Aroquipa, 2019)

2.2.2.3 Ecuación de Bodlaender o teoría del peróxido de Hidrógeno

Bodlaender sugirió que la disolución del oro podría llevarse en dos etapas, de acuerdo con las siguientes reacciones, de donde el peróxido de hidrógeno es formado como un producto intermedio, de acuerdo a las siguientes reacciones.



Las 2 ecuaciones fueron sugeridas por Bodlaender, sin embargo, la ecuación total es la misma que el de Elsner.



Para Misari (2012), la afirmación de Barsky, Swainson y Hedley determinaron las energías libres de formación del complejo cianuro de oro y cianuro de plata. A partir de los datos obtenidos, ellos calcularon los cambios de energía libre en las reacciones sugeridas y demostraron termodinámicamente que las reacciones propuestas por Elsner y Bödlander eran las únicas que podían ser factibles.

Sus resultados mostraron que para la ecuación de Elsner la reacción procederá prácticamente en forma completa; es decir, hasta que prácticamente todo el cianuro sea consumido o todo el metal disuelto.

Para la ecuación de Janin las constantes de equilibrio no son muy favorables; la formación de hidrógeno puede ser considerada imposible bajo condiciones ordinarias de cianuración.

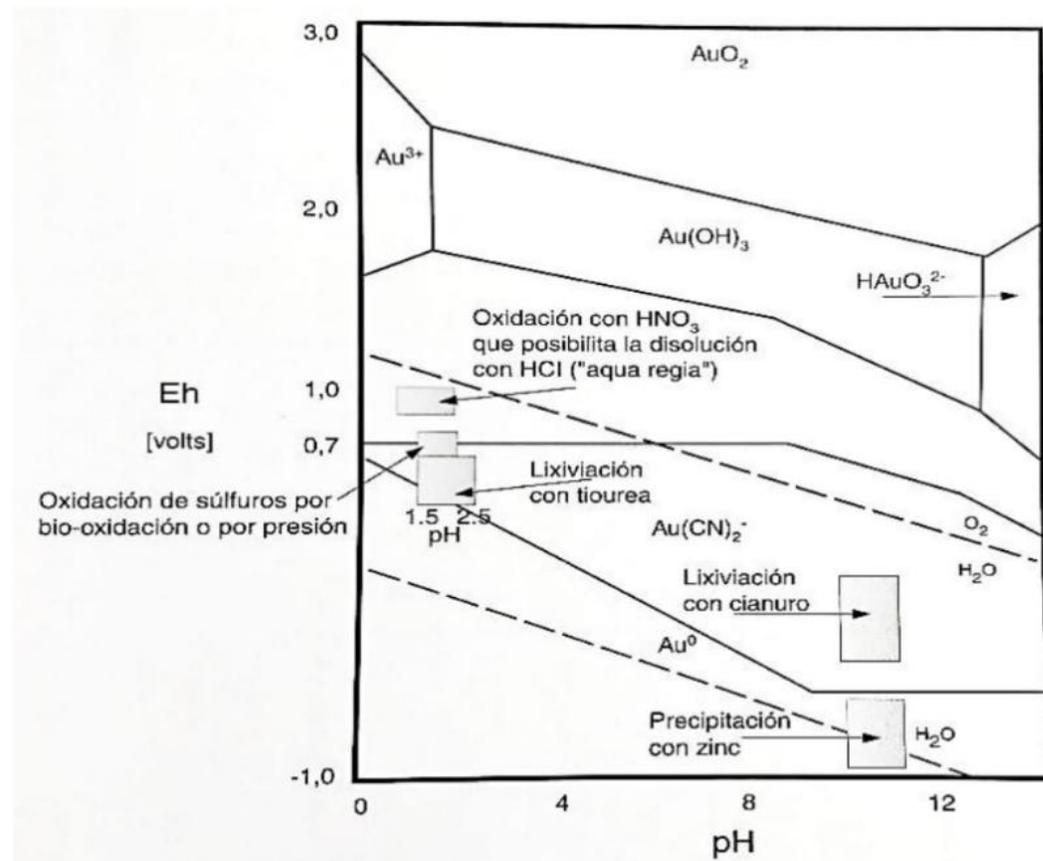
Para las ecuaciones de Bodlaender, las constantes de equilibrio son favorables; por consiguiente, las reacciones propuestas son posibles. En esta relación, Bodlaender encontró la formación de peróxido de hidrógeno. (pag. 24 - 25)

2.2.3 Termodinámica de la cianuración de oro

Está estrechamente relacionada con los diagramas de Pourbaix, que describe el proceso de lixiviación para la extracción de oro, puede entenderse mejor observando el diagrama Eh/pH mostrado en la figura 1, en la que se puede observar el efecto del pH y el Eh en los rangos de operación de ocurrencia para diferentes procesos de extracción del oro.

Figura 1:

Diagrama Eh/pH para el oro y el aurocianuro.



Nota. Diagrama Eh/pH del oro y alternativas de procesos de extracción de oro, tomado en (Poblete, 2019)

De la figura 1 se deduce que la lixiviación por cianuración ocurre en los rangos de pH de 10 a 11.5 aproximadamente y requiriendo de condiciones que sean oxidantes.

Poblete (2019) recomienda el uso de cianuro en alguna de sus formas más solubles entre los que se encuentran el cianuro de sodio (NaCN), el cianuro de potasio (KCN) y el cianuro de calcio ($\text{Ca}(\text{CN})_2$). A nivel industrial, se prefiere el cianuro de sodio debido a que contiene una mayor cantidad de CN^- activo por unidad de peso, alcanzando un 53%, en comparación con el 40% que presenta el cianuro de potasio. Esta diferencia influye en los costos asociados con la comercialización y el transporte del cianuro. (pag. 52)

El oro, metal noble, en la naturaleza se encuentra generalmente en estado elemental o nativo debido a su carácter inerte en medio acuoso aireado. Para la disolución se requiere: agentes oxidantes y agentes complejantes como el oxígeno y el cianuro respectivamente, el último es capaz de estabilizar el ion auroso y áurico en la solución.

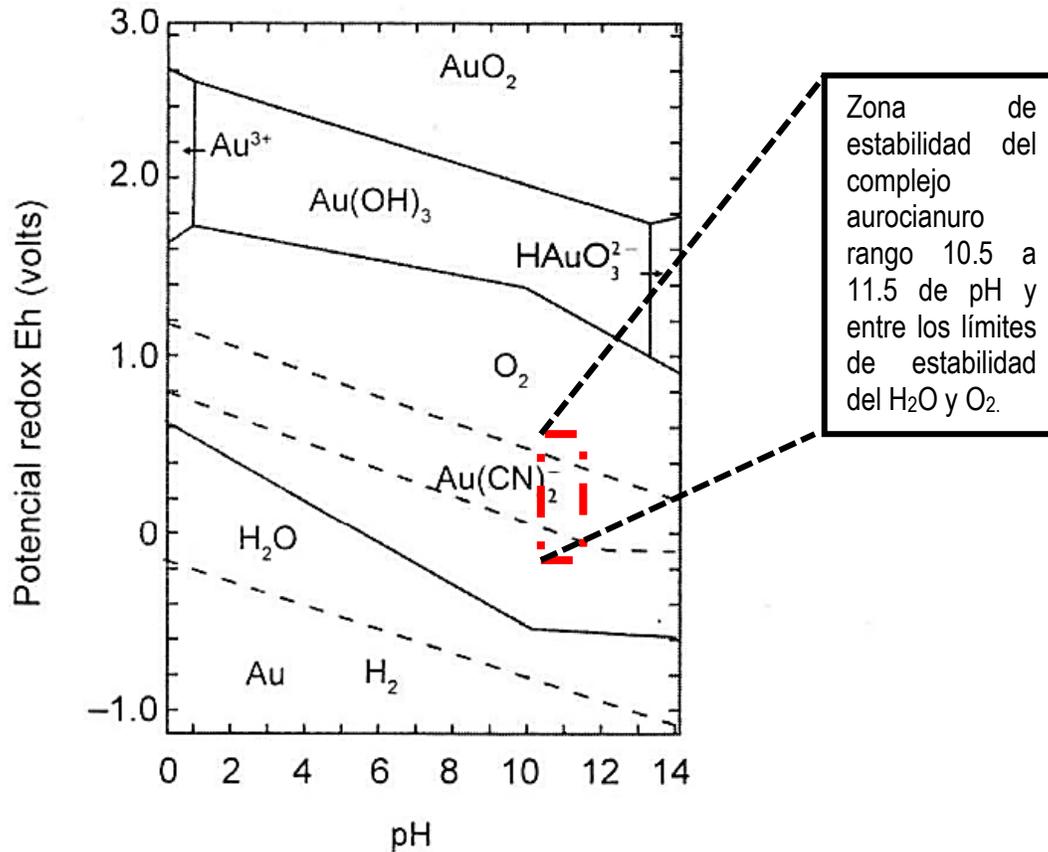
Misari (2012), hace mención que los diagramas de Pourbaix muestran que compuestos como $\text{Au}(\text{OH})_3$, AuO_2 , HAuO_3^{2-} y también el ión Au^{3+} requieren elevados potenciales redox (superiores al de la descomposición del oxígeno) para formarse. La lixiviación del oro metálico es, por lo tanto, muy difícil a causa de la gran estabilidad de este último. En la figura 2 se representa el diagrama de estabilidad potencial vs la alcalinidad (Eh– pH).

En el diagrama $\text{Au-H}_2\text{O-CN}^-$, no obstante la reacción $\text{Au}(\text{CN})_2 + e^- = \text{Au} + 2\text{CN}^-$, se lleva a cabo dentro de los límites de estabilidad del agua. El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente muestra una pendiente pronunciada (efecto de la hidrólisis del cianuro a pH menor a 9), tornándose luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico; hecho que a su vez permite que se haga efectiva la reacción de lixiviación por formación de aurocianuros. En

el mismo gráfico se puede observar que los compuestos $\text{Au}(\text{OH})_3$, Au^{3+} , y HAuO_3^{2-} son reducidos por la introducción del cianuro. (pag. 15).

Figura 2:

Diagrama de estabilidad potencial – pH para el sistema Au-H₂O-CN- a 25°C.



Nota. Estabilidad del complejo aurocianuro a temperatura ambiente, adaptado de (Quispe, 2020).

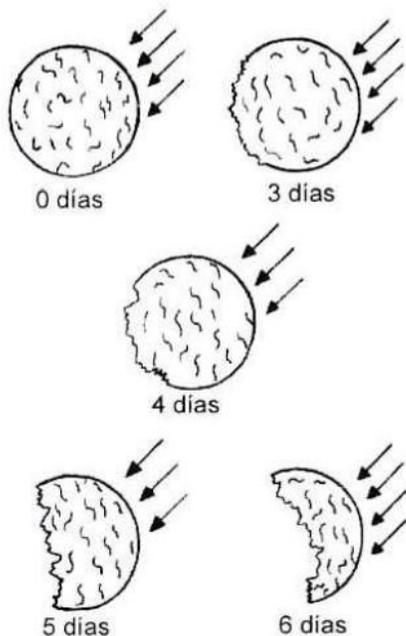
2.2.4 Mecanismo electroquímico

Según Thompson 1947, (citado en Misari, 2012) se realizó un experimento en el que se demostró la corrosión del oro mediante la circulación de una corriente de KCN libre de aire. En este experimento, se utilizó esferas de oro, y se observó que, después de tres días, estas presentaban una ligera corrosión en el lado opuesto al de la incidencia de la corriente. Al cabo de otros tres días, las partículas de oro se habían reducido a la mitad, tal como se muestra en la figura 3.

La explicación de este fenómeno es que, durante la circulación de la corriente de KCN, la superficie no expuesta actuó como ánodo, mientras que la superficie expuesta funcionó como cátodo en una celda concentrada de oxígeno.

Figura 3:

Naturaleza electroquímica de la disolución de partículas de oro



Nota. (Thompson, 1947) citado por (Misari, 2012, pág. 17)

Las reacciones más importantes en los procesos hidrometalúrgicos de oro son heterogéneas, implicando la transferencia de masa en las interfases generadas entre sólido y líquido. En la figura 4 se muestra un modelo de reacción simplificada con los pasos secuenciales para que exista disolución del oro en cianuro, los mismos que son:

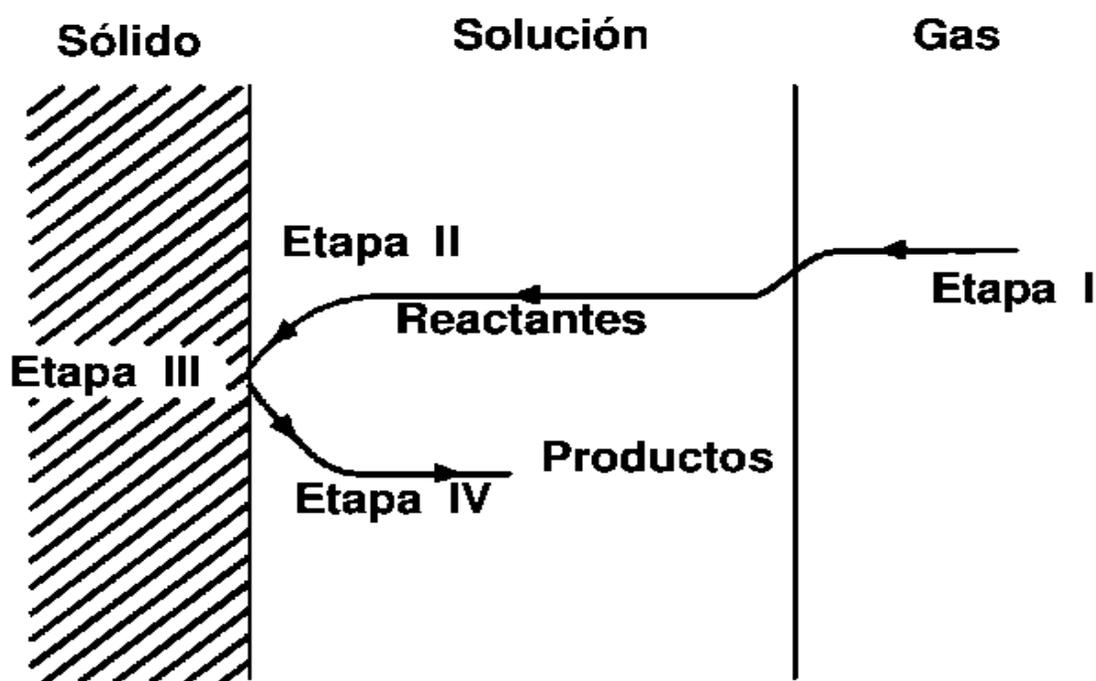
- 1) Absorción de oxígeno en la solución.
- 2) Transporte de cianuro y oxígeno disuelto a la interface sólido-líquido.
- 3) Adsorción de los reactantes (CN y O₂) en la superficie sólida.

- 4) Desorción de los complejos solubles de oro-cianuro y otros productos de la reacción desde la fase sólida.
- 5) Transporte de los productos desorbidos a la solución.

La etapa 3 como lo describen (Armintá & Vargas, 2022) “llega a involucrar reacciones de dos tipos: las que involucran solo una reacción química y las que son electroquímicas, una oxidación y reducción que comprende transferir electrones”.

Figura 4:

Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea



Nota. (Navarro, 2006)

Comprender el mecanismo de disolución del oro es importante, ya que durante el proceso ocurren diversas reacciones, algunas de las cuales implican un consumo no deseado de NaOH y cianuro, lo que reduce la eficiencia del proceso.

a) Reacción Anódica

“La reacción anódica involucra la oxidación del Au^0 a Au^{+1} a través de dos etapas: la reacción de oro con un ion de cianuro para formar un compuesto superficial que puede ser $AuCN^-$ y luego la formación del complejo de cianuro de Au^{+1} a $(AuCN)_2^-$ ”, Como se observa en las siguientes reacciones Matthew, 1997 (citado en Huarca & Orlando, 2023).



b) Reacción Catódica

“Las anteriores reacciones están acompañadas por la reducción del oxígeno en el cátodo en la superficie del metal. En la superficie del oro, las reacciones muestran la reducción del oxígeno a peróxido y la reducción del peróxido a hidroxilo” Matthew, 1997 (citado en Huarca & Orlando, 2023).

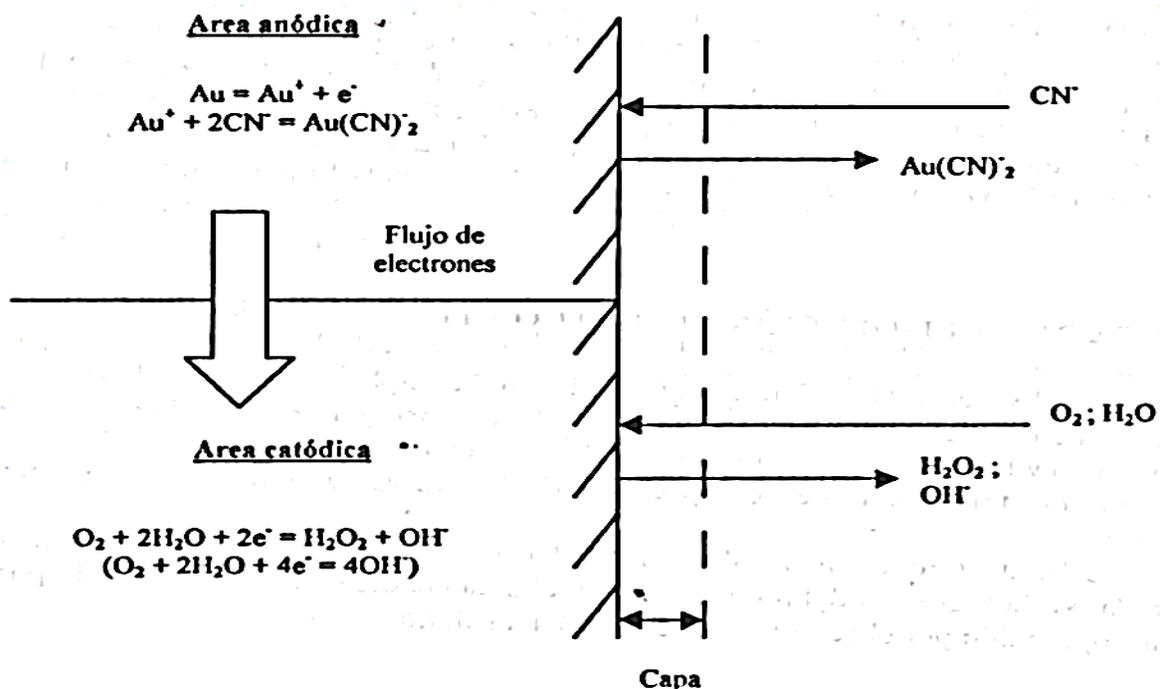


En resumen, de la figura 5 de las reacciones propuestas, de acuerdo con su estequiometría, se tiene:

- 1) Se necesitan 4 moles de cianuro por cada mol de oxígeno presente en solución.
- 2) Se necesitan 2 moles de cianuro para disolver un mol de oro.
- 3) Se requiere de 1 mol de oxígeno para disolver 2 moles de oro
- 4) Se genera 1 mol de agua oxigenada por cada 2 moles de oro disuelto.

Figura 5:

Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones de cianuración, por corrosión electroquímica.



Nota. Representación de las dos medias reacciones anódicas y catódicas, extraído de (Navarro, 2006)

2.2.5 Cinética de reacción

El tiempo en el cual se lleva a efecto la reacción es, en gran parte, el de la etapa de menor velocidad (llamada etapa controlante) es importante identificar a ésta para incrementar su rapidez. Una reacción fisicoquímica en la cual se hallan involucradas una fase sólida y otra líquida, se realiza en las cinco etapas siguientes:

- Hidroxilación-hidratación superficial
- Reacción de especies superficiales.
- Adsorción de especies que reaccionan sobre la superficie sólida.
- Desorción de especies de productos de la superficie sólida.
- Reacción del producto en solución

El tiempo que emplean las etapas a y e está controlado por las velocidades de difusión, mientras que en las etapas b, c y d depende de la rapidez de los procesos químicos. Si la difusión es muy lenta, es necesario aumentar la agitación para acelerar la reacción. En cambio, si la reacción se ve retardada por los procesos químicos, se debe incrementar la temperatura. La cianuración está gobernada por las leyes de Fick, expresadas de la siguiente manera (Misari, 2012, pag.18).

Misari (2012) presenta las siguientes ecuaciones para la cianuración (leyes de Fick), expresadas de la siguiente manera (ecuaciones del 2.10 al 10.21)

$$\frac{d(O_2)}{dt} = D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} \quad [[O_2]_i - [O_2]_s] \quad (2.10)$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} \quad [[O_2]_i - [O_2]_s] \quad (2.11)$$

Y para la cianuración que va al área anódica:

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{DCNA_2}{\delta} \quad [[CN^-]_i - [CN^-]_s] \quad (2.12)$$

Donde:

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \text{velocidad de difusión del CN en mol/s}$$

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \text{velocidad de difusión del O}_2 \text{ en mol/s}$$

$$D_{O_2} \text{ y } D_{CN^-} = \text{son los coeficientes de difusión en cm}^2/\text{s}$$

A_1 y A_2 = son la superficie anódica y catódica sobre las cuales se lleva a cabo la reacción, ambas medidas en cm^2

$$\delta = \text{ancho de la capa límite de Nernst, en cm}$$

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

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

Si en las dos anteriores ecuaciones se considera que la reacción química es rápida se tiene:

$[O_2]_s = [CN^-]_s = 0$. Si se acepta asimismo que la velocidad de disolución del metal es dos veces la del oxígeno y solo la mitad de la del cianuro, se obtiene la siguiente igualdad:

$$2D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} [O_2] = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} [CN^-] \quad (2.13)$$

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

$$v = \frac{2AD_{O_2} D_{CN^-} [O_2] [CN^-]}{\delta \{D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2]\}} \quad (2.14)$$

Obtenida esta ecuación se debe considerar dos posibilidades; cuando las concentraciones de cianuro son bajas, el primer término del denominador es despreciable respecto al segundo, y de la expresión anterior, se tiene:

$$v = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A}{\delta} [CN^-] \quad (2.15)$$

$$v = K_1 [CN^-] \quad (2.16)$$

Por lo tanto, en estas condiciones, la velocidad de lixiviación es función de la concentración de cianuro, hecho que ha sido comprobado experimentalmente. La segunda posibilidad es que las concentraciones de este compuesto sean altas, en este caso el segundo término del denominador es despreciable respecto al primero, por lo que la ecuación se convierte en:

$$v = 2D_{O_2} \frac{A}{\delta} [O_2] \quad (2.17)$$

$$v = K_2[O_2] \quad (2.18)$$

Significa que, a altas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solamente de la concentración de oxígeno. Los experimentos han corroborado también esta previsión teórica, para hallar el límite en el cual el predominio de una de las concentraciones cede el paso al de la otra en el control de la velocidad de lixiviación; se debe volver a la ecuación general, cuando dicha ecuación se cumple:

$$D_{CN^-}[CN^-] = 4D_{O_2}[O_2] \quad (2.19)$$

O, lo que es lo mismo,

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} \quad (2.20)$$

Y se asume que $D_{O_2}/D_{CN^-} = 1.5$ (promedio establecido a partir de diferentes pruebas experimentales) se determina que el límite referido se alcanza cuando:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6 \quad (2.21)$$

Los valores encontrados en experiencias de laboratorio varían de 4.6 a 7.4; por lo que el obtenido en el cálculo teórico se considera representativo.

Existen varias técnicas de lixiviación por cianuración y diferentes tipos de reactivos que en el presente trabajo de investigación se tratará la cianuración por agitación. Para su mención los otros métodos de lixiviación son; lixiviación in situ, lixiviación en botaderos; lixiviación en pilas y lixiviación por percolación o batea.

2.2.6 Cianuración por agitación

Cuando se habla de lixiviación por agitación, la asociamos estrechamente con la molienda húmeda, ya que esta técnica justifica su uso debido a sus mejores extracciones y menores tiempos de procesamiento, especialmente en minerales frescos de alta ley. En este proceso, el mineral es fracturado hasta alcanzar un mayor grado de liberación, lo que aumenta las áreas expuestas a la lixiviación y la agitación. Esto, a su vez, reduce el espesor de la capa límite de difusión y maximiza el área de la interface gas-líquido.

La lixiviación por agitación es el método más utilizado a nivel mundial debido a los altos porcentajes de extracción de oro que se logran, que oscilan entre el 75% y el 90%. Además, presenta tiempos de proceso de lixiviación más cortos y puede aplicarse a diversos tipos de minerales, tales como óxidos, sulfuros, carbonatos, entre otros. Aunque los costos de operación son elevados, tanto en la instalación de la planta de procesamiento como en el proceso necesario para obtener el producto final, estos costos están justificados debido a su aplicación en minerales de alta ley.

En los tanques de agitación, es necesario trabajar con ciertos parámetros, como la densidad de pulpa del overflow que ingresa al tanque, la cual debe estar entre 1270 y 1340 g/l. Esta variación dependerá de la granulometría del mineral, que generalmente se requiere con un 85-90% de partículas pasantes en -200 malla para obtener una buena disolución del complejo aurocianuro. Además, el proceso debe mantenerse en un pH alcalino entre 10.5 y 11.5, ya que valores inferiores a estos favorecen la formación de ácido cianhídrico, que es sumamente tóxico para la salud. Este pH se ajusta mediante la adición de cal o hidróxido de sodio antes de incorporar el cianuro.

“La agitación puede ser producida de dos formas, la primera usando el sistema de air-lift y la segunda, la más utilizada, es por agitación mecánica” (Poblete, 2019).

2.2.6.1 Agitación neumática

Se realiza en tanques cilíndricos verticales con fondo cónico que también emplea elevadores de aire (“air-lift”), que son conocidos como tanques Pachuca, por el cual se inyecta aire comprimido.

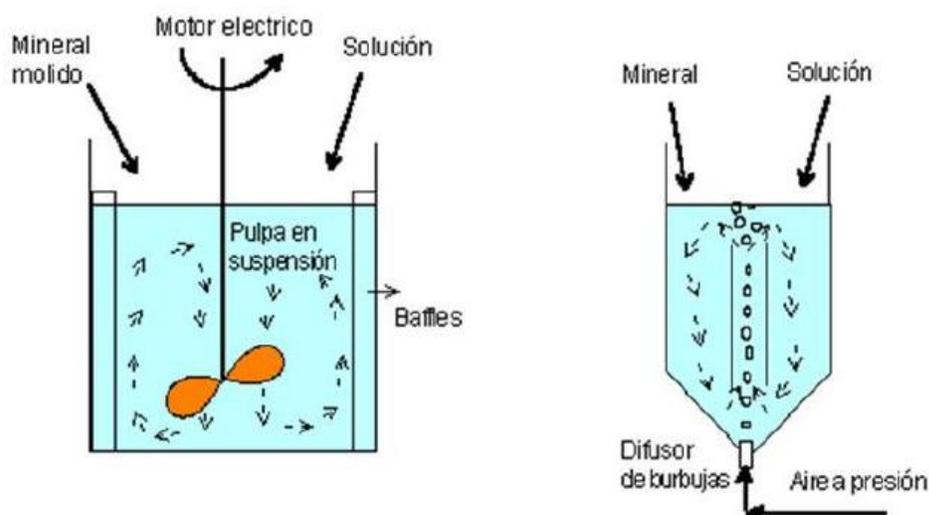
Ambos mecanismos mantienen el mineral en suspensión hasta lograr la disolución completa. El sistema de lixiviación por agitación favorece la cinética de reacción, ya que actúan factores como temperatura y agitación y permite el uso de reactivos oxidantes altamente agresivos (Domic, 2001, pág. 175). Ver figura 6.

2.2.6.2 Agitación mecánica

En la agitación mecánica se lleva a cabo en tanques, como se muestra en la figura 6 donde son generalmente cilíndricos con giro mediante rotores (hélices o paletas planas) en el fondo del tanque, la geometría de estas varía según características granulométricas de mineral y la viscosidad de la pulpa lo que permite una rotación continua (Gaviria, Restrepo, & Bustamante, 2007).

Figura 6:

Esquema del proceso de lixiviación por agitación



Nota: Tipos de agitación en la cianuración obtenido de (Poblete, 2019)

2.2.7 Factores que influyen en el proceso de lixiviación

El proceso de lixiviación por agitación sigue siendo investigado a través de la evaluación de los parámetros a diferentes condiciones experimentales de trabajo, con la finalidad de encontrar el rango de parámetro adecuado para obtener altas extracciones y condiciones óptimas de proceso.

2.2.7.1 Efecto de la velocidad de agitación

Uno de los factores más importantes en la cianuración viene a ser la agitación debido a que disminuye el espesor de la capa de difusión que rodea a las partículas de oro, reduciéndose la distancia que debe trasladarse los iones de cianuro y el oxígeno para alcanzar la superficie del metal. Por lo tanto, la buena agitación, debe mantener lo suficiente los sólidos en suspensión dentro de la pulpa, para que no decanten. Con el aumento de la velocidad de agitación, se incrementará la transferencia de masa de cianuro y oxígeno, lo que permitirá maximizar los niveles de oxígeno disuelto.

Se recomienda una agitación entre 50 y 60 rpm para una buena cianuración, con esto se logra el ataque del cianuro sobre la superficie expuesta del oro, al mismo tiempo ayuda a inyectar oxígeno de forma mecánica, así mismo se advierte que las velocidades se regulan según el mineral y proceso, según (Robles, 2019) en “el proceso de carbón en pulpa una mayor velocidad podría atricciónar el carbón generando pérdidas”.

2.2.7.2 Concentración de cianuro

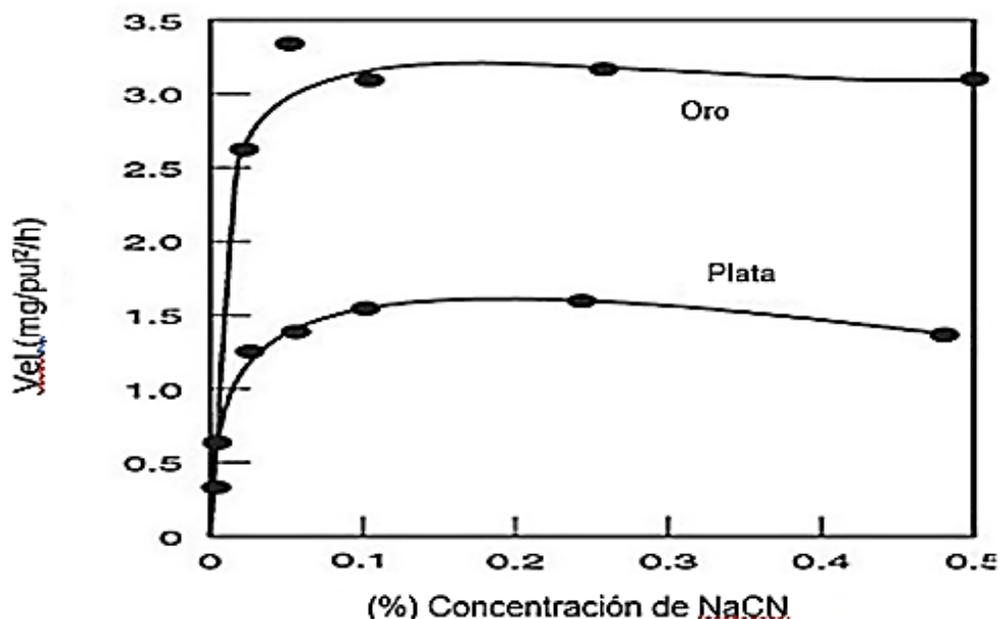
La disolución de oro tiende a incrementar rápidamente, conjuntamente con el aumento de la concentración de cianuro, hasta alcanzar un valor máximo. Superado este valor, si se continúa incrementando la concentración de cianuro la cantidad de oro disuelto no aumenta, muy por lo contrario, tiene un leve efecto retardador. El otro extremo de bajar la concentración de cianuro tampoco ayuda a la cianuración debido a que por debajo de la concentración óptima proporcionará una consecuencia negativa para la lixiviación del oro.

La concentración de cianuro, también, depende de las leyes de cabeza del mineral, presencia de minerales con elementos cianicidas, así como de la presencia de oxígeno, Según Christy citado en Misari “para todos los propósitos prácticos, soluciones menores a 0.001 % de cianuro de potasio no disuelven oro” (2012).

En plantas de procesamiento de minerales auríferos las concentraciones de cianuro varían entre 0.12% a 0.24%, con consumos adecuados con respecto a la extracción de oro. En la figura 7 se muestra la gráfica de la velocidad de extracción del oro vs la concentración de cianuro a una concentración de oxígeno de 8.2 mg/L y a 25 C. El valor del oxígeno disuelto disminuye con la altitud y con el incremento de temperatura.

Figura 7:

Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata



Nota. Comparación de la disolución de oro y plata, Cáceres. G citado por (Aroquipa, 2019)

Según la figura 7, se puede observar que la disolución máxima del oro se produce con una concentración de cianuro de sodio entre 0.1% y 0.2%. A partir de una concentración del 0.25%, la

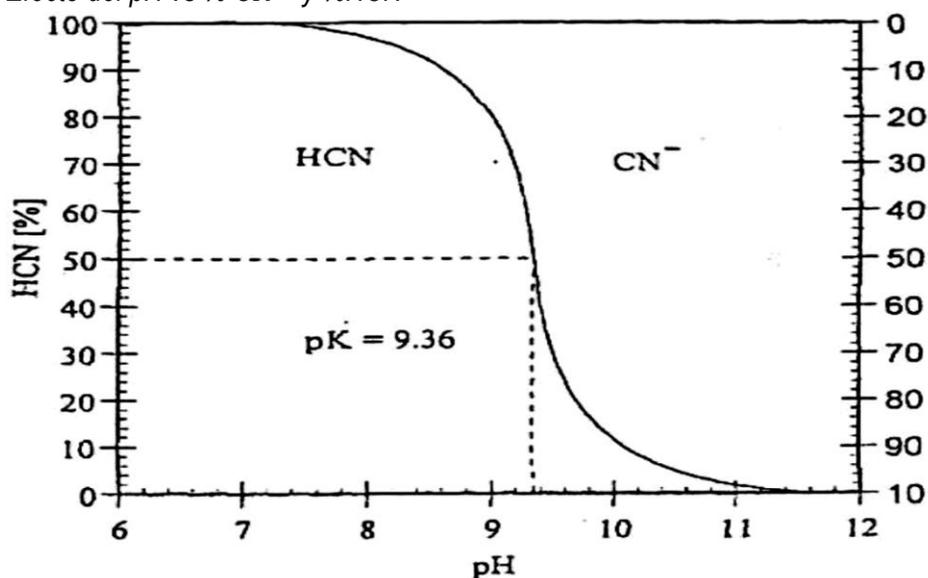
extracción de oro tiende a disminuir ligeramente. De esta manera, se incrementa innecesariamente el consumo de cianuro en el proceso.

2.2.7.3 Efecto del pH

Es sumamente importante el uso de reactivos álcalis para mantener el equilibrio de la reacción de disolución del cianuro, entre el cianuro libre y el ácido cianhídrico, debido a que se ocasiona pérdidas importantes de cianuro en la solución a causa de una elevada presión de vapor del HCN a 25°C, ya que se volatiliza fácilmente en la superficie de las soluciones. También es muy importante evitar la oxidación de cianuro libre a cianato, $CN^- + O_2 + H_2O \rightarrow CNO^- + H_2O_2$, debido a que este último no disuelve el oro.

Figura 8:

Efecto del pH vs % CN^- y %HCN



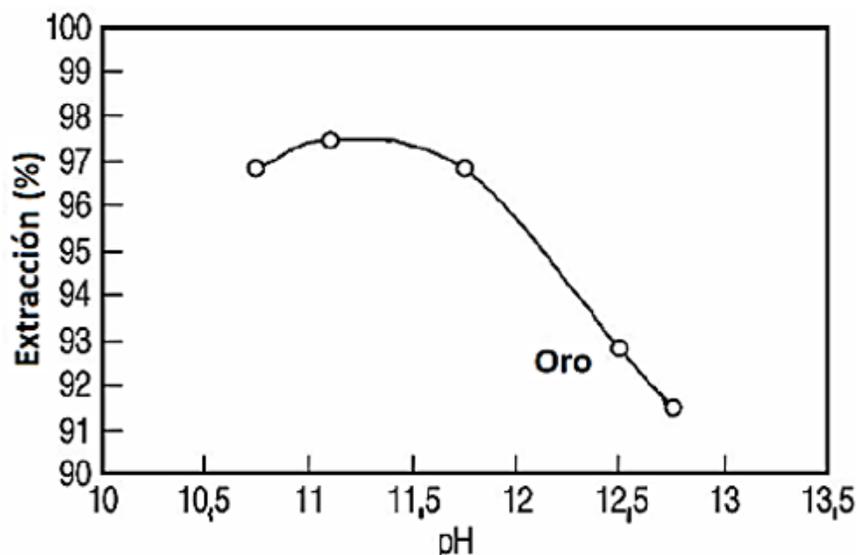
Nota. Relación entre el CN^- y el HCN en un medio alcalino obtenido de (Yana, 2018)

En la figura 8 se puede observar que a pH de 9.4 aproximadamente se tiene 50 % de disolución de ion cianuro y la otra parte formada por ácido cianhídrico, según la tendencia evaluada a mayor pH se tendrá una mayor disolución de cianuro a ion cianuro y por lo que el ácido cianhídrico se verá disminuida en relación proporcional con el incremento de alcalinidad de una solución, tal como sigue en la siguiente reacción: $CN^- + H_2O = HCN + OH^-$.

Si bien es cierto que a medida que incrementa la alcalinidad mayor será la disolución del cianuro y se maximiza la extracción de oro, pasados el pH de 11.5 la velocidad de extracción se ve en forma lineal o forma decreciente, por lo que (Yana, 2018) indica que, “para alcanzar velocidades altas de disolución de oro y plata, en la práctica se debe mantener un rango operacional de pH que esta entre 10.5 y 11.5”, tal como se muestra en la figura 9.

Figura 9:

Efecto del pH en la extracción de oro.



Nota. Según la gráfica se debe de mantener en un rango de 10.5 a 11.5 el pH para obtener una extracción de oro optima, (Yana, 2018).

Para el procesamiento de minerales auríferos existen reactivos alcalinos para regular el pH de cianuración, tales como; el oxido de calcio, hidróxido de calcio y el hidróxido de sodio como reactivos comúnmente utilizados. (Yana, 2018) menciona que “el hidróxido de sodio tiene un costo relativo más alto a la cal, pero presenta la ventaja de ser altamente soluble lo que facilita la preparación, manejo y dosificación”.

Según López (2014), algunas ventajas del uso de reactivos alcalinos son:

- Evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis.
- Evitar la pérdida de cianuro por acción del dióxido de carbono del aire.

- Descomponer los bicarbonatos del agua antes de ser usados en cianuración.
- Neutralizar los compuestos ácidos tales como sales ferrosas, sales férricas y sulfato de magnesio en el agua antes de adicionar al circuito de cianuro.
- Neutralizar los constituyentes ácidos del mineral.
- Neutralizar los compuestos ácidos que resultan de la descomposición de varios minerales en soluciones de cianuro.
- Ayudar a la sedimentación de partículas de mineral fino de modo que la solución impregnada clara pueda ser separada del mineral cianurado.
- La lixiviación en ambiente alcalino es más selectiva respecto de la ganga.
- Mejorar la extracción cuando se trata de menas que contengan telururos, plata roja (ruby), que se descomponen más rápidamente a grados mayores de alcalinidad. (pag.22-23).

2.2.7.4 Tiempo de cianuración

El tiempo en el proceso de cianuración es muy variable tal como afirma (Ramirez, 2016) “que la cianuración depende de factores tales como la de: composición mineralógica, tamaño de partículas, grado de liberación, porosidad de la mena, concentración del cianuro en la solución y la temperatura del medio ambiente”.

Mientras mayor sea el tiempo requerido para alcanzar extracciones deseadas, se requerirá mayor capacidad en los tanques de lixiviación, llevando a mayores costos de inversión en la instalación de los equipos y materiales en planta. Generalmente en la mayoría de plantas de tratamiento de minerales auríferos, el tiempo de residencia varía en un rango de 50 a 72 horas.

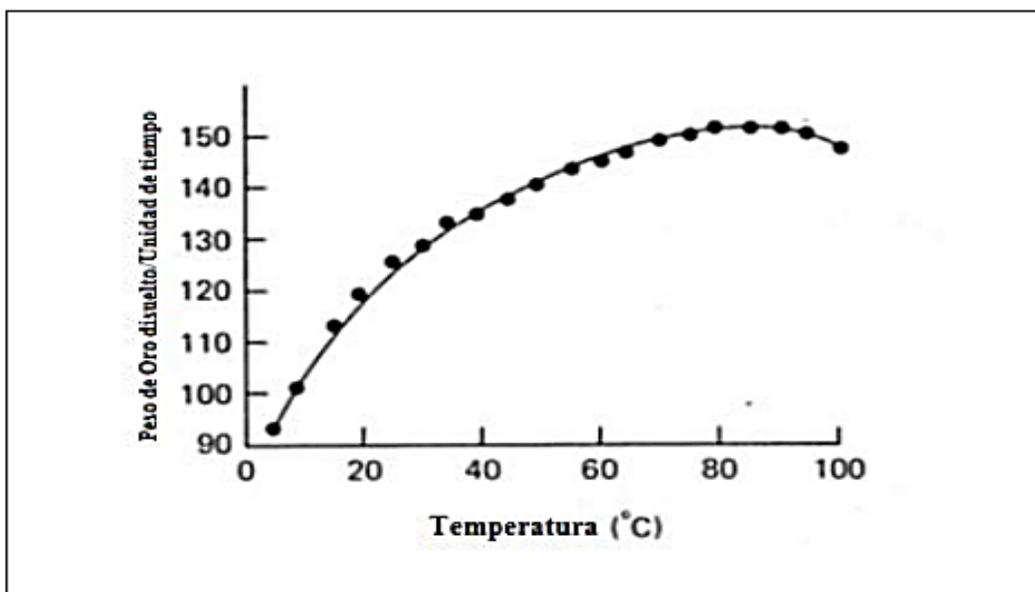
2.2.7.5 Temperatura

En el proceso de cianuración, se ha comprobado que la temperatura juega un papel muy importante, debido a que tiene un fuerte efecto en la disolución del oro, pero el oxígeno disuelto en la solución en general disminuye con el incremento de temperatura. Por lo tanto, es importante mantener parámetros operacionales de temperatura óptima manteniendo un alto grado de disolución de oro y con adecuadas cantidades de oxígeno disuelto.

López (2014) menciona que los trabajos realizados por Julián y Smart con 0.25% de KCN, la solubilidad del oro se incrementa al máximo cuando la temperatura está en 85° C, aunque el contenido de oxígeno a esta temperatura era menor de la mitad que del que tenía a 25° C. Además, descubrieron que a 100° C, la velocidad de disolución del oro era ligeramente inferior a la máxima, aunque la solución no contuviera oxígeno, como lo muestra la figura 10. (pag. 24)

Figura 10:

Efecto de la temperatura en la cantidad de oro extraído



Nota. Efecto de la temperatura sobre la tasa de disolución de oro, con 0.25% NaCN, Valenzuela, J citado por (Yana, 2018)

Por otra parte, Romero (2020) menciona que el incremento de la temperatura hace que se lixivie otros metales indeseables y disminuya la solubilidad de los metales preciosos como el oro y plata, además que resulta desventajoso por el alto costo de operación, por lo que en la mayoría de las plantas de beneficio se opta por trabajar a temperatura ambiente. (pág. 23)

2.2.7.6 Efecto del oxígeno disuelto

El oxígeno es uno de los elementos más importantes para el proceso de lixiviación de oro con cianuro, debido a que influye en la formación del complejo aurocianuro y tiene una disolución directamente proporcional a la presión parcial del oxígeno. “La cantidad de oxígeno presente en la solución se debe principalmente a cuatro factores y son: altitud, temperatura, intensidad de agitación y concentración de cianuro” (García, 2021)

La razón de su importancia incita a introducir oxígeno a la pulpa de lixiviación dinámica, por medio de agitación, inyección forzada tanto de aire u oxígeno puro.

Según López (2020), afirma que: debido a la escasa solubilidad del oxígeno en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 25 ° C se puede tener en solución 8,2 mg O₂/L (0.082 g/L). Por esta razón se dice que la cianuración está controlada por fenómenos de transporte y la velocidad de transferencia de masa del oxígeno; así pues, disminuye, cuando aumenta la densidad de pulpa y baja el tamaño de partícula. El uso de oxígeno o un agente oxidante es esencial para la disolución del oro, bajo condiciones normales de cianuración (pág. 21).

“Para alcanzar la velocidad máxima de disolución del oro, se debe tener una relación de $[CN^-]/[O_2]$ cercana a 6, dichos valores fueron determinados experimentalmente” (Beltrán, 2012). Según la ecuación 2.21. resultado de la ley de Fick.

En algunas plantas de procesamiento de minerales auríferos han utilizado oxígeno puro o agentes oxidantes como, permanganato de potasio, peróxido de sodio, etc., para incrementar la concentración del oxígeno en la solución de donde se ha verificado el incremento de la velocidad de la extracción de oro. Debido a los costos elevados que conllevan la adición de estos reactivos o la instalación de una planta para generar oxígeno, se ha dejado de utilizar ya que presentan algunos inconvenientes al momento de manipular y no son económicamente rentables su aplicación en pequeñas plantas de beneficio.

2.2.7.7 Efecto del tamaño de partícula

La extracción de oro aumenta a medida que se reduce el tamaño del mineral. Cuanto más finas sean las partículas, mayor será la liberación de las partículas valiosas.

Sin embargo, Romero y Flores (2010) menciona que, al decrecer el tamaño de la partícula, implica mayores gastos en molienda y una posible producción de lamas, así como el incremento también de las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar una relación entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro. (pág. 3)

Generalmente en plantas de procesamiento de minerales auríferos se trabaja entre 85% - 90% de - 200 M (74 μ m), para obtener altas extracciones de acuerdo a los reportes de Barsky citado en (Gaviria, Restrepo, & Bustamante, 2007):

Bajo condiciones óptimas de aireación y agitación, se ha determinado que la velocidad máxima de disolución de oro es de 3.25 mg/h. esto es equivalente a una penetración de 1.68 micrones/h en cada lado de una partícula de oro de forma plana, lo que significa una reducción total en espesor de 3.36 micrones/h por el cual la partícula de oro de 45 μ de espesor, no tardaría más de 12 horas para disolverse, y una de 150 μ de espesor no

tardará más de 48 horas para disolverse. La plata metálica de los mismos espesores que el oro, tardara el doble de tiempo en disolverse.

La granulometría usualmente deseada en las plantas CIP es 80% - 200 malla (Lopez, 2014).

2.2.8 Minerales cianicidas o influencia de impurezas en la cianuración

Como menciona Quispe (2020), algunos constituyentes de la mena pueden causar efectos positivos y negativos en las reacciones de cianuración. Elementos como cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, entre otros, consumen cianuro y oxígeno por lo tanto requieren mayor concentración de cianuro para lograr valores aceptables de extracción. La presencia de iones tales como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} en la solución lixivante retarda la cianuración del oro. (Vargas, 1990). Además, las sustancias carbonáceas absorben el oro disuelto causando pérdidas, también el material arcilloso acarrea problemas en la extracción. (pág. 39)

2.2.8.1 Minerales de cobre

Como señala, Morales (2016), la azurita, malaquita, calcosita y cobre metálico, son bastante solubles en cianuro por la presencia de oxígeno e hidroxilos en el mineral. La calcopirita, tetraedrita y crisocola, son atacadas con menos facilidad por el cianuro esto se debe a que contienen minerales con antimonio y arsénico que son consumidores de cianuro. Tal como se muestra en la tabla 1. Estos minerales representan un gran problema debido a la solubilidad en soluciones de cianuración; probablemente debido a que el cobre y los metales preciosos compiten por el cianuro disponible aumentando el consumo de cianuro y disminuyendo la extracción del oro y la plata o requiriendo una mayor cantidad de cianuro en la solución, luego de la cianuración, el cobre es recuperado junto con los metales preciosos en el DORE formado. (pág. 14)

Tabla 1*Solubilidad de minerales de cobre a 23°C con cianuro*

Mineral	Extracción de cobre (%)
Azurita	94.5
Malaquita	90.2
Cuprita	85.5
Crisocola	11.8
Calcosita	90.2
Calcopirita	5.6
Bornita	70.0
Enargita	65.8
Tetraedrita	21.9
Cobre metálico	90

Nota. Porcentaje de extracción de minerales cupríferos en cianuro obtenido de (Morales, 2016)

2.2.8.2 Minerales de hierro

El hierro está en mayor o menor medida en casi todos los minerales que se someten a los procesos que con cianuro. Las soluciones de cianuro tienen una acción mínima en el hierro metálico y en la mayoría de los minerales de hierro por lo que pequeñas plantas de beneficio utilizan el acero para los tanques de agitación. “Los minerales oxidados de hierro como la hematita, limonita, magnetita y siderita no son atacados por las soluciones de cianuro” como lo menciona (Morales, 2016) y los tres minerales de hierro con los que se debe tener más cuidado en la cianuración son: pirita, marcasita y pirrotina. Estos se descomponen en cianuración en el siguiente orden: pirita es el más estable y la pirrotina el menos estable. En la tabla 2 se muestra la solubilidad de minerales de hierro con cianuro.

Tabla 2:*Solubilidad de minerales de hierro con cianuro*

Mineral	Grado de disolución en cianuro
Pirrotita	Rápidamente soluble
Pirita	Moderadamente soluble
Hematita	Insoluble
Magnetita	Insoluble

Nota. Habashi, F Citado en (Morales, 2016)**2.2.8.3 Minerales de zinc**

La acción del cianuro con el zinc es muy lenta por lo que no compite con el oro en la formación de complejos de cianuro. La blenda es atacada por el cianuro con bastante lentitud. El zinc forma complejos cianógenos, en condiciones de pH muy alcalinos el complejo de cianuro de zinc se convertirá en zincato, que libera el ion cianuro que a su vez reaccionará con el oro (Gomez & Morales, 2012).

2.2.8.4 Minerales de arsénico y antimonio

Los minerales de arsénico y antimonio son descompuestos por el cianuro rápidamente e impiden la disolución del oro, estos involucran reacciones similares a los de los sulfuros. Según (Morales, 2016) “la arsenopirita (FeAsS) generalmente se oxida muy despacio en solución aireada de cianuro y tiene muy poco efecto desfavorable sobre la lixiviación del oro”. La antimonita (Sb_2S_3) impide fuertemente la cianuración. Una propuesta para reducir el efecto de estos minerales es la tostación parcial o total de los minerales nocivos; la tostación solo se justifica cuando los valores de oro y plata extraídos son altos.

2.2.8.5 Minerales asociados con teluros

Los teluros como la calaverita ($AuTe_2$) y la silvanita ($AuAgTe_4$) tienen lenta disolución por el cianuro, más si la molienda es muy fina para obtener la máxima extracción, (Vargas, 1990) citado por (Morales, 2016) indica que “una alta alcalinidad y aireación incrementan la descomposición de los teluros”.

2.2.9 Lixiviación del oro mediante proceso PAL (Lixiviación ayudado por peróxido de hidrógeno)

El sistema de lixiviación ayudado por peróxido de hidrógeno, (PAL), utiliza un poderoso oxidante en el proceso de la cianuración, haciendo que se evite una reacción entre el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el cianuro. La aplicación y disponibilidad de H_2O_2 en la cianuración, incrementa altamente la velocidad de la cinética de la extracción y lleva a un aumento en la extracción de oro y disminución en los tiempos de cianuración; además, del uso de un poderoso oxidante en cianuración, reduce el consumo de cianuro de sodio por reducción del tiempo de lixiviación, ayuda a predisponer pérdidas de cianuro por volatilización de ácido cianhídrico y forma películas en los minerales de sulfuro, pasivándolos por ser consumidores de cianuro.

Misari (2012) menciona que, el campo de aplicación principal del sistema PAL es el tratamiento de menas sulfuradas que son altamente consumidores de cianuro y oxígeno, en contraste con la aplicación de un sistema de aireación convencional. El proceso de lixiviación ayudada por peróxido de hidrógeno es muy eficiente y económica en este tipo de minerales, siendo resultados de investigaciones el incremento de la recuperación de oro entre 5% y 20% y con una significativa reducción del consumo de cianuro hasta del 50%. El uso del oxidante poco accesible como el H_2O_2 es usualmente justificado económicamente (pág.550).

Con la creciente explotación de minerales auríferos a pequeña escala, son explotados menas oxidadas y con la demanda seguir tratando minerales auríferos se continuarán minando minerales sulfurado que contienen oro, por lo que se estima la aplicación del peróxido de hidrógeno en los procesos de cianuración para maximizar la reducción de costes operativos.

Durante más de 100 años, el problema del aprovisionamiento de oxígeno en la pulpa permaneció sin solución. Sin embargo, a medida que la tecnología de extracción de oro se fue volviendo más

científica, surgieron nuevos intentos para aumentar la cantidad de oxígeno disuelto en la pulpa. Reconociendo su importancia como oxidante en la cianuración, se comenzaron a emplear técnicas avanzadas de dispersión de gas, como la inducción de aire por compresión, el uso de oxígeno puro y, más recientemente, la adición de peróxido de hidrógeno.

Según Marchese, 2003 (citado en Morales, 2016) indica que para evitar reacciones colaterales, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- a) El (H_2O_2) se diluirá antes de agregar a la pulpa.
- b) El dosaje de H_2O_2 debe ser regulado en base al nivel de oxígeno en la pulpa.
- c) Una parte importante del control es un electrodo especial de oxígeno, resistente a la abrasión de la pulpa.

La mayoría de las plantas de tratamiento de minerales auríferos son diseñadas para tiempos de lixiviación prolongados debido a que la cinética de lixiviación se considera lenta.

En palabras de Misari (2012); si el tiempo de retención con que se cuenta en una planta es suficientemente largo para asegurar la disolución de todo el oro y/o plata accesible al cianuro, PAL no puede incrementar más la extracción; sin embargo, en beneficio la reducción del tiempo de retención aminora el consumo de cianuro. (pág. 554)

El peróxido de hidrógeno se aplica a plantas de procesamiento de minerales auríferos con tiempos de lixiviación muy cortos, para recuperar la mayor cantidad de oro y plata posible que ingresa al proceso y por ende los valores en la pulpa que descarga al relave deben ser mínimas. A un principio la planta pudo haber sido diseñado para tratar minerales oxidados o con bajo contenido de minerales sulfurados. Las condiciones de lixiviación cambian cuando el yacimiento que se está explotando cambia de la zona de minerales oxidados a sulfuros primarios.

Para poder extraer el oro y plata lixiviable de los minerales sulfurados con cianuro en el tiempo de residencia que tiene la planta originalmente, se da como alternativa la aplicación del peróxido de hidrógeno.

La principal ventaja del peróxido de hidrógeno es su aceptabilidad medioambiental, normalmente se encuentra disponible en concentraciones de 35 % a 70 % de H_2O_2 en agua, que se puede transportar y almacenar con seguridad en tanques especialmente contruidos o en carros cisterna.

Las presentaciones de soluciones de H_2O_2 tienen estabilizadores que, en un año, la descomposición solo se reduce 1% de pérdida de oxígeno por año de almacenamiento adecuadas para este oxidante potencial. Sin embargo, no se evita en ciertas soluciones de procesos hidrometalúrgicos, la descomposición de estas usualmente a temperaturas elevadas por lo que quienes trabajen con estas soluciones con tiempos de almacenamiento prolongados deben emplear técnicas de adiconamiento adecuadas así utilizando el oxígeno disponible en el peróxido de hidrógeno para maximizar su uso. Monhemius, 1992 (citada en Forja, 2018, pag. 38).

2.2.9.1 Propiedades físicas, químicas del peróxido de hidrogeno

2.2.9.1.1 Propiedades físicas

Solvay Chemicals, (2019) en su hoja de datos técnicos del peróxido de hidrogeno, menciona que:

El peróxido de hidrógeno es un líquido más denso que el agua, pero es soluble en el agua en todas las proporciones. Las soluciones acuosas del peróxido de hidrógeno se parecen al agua, pero tienen un olor picante, débil. Es un líquido no combustible, pero el calor y el oxígeno liberados durante la descomposición pueden inflamar los materiales combustibles. (pág. 3).

En la tabla 3 se muestra las características físicas del peróxido de hidrógeno

Tabla 3:*Descripción de las características físicas del peróxido de hidrogeno*

Descripción	Valores	Concentración de H ₂ O ₂		
		35 %	50 %	70 %
Oxígeno activo, por peso		16.5	23.50	32.9
Punto de congelación	°C	-33	-52	-40
Punto de ebullición	° C, 760 mm HG	108	114	125
Densidad	g/mL, 20 °C	1.13	1.20	1.29
	lbs/gal a 20 ° C	9.44	9.98	10.75
Viscosidad	cP, 20 ° C	1.11	1.17	1.24
Presión de vapor total	M Hg, 20 ° C	12.9	10.10	6.90
Calor de descomposición	K cal/mol H ₂ O ₂ , 25 °C	22.7	22.80	23.40
Btu/LB solución	A 25 ° C	420	603	852
Relación de concentración /volumen	A 0 °C, 760 mm Hg	130	198	300
Relación de volumen/expansión		700	1300	2500

Nota: Características físicas de peróxido de hidrógeno obtenido de Solvay (2019)**2.2.9.1.2 Propiedades químicas.**

El peróxido de hidrogeno actúa principalmente como agente oxidante para una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos. Por otro lado, al usar el peróxido de hidrogeno con oxidantes más fuertes, actúa como agente reductor; como la reducción de los permanganatos al estado manganoso. La descomposición del peróxido de hidrogeno da lugar a agua más oxígeno a través de una reacción de reducción

Según los datos técnicos del peróxido de hidrogeno descrito por Solvay Chemicals, (2019)

Es importante que las mezclas de sustancias orgánicas de peróxido de hidrógeno se traten con precaución extrema. La química compleja de tales reacciones requiere un estudio exhaustivo de los peligros potenciales de seguridad. (pág. 2)



Teniendo en cuenta la investigación de Guillen Puma (2019), rescatamos lo siguiente:

El índice de descomposición aumenta con la temperatura, incrementándose en un factor de 2,3 por cada 10°C de aumento. La tasa de descomposición estándar del peróxido comercial es notablemente baja, con una disminución inferior al 1% anual. No obstante, el proceso de degradación puede acelerarse dentro de la instalación industrial por la presencia de cantidades mínimas (menos 45 de 1 ppm) de impurezas solubles, o por la interacción con superficies inadecuadas (como acero dulce, cobre y bronce). Los iones metálicos con diferentes estados de oxidación sirven como catalizadores para la descomposición homogénea del peróxido de hidrógeno. Además de éstos, también existen catalizadores orgánicos solubles, siendo la catalasa el más conocido. La catalasa, una enzima presente en varios organismos vivos, acelera la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. (pag.45-46).

2.2.9.2 Uso del peróxido de hidrogeno.

El peróxido de hidrogeno tiene una gran variedad de uso en las diferentes industrias: textil, agricultura, minería, farmacéutica, etc. Según la empresa Sydney 2000, (2018) en su hoja técnica del peróxido de hidrogeno, menciona que:

El peróxido de hidrógeno puede actuar como oxidante (en pHs alcalinos) y como reductor (en pHs ácidos). Se emplea en la mayoría de los casos como oxidante y como blanqueador en la industria textil, en lavanderías de pantalones de mezclilla, de celulosa y papel, en el destintado de papel periódico, en cosméticos, síntesis orgánicas, tratamientos de aguas residuales industriales, fabricación de productos químicos y como agente anticloro para la neutralización del mismo.

En la industria de la minería puede usarse como oxidante de muchos iones metálicos, en el procesamiento del Oro y la Plata, en la recuperación de Uranio, en la eliminación del Vanadio, Molibdeno y Sodio por lixiviación in situ. Separación por flotación del Cobre/Molibdeno, lixiviación del cobre, purificación de la roca fosfórica.

Se puede usar en tratamiento de agua residuales industriales para reducir contaminantes como: Cloro, cianuro, fenol, Acido Sulfídrico, Sulfuros, Mercaptanos, DQO, DBO, compuestos de azufre (SOx) y compuestos Nitrogenados (NOx). Así mismo en el blanqueo de diferentes. (pág. 2)

2.2.10 Cinética de la extracción de oro

La cinética de la extracción de oro depende de la concentración de oxígeno disuelto, en la solución lixiviada, como se vio anteriormente. Sin embargo, no se observa la dependencia de la concentración del oxígeno cuando se añade peróxido de hidrógeno en la lixiviación por cianuro.

Una aplicación del proceso PAL evaluando al mismo nivel que el oxígeno en una lixiviación por cianuración convencional nos muestra la cinética de extracción más acelerada. El aumento de la velocidad es causado por la presencia de H₂O₂ probablemente, así como del oxígeno disuelto. Entonces se podría formular la reacción de cianuración asumiendo que el H₂O₂ se origina como un producto intermedio y que luego de su formación reacciona directamente como oxidante, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



De estas dos reacciones, la primera, que emplea oxígeno como oxidante, es notablemente más lenta que la segunda, en la que se utiliza peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Mientras que en el proceso de lixiviación con peróxido de hidrógeno, la concentración de peróxido se incrementa directamente, en la

cianuración convencional, el peróxido debe formarse durante el proceso. En la figura 11 se observa que en un tiempo de 50 horas llega a la máxima extracción usando peróxido de hidrógeno mientras en una cianuración convencional se necesita 160 horas para llegar a una extracción del 95%.

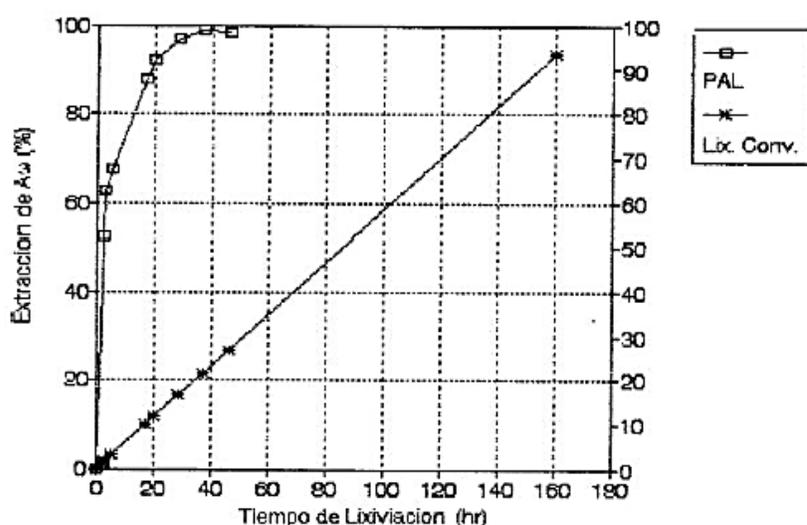
El oxígeno se forma cuando el peróxido de hidrógeno se descompone en agua y oxígeno en solución, así como sigue:



El oxígeno producido durante la descomposición del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se disuelve de manera significativa en la fase líquida. Este oxígeno se distribuye de manera homogénea en la zona de lixiviación, lo que mejora las características de transferencia de masa en comparación con la aireación convencional y con un exceso se cree que “altas concentraciones de oxígeno disuelto pueden causar pasivación de la superficie oro-plata debido a una formación de capa de óxido” Cathro, 1963 (citado en Forja, 2018).

Figura 11:

Comparación de la extracción de oro utilizando cianuración convencional y cianuración con adición de peróxido de hidrógeno



Nota. La aceleración de la cinética de extracción de oro reduce el tiempo de residencia a 25 %, comparado al proceso convencional, (Misari, 2012).

2.2.11 H₂O₂ en la disolución de oro en solución de cianuro

El proceso electroquímico de la disolución con peróxido de hidrógeno no es fácil como se puede inducir, a pesar de la reacción.



Cuya condición de equilibrio es:

$$E = 1,776 - 0,0591 \text{ pH} + 0,0295 \log (\text{H}_2\text{O}_2) \quad (2.27)$$

Las condiciones de equilibrio permiten establecer las circunstancias de equilibrio de la disolución de agua oxigenada.

En ese sentido Guillen (2019), afirma que las disoluciones de agua oxigenada siempre son termodinámicamente inestables a 25°C cualquiera que sea el pH y el potencial. En la región comprendida entre las 2 familias de líneas que acabamos de considerar, el agua oxigenada es doblemente inestable; tenderá entonces a reducirse a agua, según la reacción. (pág. 90).



Y al oxidarse a O₂ según la reacción:



Es decir, a descomponerse en agua y oxígeno según.



El peróxido de hidrógeno “se descompone en forma espontánea en agua y oxígeno sobre una superficie metálica, esta superficie debe presentar necesariamente un potencial cuyo punto representativo se sitúe en la región de doble inestabilidad.” (Guillen, 2019)

2.2.12 Importancia del uso del H_2O_2 en la cianuración

Como se ha conocido anteriormente el principio de la cianuración se apoya en la teoría de aplicar el cianuro como agente lixivante y producir iones complejos de cianuro de oro y plata son solubles en agua

La formación de los complejos solubles se da a través de la reacción de oxidación, donde la disolución de oro y plata está relacionada directamente a la concentración de oxígeno disuelto en la pulpa.

Generalmente los problemas en el proceso de cianuración se dan por las siguientes razones:

- No se llega a producir la cantidad de oxígeno requerido a través de las técnicas de aireación, puesto que es complicado la transferencia de O_2 de la fase gaseosa a la fase líquida. Generalmente el problema es frecuente en pulpas que presentan alta viscosidad, incluso la aireación violenta solo produce bajas concentraciones de oxígeno disuelto en la pulpa.
- Que no se cuente con la mayor cantidad de oxígeno disuelto en la fase inicial del proceso de lixiviación para obtener valores altos en la disolución del oro y plata. Por lo tanto, es importante elevar el nivel de saturación de oxígeno disuelto al inicio del proceso.

“La introducción del oxidante en forma líquida garantiza la distribución homogénea de O_2 en la pulpa. El H_2O_2 cumple esta función de una manera mucho más eficaz que la aireación convencional”
(Aroquipa, 2019)

2.2.13 Ventajas y desventajas con la aplicación de peróxido de hidrógeno

Las ventajas que tiene el peróxido de hidrogeno en la cianuración son:

- Una cinética de lixiviación mejorada.
- Se logra una mayor recuperación de oro al extraer la totalidad del oro que es accesible al cianuro.

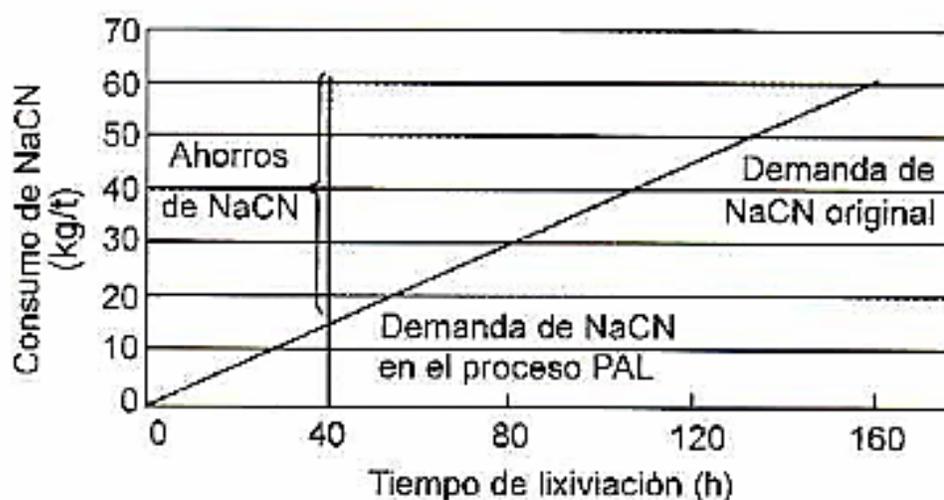
- El ahorro en el consumo de cianuro se ha logrado mediante la implementación de medidas de eficiencia en el proceso.
- La reducción del costo de operación es un factor clave a considerar.

2.2.13.1 Reducción en el tiempo de residencia

Una excelente aplicación del proceso de lixiviación ayudada por peróxido de hidrógeno lleva a una reducción significativa del tiempo de lixiviación necesario para extraer el metal de interés accesible al cianuro. La reducción del tiempo de lixiviación disminuye la cantidad de cianuro consumido en varias reacciones paralelas, las cuales no están relacionadas a la disolución de oro. Por ejemplo, como lo cita (Pelaez & Rodriguez, 2012). En la aplicación en una mina de Norteamérica, el tiempo de lixiviación fue reducido a 25% del tiempo de retención original, resultando en un ahorro de 75% del consumo de cianuro expresado en kg/TM, tal como se observa en la figura 12, donde se muestra que de un consumo de 60 kg/TM en una cianuración convencional solo se utilizó 15 kg/TM cuando se aplicó el proceso PAL.

Figura 12:

Comparación del consumo de cianuro de sodio en la cianuración convencional y con adición de peróxido de hidrógeno.



Nota: Ahorro de cianuro en tiempos de operación con cianuración convencional y con PAL (Misari, 2012, pág. 553)

2.2.13.2 Prevención de pérdida de cianuro por volatilización

Según lo afirmado por Aroquipa (2019), durante todos los procesos de cianuración siempre se pierde algo de cianuro por volatilización de HCN, por el equilibrio de iones CN^- y ácido cianhídrico (HCN), que es un gas disuelto. La pérdida de cianuro depende del pH y la intensidad de la aireación tal como se ha mostrado en las variables de cianuración. A pH menor, alto porcentaje de cianuro se presenta como HCN (50% con pH 9,4 y 20% con pH 10), estas se pueden desprender por aireación, al aumentar el pH el equilibrio va en favor de los iones CN^- y la pérdida de cianuro se reduce. En combinación al pH, la intensidad de la aireación es un factor principal para evitar la pérdida de cianuro. (pág. 16)

Durante el proceso de cianuración por agitación, el H_2O_2 líquido es adicionado como oxidante y no requiere más aireación, evitando así la pérdida de cianuro por volatilización.

2.2.13.3 Pasivación de sulfuros que consumen cianuro

Según Misari (2012) los minerales de sulfuro, como se mostró anteriormente, en especial la pirrotita y arsenopirita tienen una predisposición a consumir alta cantidad de cianuro, teniendo como producto al tiocianato (SCN^-). Con la aplicación del proceso PAL, el fuerte poder oxidante de H_2O_2 la superficie de mineral que contiene azufre queda pasivada. Esto es probado por la reducción simultánea de cianuro consumido y de SCN^- formado. (pág. 553)

En palabras de Peláez y Rodríguez (2012) los ahorros de cianuro se mostraron en trabajos de una mina en el Norte de Ontario, en la que se utilizó el proceso PAL, mostrando que el consumo de cianuro en los tanques de agitación era menor y por lo que las colas tenían elevado contenido de cianuro, de esta forma se realizaron ajuste en

la adición de cianuro, en cianuración convencional de 0.55 g/TM al usar 0.25g/TM, conduciendo un ahorro del 50% en el consumo de cianuro. (pág. 34).

El peróxido de hidrogeno presenta algunas desventajas, principalmente al momento de la manipulación, pues al ser un potente oxidante, el manejo o uso indebido del reactivo puede crear peligros potenciales. En Solvay Chemicals, (2019) menciona los riesgos al momento de realizar la manipulación de peróxido de hidrogeno.

- Las soluciones de peróxido de hidrógeno en contacto con los ojos pueden causar lesiones severas hasta la ceguera.
- El peróxido de hidrógeno puede irritar y causar quemaduras químicas y/o térmicas en la piel.
- El ingerir puede ser fatal.
- La descomposición del peróxido de hidrógeno genera calor y gases que pueden aumentar de presión, pudiendo ocasionar el estallido de aquellos recipientes que no cuenten con una ventilación adecuada.
- La descomposición del peróxido de hidrógeno puede generar suficiente calor y oxígeno para iniciar la combustión de materiales inflamables.
- El enriquecimiento con oxígeno de los vapores de hidrocarburos resultantes de la descomposición del peróxido de hidrógeno puede ocasionar explosiones en la etapa de vaporización.
- El peróxido de hidrógeno puede formar mezclas explosivas con algunas sustancias orgánicas. (pág. 1)

Para poder realizar un mejor control de la adición del peróxido de hidrogeno en la cianuración, se requiere equipos para medir la cantidad de oxígeno presente en la pulpa. El exceso de oxígeno en la pulpa, tiende a oxidar al cianuro libre, formando así cianatos.

Por otra parte, el costo del peróxido de hidrogeno hace que el uso a nivel planta no sea económicamente viable, a pesar que tiene ventajas en la extracción del oro. es rentable cuando el mineral es de alta ley.

2.2.14 Diseño experimental

Un experimento puede definirse como una o en una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para después observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (Montgomery, 2017).

2.2.14.1 Definiciones conceptuales del diseño experimental

Según Huaco (2017) se definen algunos conceptos básicos para el diseño experimental.

Experimento Es una prueba que en base a un procedimiento busca comprobar empíricamente una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno. En un experimento se manipulan deliberadamente ciertas variables para poder determinar el efecto que tiene cada una de ellas sobre la variable respuesta del fenómeno en estudio.

Unidad experimental Es el elemento en estudio (objetos, seres vivos, procesos, fenómenos, etc.) al que se le modifican de forma planeada los niveles de ciertos factores para determinar la influencia que estos tienen sobre la variable respuesta.

Variable Es un parámetro en un proceso o fenómeno que puede más de un valor durante el rango de validez del modelo.

-Variables dependientes: (y_i)

-Variables intermedias: (w_i)

-Variables independientes:

Factor: Son las variables dependientes, las cuales pueden influir en la variable respuesta; estas pueden ser cualitativas (cambios en el equipo, métodos, material a utilizar, etc.) o cuantitativas (temperatura, concentración del reactivo, tiempo, etc.)

Nivel: Son los diferentes valores que toman los factores o variables en estudio.

Efecto: Es la influencia de las variables independientes sobre la variable respuesta.

Interacción: Es el efecto producido por dos factores o más sobre la variable respuesta; el cual es diferente a los efectos producidos por aquellos factores de manera individual.

Replica: Repetición de una corrida experimental con la misma configuración de factores y sus niveles.

Corrida experimental: Combinación de los niveles de cada factor con la que se miden las respuestas.

Niveles de un factor. Son los distintos valores asignados a un factor en un experimento, es decir el grado de intensidad de un factor.

Respuesta. Es el resultado numérico de una experiencia, que viene a ser la variable dependiente.

Efecto de un factor. Es la variación en la respuesta, producida por un cambio en el nivel del factor, en dos niveles solamente; el efecto, es simplemente la diferencia entre el promedio de las respuestas de todas las experiencias en el nivel superior menos el promedio en el nivel inferior.

Interacción. Es la respuesta diferencial a un factor en combinación en niveles variables de un segundo factor aplicado simultáneamente; la interacción es el efecto adicional o conjunto, debido a la influencia combinada de dos o más factores.

Unidad experimental. Es la unidad básica sobre la cual se aplica un tratamiento dado o combinación de tratamientos. (pág. 15-17)

2.2.14.2 Diseño factorial

En cuanto al diseño factorial es la forma más adecuada para estudiar experimentos que incluyen varios factores para realizar pruebas de un proceso por que muestra una secuencia de pasos a seguir estudiando el efecto de un conjunto de factores sobre una respuesta para hallar el número de pruebas a realizar, permitiendo determinar datos que estadísticamente analizados se obtienen conclusiones certeras de los problemas estudiados, así tomando decisiones correctas.

Diseños de experimentos factoriales 2^k

Estudia el efecto de los factores en dos niveles, que busca estudiar la relación entre los factores y las respuestas que consta de 2^k tratamientos o puntos de diseño. Ya que proporciona el número de ensayo a realizar por lo que el número de experimentos a realizar este definido por la siguiente relación:

$$N = 2^k \quad (2.31)$$

Donde:

N: número de experimentos

K: número de factores a estudiar

Diseño Factorial 2²

Con un diseño factorial 2² se estudia el efecto de dos factores considerando dos niveles en cada uno. Cada replica de este diseño consiste 2x2=4 combinaciones o tratamientos que se pueden denotar de diferentes maneras, como se muestra en la tabla 4 (Prieto, 2020).

Tabla 4

Distintas maneras de escribir los tratamientos del diseño 2²

	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	Notacion de Yates
Trat. 1	bajo	bajo	A ₁	B ₁	A ⁻	B ⁻	-	-	0	0	-1	-1	(1)
Trat.2	alto	bajo	A ₂	B ₁	A ⁺	B ⁻	+	-	1	0	1	-1	a
Trat. 3	bajo	alto	A ₁	B ₂	A ⁻	B ⁺	-	+	0	1	-1	1	b
Trat. 4	alto	alto	A ₂	B ₂	A ⁺	B ⁺	+	+	1	1	1	1	ab

Nota: (Gutiérrez Pulido, 2008)

2.3 Definiciones conceptuales

Lixiviación: El proceso de lixiviación es la etapa fundamental en un proceso hidrometalúrgico, que involucra la disolución del metal a recuperar desde una materia prima sólida en una solución acuosa, mediante la acción de agentes químicos. Esta transferencia del metal hacia la fase acuosa, permite la separación del metal contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles. Chahuayo y Márquez (2012).

Cianuración de oro: Es un proceso de extracción de oro de minerales en el que se utiliza cianuro como agente lixivante para disolver el oro en una solución de cianuro. Este método es ampliamente utilizado en la metalurgia del oro debido a su eficacia para disolver el oro y permitir su posterior recuperación a través de otros procesos. Mardens y House (1993).

Cianuración por agitación: Es un método de extracción de oro y plata de minerales triturados, utilizando una solución de cianuro de sodio. En este proceso, los minerales son mezclados con la solución de cianuro en tanques (reactores), donde son agitados constantemente para asegurar la buena mezcla y reacción entre el cianuro y el oro. La cianuración por agitación es un método muy eficiente y ampliamente utilizado en la industria metalúrgica, ya que permite la extracción de oro y plata en condiciones más controladas y eficientes que otros métodos de extracción. Morales Mulluni, D. C. (2018).

Reducción del tiempo de cianuración: Al reducir el tiempo de cianuración usando el peróxido de hidrógeno, se busca disolver el metal precioso de manera más rápida y eficiente, lo que puede tener ventajas económicas y operativas en la extracción de metales preciosos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de peróxido de hidrógeno también conlleva ciertos riesgos y consideraciones de seguridad debido a su alta reactividad y posibles efectos tóxicos. Huapaya et al. (2022).

Oxidación con peróxido de hidrógeno: Es un proceso químico en el que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se utiliza como agente oxidante para causar la oxidación de sustancias orgánicas e inorgánicas. En presencia de un catalizador, el peróxido de hidrógeno puede liberar oxígeno molecular, lo que puede resultar en la oxidación de compuestos orgánicos y la degradación de sustancias no deseadas. Este proceso es utilizado en diversas aplicaciones, incluyendo tratamiento de aguas residuales, blanqueo de papel, descontaminación de suelos, entre otros. Se usa también en procesos metalúrgicos para mejorar la extracción de metales de minerales refractarios. Arreghini, M. (2020).

Concentración de peróxido de hidrógeno: Se refiere a la cantidad de peróxido de hidrógeno presente en una solución en relación con el volumen o la masa total de la solución. La concentración se puede expresar de diferentes maneras, como porcentaje en peso, porcentaje en volumen, molaridad o normalidad. Por lo general, se utiliza como agente blanqueador, desinfectante y oxidante en diversos campos, como la industria, la medicina y la limpieza. Mederos et al. (2020).

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 General

La extracción de oro se incrementa con el uso de peróxido de hidrogeno como agente oxidante en el proceso de cianuración por agitación de oro contenido en minerales sulfurados en la Planta de Beneficio Españolita SAC.

3.1.2 Específicas

HE1 El peróxido de hidrógeno incrementa la extracción de oro contenido en los minerales sulfurados por el método de cianuración por agitación.

HE2 El tiempo de cianuración tiene un efecto significativo en la recuperación de oro cuando se adiciona peróxido de hidrógeno, en la extracción de oro de minerales sulfurados.

3.2 Variables

3.2.1 Dependiente

- Porcentaje de extracción de oro en minerales sulfurados

3.2.2 Independientes

- Concentración de peróxido de hidrógeno
- Tiempo de cianuración

3.2.3 Intervinientes

- Velocidad de agitación
- Tamaño de partícula

- Temperatura
- pH

3.3 Operacionalización de variables e indicadores

Tabla 5:

Operacionalización de variables e indicadores

VARIABLE	VARIABLE NOMINAL	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	RANGO	UNIDAD	TÉCNICAS DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO
DEPENDIENTE	Porcentaje de extracción de oro en minerales sulfurados	Cantidad del oro extraído del mineral de cabeza.	Cuantificar porcentualmente el oro extraído mediante balances metalúrgicos obtenidos en el proceso de lixiviación	Porcentaje oro presente en la solución de cianuración	50 - 75	%	Análisis químico y cálculos matemáticos	Análisis químico de laboratorio
INDEPENDIENTE	Concentración de peróxido de hidrógeno.	Porcentaje de solución altamente oxidante en la solución.	Es la cantidad H ₂ O ₂ en volumen presente en la solución cianurada.	Contenido de H ₂ O ₂ en solución	3 - 8	mL	Dosificación según concentración y volumen de pulpa en una probeta.	Probeta graduada de 10 mL
	Tiempo de lixiviación.	Tiempo total durante el cual el mineral valioso permanece en contacto con la solución lixivante.	Se controla experimentalmente a razón de la tasa de extracción del oro en función al tiempo de reacción en horas.	Tiempo	50 - 72	horas	Intervalos de tiempo establecidos para analizar la extracción de oro	Cronometro

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Ámbito del estudio:

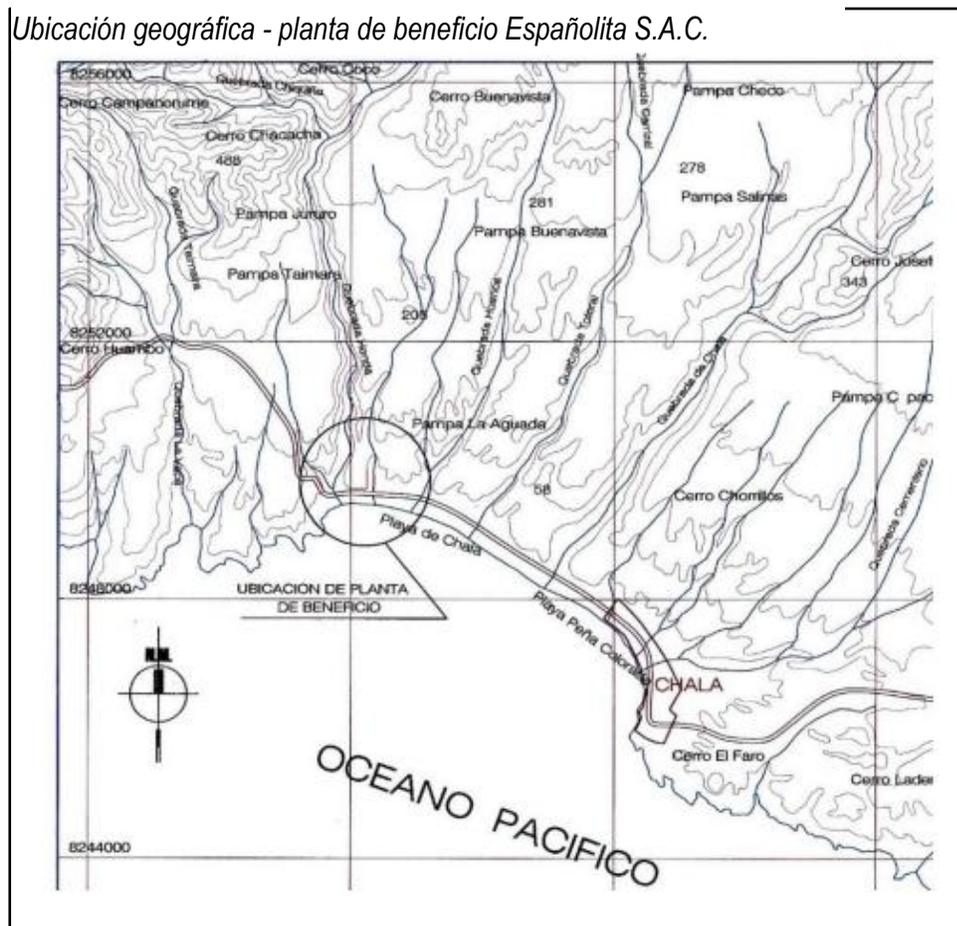
El presente trabajo de investigación se realizó en la empresa Minera Española del Sur S.A.C.

4.2 Localización política y geográfica

La Planta de Beneficio Española S.A.C. se ubica en pampa La Aguada en el distrito de Chala, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa. Está situada en la quebrada Huanca, en una zona desértica y deshabitada de propiedad estatal en la región hidrográfica del Pacífico. Ver figura 13.

Figura 13:

Ubicación geográfica - planta de beneficio Española S.A.C.



Nota. Obtenido de Metalúrgica Contec MGM S.A.C.

4.3 Vías de acceso

El acceso desde la ciudad del Cusco se puede realizar por vía aérea o terrestre hasta la ciudad de Arequipa, desde allí se parte en la dirección Norte por la panamericana Sur, pasando por Camaná, Ocoña, Ático hasta llegar a Chala con un recorrido de 396 km desde Arequipa. Desde Chala hacia la planta es de aproximadamente 15 minutos. En la tabla 6 se detalla las vías de acceso terrestre.

Tabla 6:

Vías de acceso a la planta de beneficio españolita del Perú SAC

Tramo	Vía de comunicación	Distancia (km)	Tiempo (Hr)
Cusco – Arequipa	Carretera asfaltada	512	9
Arequipa – Chala	Carretera asfaltada	396	7
Chala – Aguadita	Carretera asfaltada	2.5	0.16
Aguadita – Chala	Trocha - carrozable	1	0.083
Total		911.5	16.243

4.4 Caracterización mineralógica

La muestra que se usó para las pruebas metalúrgicas, tiene la siguiente caracterización que se muestra en la tabla 7:

Tabla 7

Caracterización del mineral a estudiar

Mineral valor económico	Porcentaje
Pirita micro granular	2%
Pirita octagonal	0.5%
Arsenopirita	3%
Magnetita	0.4%
Galena	0.6%
Material de ganga	Porcentaje
Cuarzo hialino	0.5%
Cuarzo lechoso	1%
Jarosita	0.5%
Goethita	0.5%
Hematita	0.5
Plagioclasa	0,5

Nota: la tabla 7, fue obtenida de la caracterización mineralógica mostrada en el anexo 6, a través de microscopio digital CMOS. En la que se observa el oro en estado nativo presente y acompañado de minerales de: pirita micro granular, arsenopirita cuarzo hialino y lechoso entre otros que se detallan.

4.5 Diseño de la investigación: método, tipo y nivel

4.5.1 Método de investigación

El presente trabajo tiene un enfoque cuantitativo y que las pruebas experimentales se realizan de acuerdo al diseño factorial 2^2 , con 4 pruebas directas, 1 réplica por cada punto y un punto central. Para la interpretación de datos se usará software minitab.

4.5.2 Tipo de investigación

4.5.2.1 Explicativo

Es porque explica la causa de las variables, concentración de cianuro, tiempo de lixiviación, concentración de peróxido de hidrógeno para la extracción del oro.

4.5.2.2 Descriptivo

Describir todo el proceso de cianuración con aplicación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante, como también describe el procedimiento de las pruebas metalúrgicas.

4.5.2.3 Correlacional

Se establece la correlación que existe de las variables independientes en relación a la variable dependiente.

4.5.3 Diseño metodológico experimental

Se emplea el diseño experimental 2^2 con una réplica en cada punto una central, que consiste en manipular una o más variables que se consideran independientes, con el objetivo de observar los efectos de los cambios sobre una o más variables dependientes.

Para el caso de la presente investigación se evalúa el efecto del peróxido de hidrógeno en la extracción de oro en la cianuración por agitación.

4.5.4 Alcance de la investigación

La investigación es de carácter explicativo, tal como menciona Hernández, Fernández y Baptista, (2014).

El nivel explicativo se refiere a que van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales, se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas (pág. 95).

Con los resultados obtenidos se podrá explicar el efecto del peróxido de hidrógeno en la extracción del oro en la cianuración por agitación.

4.5.5 Alcances y limitaciones de la investigación

4.5.5.1 Alcances

El presente estudio es con el propósito de incrementar la extracción de oro con peróxido de hidrógeno como agente oxidante de minerales sulfurados de presentan baja extracción por el proceso de cianuración convencional.

4.6 Población y muestra

4.6.1 Población

La población de estudio es el compósito de 118290 kg minerales auríferos sulfurados de la planta de Benefico Españolita S.A.C., Chala – Arequipa, que se encuentran en la cancha de minerales con tamaño menor a ½ pulgada proveniente del área de chancado. Al ser una planta de acopio, los minerales

proviene de diferentes partes del Perú como Pacoya, Caraveli, Colquamarca, Calpa, etc., principalmente presentan cuarzo en mayor proporción.

4.6.2 Muestra

La muestra La población de muestra de estudio está formada 80 kg de mineral sulfuro procedente de cancha de minerales, la técnica de muestreo aplicado es probabilístico por conveniencia, tomando de cada lote un promedio de 6.6 kilos aproximadamente. aprovechando el momento del muestreo del lote para obtener una muestra representativa. El compuesto estará formado por muestras de 12 lotes, las cuales son homogenizadas para obtener una muestra representativa de 30 Kg para todas las pruebas experimentales.

4.7 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.7.1 Técnica de muestreo

La obtención de la muestra es aleatorio simple y para obtener la cantidad de muestra necesaria se realizará por cuarteo en conos hasta obtener los 30 kilogramos que se requiere.

4.7.2 Herramienta de muestreo

En la cancha de recepción de minerales se utiliza como herramientas de muestreo la pala y crucetas para el cuarteo, por el cual se utiliza las mismas herramientas para la toma de muestras.

4.7.3 Instrumento de recolección de datos

- Una Laptop
- Libros, revistas de investigación, páginas web confiables que nos fueron de guía para la correcta recolección de los datos para las pruebas experimentales.
- Trabajo y observación directa de campo.
- Cronómetro y otros instrumentos de medida.

4.7.4 Métodos de ensayos de laboratorio

El número de pruebas que se corre está en función a la matriz que se elaboró con el diseño factorial, considerando las variables de estudio y los rangos de operación de cada variable. Las pruebas se desarrollaron en las instalaciones del laboratorio metalúrgico de la planta de beneficio Españolita.

La realización de las pruebas seguido el procedimiento detallada y cuidadosamente para que los resultados expresen el propósito de la presente investigación.

4.8 Plan de análisis de datos y diseño experimental

Para el análisis de los datos se ha utilizará el Microsoft Excel 2013, para determinar la data de extracción y la construcción de las gráficas correspondientes, a fin de correlacionar los datos, y obtener la influencia de las variables en estudio sobre la extracción de oro: tiempo de lixiviación y concentración de peróxido de hidrógeno.

4.9 Procedimiento experimental

4.9.1 Materiales de laboratorio y equipos

4.9.1.1 Materiales

- Mineral sulfurado 90% -200 Malla
- Recipiente de plástico
- Agua destilada
- Vaso de precipitado
- Botellas de plástico
- Pipeta
- Espátula

- Papel filtro
- Embudo
- Bandejas de metal
- Malla 200 de la serie ASTM
- Bureta
- Agua destilada
- Gotero
- Bolsa plástica

4.9.1.2 Equipos

- ✓ Agitador mecánico – eléctrico
- ✓ pH metro
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Cronómetro
- ✓ Ro tap
- ✓ Soporte universal
- ✓ Botella rolada
- ✓ Pulverizador de anillos capacidad 350g
- ✓ Laptop
- ✓ Horno eléctrico
- ✓ Cámara fotográfica

- ✓ Molino polveador capacidad 30 Kg

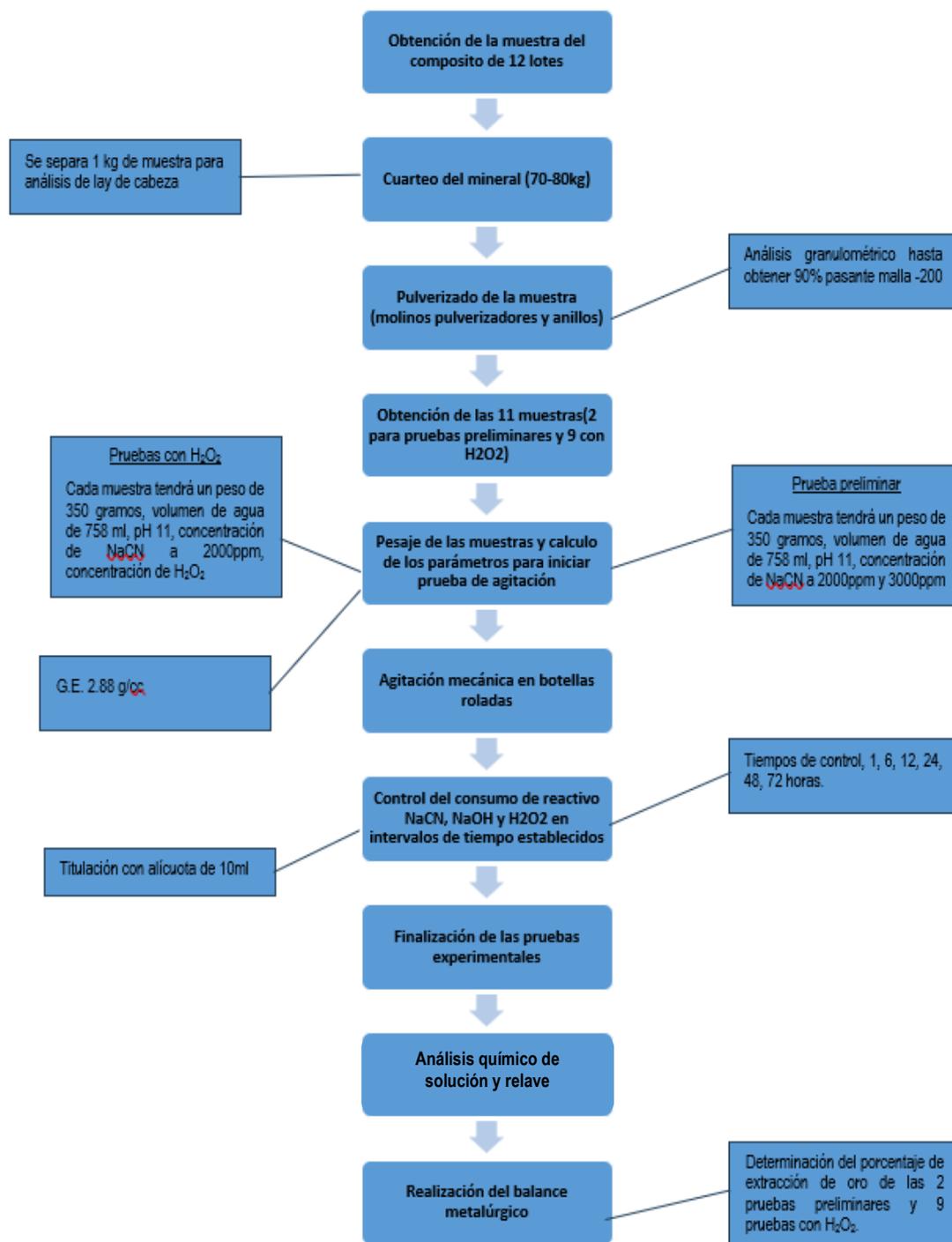
4.9.1.3 Reactivos a utilizar

- ✓ Cianuro de sodio
- ✓ Hidróxido de sodio o soda caustica
- ✓ Nitrato de plata
- ✓ Yoduro de potasio
- ✓ Peróxido de hidrógeno al 50%
- ✓ Agua destilada

La parte experimental se realizó respetando los procedimientos previos a la elaboración de la prueba metalúrgica. En la figura 14 se detallan los procedimientos realizados para ejecutar las pruebas experimentales.

Figura 14:

Diagrama de flujo del proceso experimental



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Planificación y desarrollo de pruebas experimentales

5.1.1 Preparación mecánica del mineral y muestreo

La muestra que se obtuvo del área de recepción de minerales tiene el tamaño de -1/2 pulgada 100 %. Se tomó aproximadamente 6.6 kg de muestra por lote, haciendo en promedio 80 kg de muestra representativa.

La cantidad de muestra requerida se obtuvo reduciéndolo por el método de cuarteo en conos, hasta obtener 30 Kg y una muestra representativa de 500 g para análisis químicos para determinar la ley de cabeza ensayada, para lo cual, se realiza muestreo por puntos de la muestra de 30 Kg que se obtuvo anteriormente.

Posterior a ello, la muestra se coloca en los molinos polveadores por 45 minutos, tiempo establecido en la planta de beneficio Españolita S.A.C., obteniéndose 77 % -200 Malla y luego se separa dos muestras (muestra y contra muestra).

Posterior a ello, en la mesa de preparación de muestras se redujo la muestra por método de cuarteo por puntos, hasta obtener 10 muestras de 360g cada uno.

5.1.2 Preparación de la muestra para cianuración

Para las pruebas metalúrgicas se requiere 90 % -200 malla, dichos valores son establecidos por reporte de planta. Para lo cual, se requerirá de un pulverizador de anillos.

La muestra de 360 g se coloca en una bandeja y se coloca a la mufla durante 15 minutos a una temperatura de 100 – 105 °C. La muestra se seca y se coloca en la pulverizadora de anillos, el tiempo empleado para llegar a la granulometría requerida es de 3. 5 minutos.

Para determinar el pasante, se toma 10 g de muestra pulverizada y se coloca al Ro-tap por 2 minutos a -200 malla. Se pesa el pasante -200 malla entre el total de la muestra (peso del retenido + peso del pasante) multiplicado por 100.

5.1.3 Pruebas experimentales de cianuración

Se corren dos pruebas preliminares de cianuración para determinar las variables óptimas. Cada prueba metalúrgica se realizará según el rango de parámetros establecidos. En la tabla 8 se muestra el rango de variación de cianuro de sodio para las dos pruebas preliminares.

Tabla 8:

Variación de NaCN para pruebas preliminares

VARIABLE	PRUEBA 1	PRUEBA 2
NaCN	2000ppm	3000ppm

5.1.4 Procedimiento para la prueba metalúrgica

En la tabla 9 se muestra los parámetros de operación para las pruebas preliminares.

Tabla 9:

Parámetros operacionales para la cianuración en planta de beneficio

Parámetros de operación	Rango
Granulometría	90 % malla -200
Concentración de cianuro de sodio	2000, 3000 ppm
pH	10.5 - 11
Tiempo de cianuración	50, 62 y 72 horas
Densidad de pulpa	1260 g/L
Gravedad específica	2.88 g/mL

Para las pruebas se realiza el balance de pulpa para determinar el sólido y líquido que se requiere para colocar a las botellas roladas.

Según el anexo 4 la gravedad específica del mineral, determinado en laboratorio es 2.88 g/mL, valor con el que se realiza el balance de pulpa.

Determinación del % de sólidos para la densidad de 1260g/L, dato según planta.

$$\%S = \frac{(\rho_{pulpa} - 1) \times G.E}{(G.E - 1) \times \rho_{pulpa}} \times 100 \quad (5.1)$$

Reemplazando en la fórmula tenemos:

$$\%S = \frac{(1.26 - 1) \times 2.88}{(2.88 - 1) \times 1.26} \times 100$$

Donde:

$\%S$ = Porcentaje de sólido (%)

$G.E$ = Gravedad específica (g/mL)

ρ_{pulpa} = Densidad de pulpa (g/L)

Se obtiene:

$$\%S = 31.61$$

Para determinar la cantidad de agua se necesita hallar la dilución:

$$Dilucion = \frac{(100 - \%S)}{\%S} \quad (5.2)$$

Reemplazando tenemos

$$Dilucion = \frac{(100 - 31.61)}{31.61}$$

Se obtiene

$$Dilucion = 2.16$$

Hallamos la cantidad de agua para la prueba, sabiendo que se usara 350 g de mineral o 0.35 Kg

$$H_2O = Dilucion \times peso \ de \ muestra \tag{5.3}$$

Reemplazando se tiene

$$H_2O = 2.16 \times 0.350kg$$

Se obtiene

$$H_2O = 0.756 L$$

- Se prepara el recipiente y se codifica. Seguidamente se le agrega 350 g y 0.756 L de agua.
- Se agita por 5 minutos y se deja reposar para luego verificar el pH natural del mineral. Si el pH se encuentra por debajo de 10.5 se le agrega hidróxido de sodio 1.300g hasta obtener pH igual a 11
- Una vez obtenido el pH, se agrega cianuro de sodio de acuerdo a las concentraciones de diseño experimental.

Para ello usaremos la fórmula

$$W_{NaCN (g)} = \frac{(V_{mL}) \times Con. NaCN \ g/mL}{100} \tag{5.4}$$

Para una concentración de 0.3%

$$W_{NaCN(g)} = \frac{(756mL) \times 0.3 \text{ g/mL}}{100}$$

Se tiene

$$W_{NaCN(g)} = 2.27 \text{ g}$$

Para una concentración de 0.2%

$$W_{NaCN(g)} = \frac{(756mL) \times 0.2 \text{ g/mL}}{100}$$

Se tiene

$$W_{NaCN(g)} = 1.51 \text{ g}$$

Realizar el control del consumo de cianuro libre y pH, adicionando la cantidad necesaria de cianuro de sodio y hidróxido de sodio para que la concentración inicial permanezca constante.

- Los controles se realizan al cabo de 1, 5, 12, 24, 36, 50 y 72 horas. En cada periodo se toma 10 mL de muestra de solución con una pipeta y se filtra para, posterior a ello, realizar la titulación con nitrato de plata de concentración de 4.3333 g/L y yoduro de potasio al 5% como indicador.
- Reponer la cantidad de solución extraída en cada control con agua destilada, para mantener el volumen inicial.
- Una vez culminado la lixiviación, se obtiene muestra de la solución y el relave se filtra y se seca para obtener una muestra representativa para enviar a laboratorio químico para determinar la ley de oro en la solución (PLS) y en el relave.

En la Tabla 10 se muestra el resumen de los componentes iniciales para las pruebas de cianuración.

Tabla 10:

Valores iniciales para pruebas de cianuración convencional

Pruebas	Peso del mineral (g)	Tiempo (horas)	Vol. Del agua (L)	Peso de soda cáustica (g)	Peso de cianuro de sodio (g)	Granulometría -200 malla (%)	Concentración de NaCN (ppm)
PM - 1	350	72	0.757	1.3	2.27	90	3000
PM - 2	350	50	0.757	1.3	1.52	90	2000

5.1.5 Procedimiento con el uso del peróxido de hidrógeno

En la tabla 11 se muestra el rango de operación para las pruebas con peróxido de hidrógeno.

Tabla 11:

Rangos de operación para las pruebas de cianuración con adicción de peróxido de hidrógeno

Parámetros de operación	Rango
Volumen de H ₂ O ₂ al 50%	3mL, 5.5mL, 8mL
Granulometría	90 % -200 malla
Volumen de cianuro de sodio	2000 ppm
pH	11
Tiempo de cianuración	50, 62, 72 horas
Densidad de pulpa	1260 g/L
Gravedad específica	2.88 g/mL

Se siguen los pasos para la preparación de muestra y el procedimiento para las pruebas de cianuración con la diferencia de que al iniciar la prueba se le agrega el peróxido de hidrógeno que tiene una concentración al 50%.

- Primeramente, se determina la cantidad de peróxido de hidrógeno a agregar según el volumen de la prueba.

Para una prueba de 3 ml/L:

3 mL 1000 mL

X 757 mL

X = 2.27 mL

Para una prueba de 5.5 ml/L:

5.5 mL..... 1000 mL

X 757 mL

X = 4.16 mL

Para una prueba de 8ml/L:

8 mL..... 1000 mL

X 757 mL

X = 6.056 mL

- Seguidamente se agrega el H₂O₂ necesario para mantener la concentración.
- Después de 1 hora se procede a titular el cianuro libre y así mismo se verifica el pH, donde se extrae 10 mL de solución de la prueba para realizar el control. Se repone 10 mL con agua destilada y el consumo de NaCN, NaOH para mantener en los rangos establecidos de la prueba y así mismo la reposición del H₂O₂ para mantener la concentración.
- El total de pruebas son nueve, según el diseño factorial usado en la investigación. Las concentraciones de peróxido de hidrógeno son a 3 mL, 5.5 mL y 8 mL.
- Finalmente, la muestra de la solución (PLS) y relave se envía a laboratorio químico para determinar la ley de oro.

En la tabla 12 se muestra el rango de las variables (concentración de peróxido de hidrógeno y tiempo de cianuración).

Tabla 12:

Variables a estudiar para las pruebas utilizando PAL

Variable	Variable nominal	Unidad	Nivel		
			inferior	central	superior
Concentración de H ₂ O ₂	X ₁	mL	3	5.5	8
Tiempo de cianuración	X ₂	horas	50	62	72

Así mismo en la tabla 14 se muestra el resumen del rango de las variables para iniciar las pruebas para la segunda etapa. El número de pruebas se establecieron según el diseño factorial 2^k que se usara para la investigación.

Tabla 13:

Resumen de rango de las variables para iniciar pruebas con H₂O₂

pruebas	H ₂ O ₂ (mL)	Peso del mineral (g)	Tiempo (horas)	Vol. agua (L)	Peso de soda caustica (g)	Peso de cianuro de sodio (g)	Granulometría - 200 malla (%)	Concentración de NaCN (ppm)
PM - 1	8	350	50	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 2	8	350	50	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 3	3	350	72	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 4	3	350	72	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 5	5.5	350	62	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 6	3	350	50	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 7	8	350	72	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 8	3	350	50	0.757	1.3	1.57	90	2000
PM - 9	8	350	72	0.757	1.3	1.57	90	2000

Luego de evaluar las pruebas preliminares con cianuro, se opta por trabajar con la concentración de cianuro de sodio de 2000 ppm, ya que en este rango la extracción es considerablemente alto.

El rango de las variables que se tomó para las pruebas, fueron obtenidas de los parámetros que actualmente opera la planta como es la densidad de pulpa a 1260 g/L, porcentaje de 90 % – 200 malla. Por lo cual, se toma 90% -200 malla todas las muestras para las pruebas, debido a que en el mes de marzo se optimiza el circuito de molienda de la planta, incrementando el porcentaje – 200 malla de 85 % a 90 %. Ver figura 16.

Anteriormente la planta operaba en circuito cerrado con alimentación fresca a cada molino, a lo que hoy se incrementó cambiando el circuito con remolienda.

En la figura 15 se muestra el resumen del balance de masa de la planta de beneficio.

Figura 15:

Balance de materia de la planta de beneficio Española SAC

Fecha	Turno	Alimentacion de faja				Densidad				Over flow				Agitacion-lixiviacion			
		Corte de faja				N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	Densidad	Malla	CN	Ph	TK-1			
		(kg/t)	TMHD	% H ₂ O	TMSD	(5' x 6')	(5' x 5')	(5' x 5')	(5' x 5')	(gr/L)	(%)	(%)		Densidad	Malla	CN	pH
Enero	A	7.20	57.26	0.02	56.21	1.83	1.84	1.86	1.70	1.25	0.85	0.17	10.66	1.26	0.86	0.11	10.34
	B	7.20	57.26	0.02	56.21	1.78	1.85	1.86	1.68	1.26	0.85	0.17	10.69	1.27	0.85	0.11	10.32
	Total	7.20	114.52	0.02	112.42	1.80	1.84	1.86	1.69	1.25	0.85	0.17	10.67	1.27	0.85	0.11	10.33
Febrero	A	7.92	60.28	0.02	59.13	1.79	1.78	1.86	1.59	1.26	0.87	0.17	10.69	1.26	0.72	0.09	8.93
	B	7.92	60.28	0.02	59.13	1.79	1.81	1.86	1.62	1.26	0.88	0.17	10.70	1.27	0.72	0.09	8.65
	Total	7.92	120.56	0.02	118.26	1.79	1.80	1.86	1.61	1.26	0.87	0.17	10.69	1.26	0.72	0.09	8.79
Marzo	A	9.08	65.15	0.03	64.65	1.65	1.87	1.87	1.80	1.25	0.90	0.17	10.81	1.26	0.91	0.12	10.51
	B	9.20	72.04	0.03	73.42	1.67	1.85	1.90	1.83	1.25	0.90	0.17	10.80	1.26	0.91	0.12	10.51
	Total	9.14	137.36	0.02	134.03	1.66	1.86	1.89	1.83	1.26	0.90	0.17	10.80	1.26	0.92	0.12	10.51
Abril	A	9.06	66.15	0.02	64.65	1.65	1.87	1.87	1.80	1.26	0.91	0.17	10.81	1.26	0.91	0.12	10.48
	B	9.20	70.60	0.02	68.87	1.66	1.87	1.87	1.85	1.26	0.91	0.17	10.80	1.26	0.93	0.12	10.49
	Total	9.12	136.75	0.02	133.52	1.66	1.87	1.87	1.83	1.26	0.91	0.17	10.81	1.26	0.92	0.12	10.50
Mayo	A	8.26	61.94	0.02	60.65	1.63	1.89	1.89	1.85	1.26	0.91	0.17	10.74	1.26	0.90	0.12	10.55
	B	8.34	66.65	0.02	65.18	1.63	1.89	1.89	1.86	1.26	0.91	0.17	10.74	1.26	0.92	0.13	10.56
	Total	8.32	128.58	0.02	125.70	1.68	1.89	1.89	1.85	1.26	0.91	0.17	10.75	1.26	0.91	0.12	10.55

En la figura 15 se muestra las variables operativas de la planta de beneficio Española SAC

Figura 16:

Resumen por mes del porcentaje -200 malla



5.1.6 Procesamiento y análisis de data

El método que se utilizó para el procesamiento de datos es la estadística, con el cual se realizará el procesamiento de datos, nos ayudará a determinar el promedio, la varianza estándar, proyección, análisis y varianza, etc. (Silvetre & Huaman, 2019).

Como también se utilizará el Microsoft Excel, para procesar la data de extracción de oro y la construcción de las gráficas correspondientes, a fin de correlacionar los datos, y obtener la influencia de las variables de concentración de cianuro de sodio en la primera etapa y la concentración de peróxido de hidrógeno y tiempo de cianuración en la segunda etapa sobre la extracción de oro.

5.1.7 Determinación del número de experimentos

Para determinar el número de pruebas metalúrgicas a realizar, se utilizó la siguiente formula:

5.1.7.1 Primera etapa

En la primera etapa se realizarán 2 pruebas preliminares de cianuración, con la finalidad de obtener el rango de parámetros óptimos como es la concentración de NaCN.

5.1.7.2 Segunda etapa

Prueba de cianuración con peróxido de hidrógeno

$$N = 2^k \quad (5.5)$$

Donde $k = 2$

Reemplazando en la formula

$$N = 2^k = 2^2 = 4$$

Número de experimentos = 4

Numero de réplicas por cada punto = 1 total (4)

Número de pruebas centrales = 1

Número total de pruebas = 9

La cantidad total de pruebas a realizar son de 9 pruebas, con 4 pruebas directas, 4 pruebas producto de las réplicas por cada punto y una réplica en el punto central.

Para incrementar la precisión en las pruebas y los resultados que se obtengan sean más confiable, es que se le aumenta una réplica por punto y una réplica en el punto central, haciendo un total de 9 pruebas a ejecutar.

5.1.8 Análisis de datos

Los resultados de los datos obtenidos en la primera etapa serán analizados a través de la herramienta Excel y la segunda etapa se analizará a través del software minitab. Este software, según Amat R., (2016) “es una herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre una variable de salida (respuesta)” (p. 23).

Al realizar la primera etapa de la prueba se determinará la variable con la mejor condición para ejecutar las pruebas experimentales de la segunda etapa con la aplicación del peróxido de hidrógeno y

finalmente se evaluará el efecto de las variables de investigación en el incremento de la extracción de oro.

5.2 Resultados experimentales

En la tabla 14 se muestra la cabeza ensayada de la muestra es:

Tabla 14:

Ley de cabeza de la muestra

Descripción	oz/TC	g/TM
Ley de cabeza ensayada	0.472	15.245

Nota: La ley de cabeza ensayada de la muestra para las dos etapas es de 15.245 g/TM, obtenido en laboratorio químico de la planta de beneficio Españolita.

5.2.1 Primera etapa: ensayos por cianuración convencional

En la primera etapa se evaluó el efecto del cianuro de sodio en la extracción del oro, teniendo como rango la concentración de 2000 ppm y 3000 ppm. En la tabla 15, se muestra el rango de parámetros que se tomó para ejecutar las pruebas.

Tabla 15:

Rango de parámetros para la prueba de cianuración convencional

Variable	Unidad	Prueba 1	Prueba 2
Concentración de NaCN	ppm	2000	3000
Tiempo de lixiviación	Horas	72	72
Granulometría	200 malla	90 %	90 %
pH		11	11

En la tabla 16 se muestra el resumen de la extracción del oro en función al tiempo de lixiviación con 2000 ppm de concentración de cianuro de sodio.

Tabla 16:

Resumen de extracción de oro por prueba en cianuración convencional a 2000 ppm de NaCN

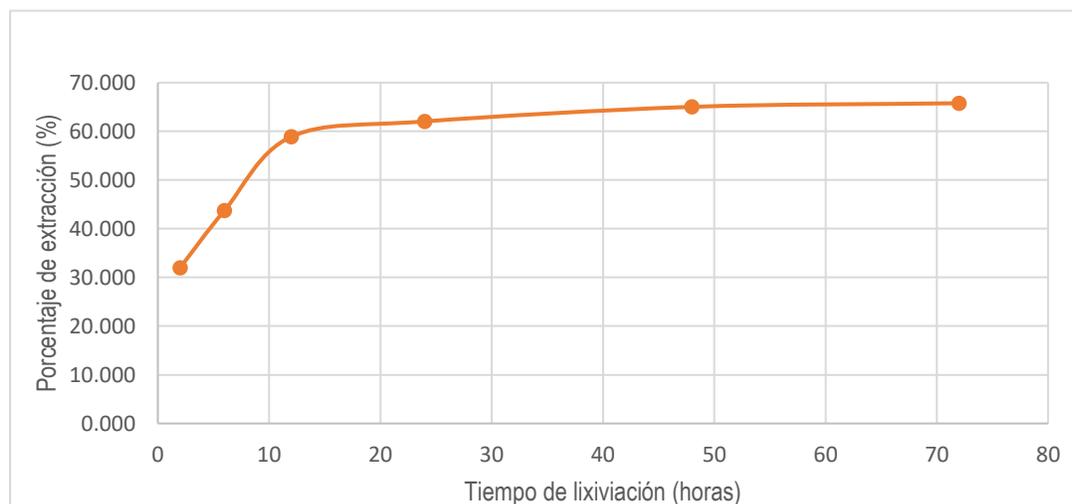
Tiempo (hora)	Extracción de oro (%)
2	32.000
6	43.760
12	58.900
24	62.049
48	65.035
72	65.780

A 2000ppm de concentración de cianuro de sodio se logra alcanzar 65.78 % de extracción de oro

en 72 horas. En la figura 17 se muestra la curva de la extracción del oro versus tiempo.

Figura 17:

Porcentaje de extracción en función al tiempo para 2000 ppm de NaCN



De la gráfica se observa que, en 12 horas, la extracción de oro aumenta considerablemente. A partir de las 48 horas, se observa un incremento mínimo de la extracción hasta las 72 horas.

Así mismo, en la tabla 17 se muestra el resumen de la extracción del oro en diferentes intervalos de tiempo al aplicar 3000ppm de concentración de cianuro de sodio.

Tabla 17:

Resumen de extracción de oro por prueba en cianuración convencional a 3000 ppm de NaCN

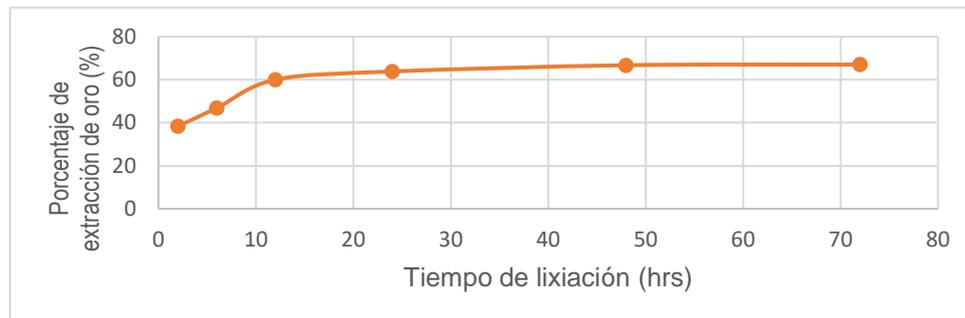
Tiempo (hora)	Extracción de oro (%)
2	38.36
6	46.88
12	60
24	63.82
48	66.73
72	67.04

A 3000ppm de concentración de cianuro de sodio se logró alcanzar 67.04 % de extracción de oro en 72 horas, en comparación con la tabla 14 que a las 72 horas se obtuvo 1.26% menos.

En la figura 18 se muestra la extracción del oro versus el tiempo cuando se ensayó con 3000 ppm de concentración de cianuro de sodio

Figura 18:

Extracción de oro en función al tiempo para 3000 ppm de NaCN

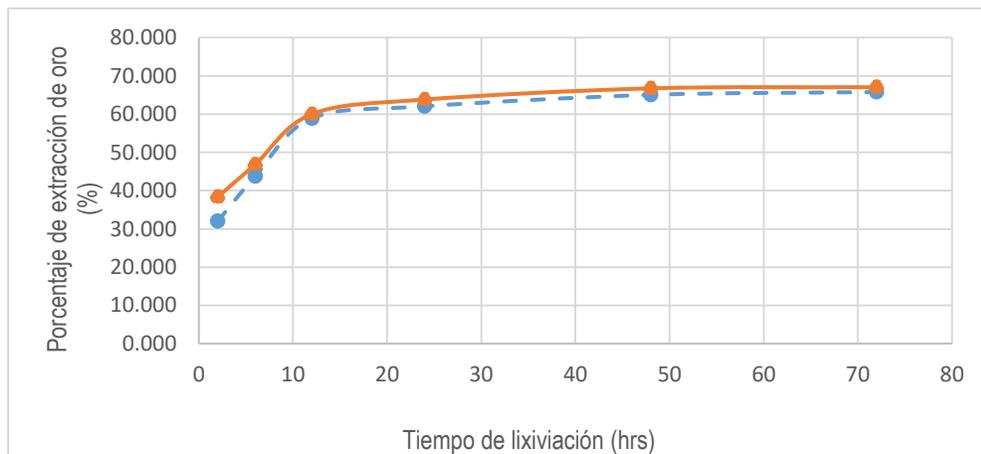


Se visualiza una alta tendencia de crecimiento desde 2 hasta las 12 horas, posterior a ello se ve un pequeño crecimiento hasta las 48 horas, luego la tendencia de crecimiento es de 0.31 % de extracción de oro en las últimas 24 horas del ensayo.

En la figura 19 se muestra la comparación de la extracción de oro al aplicar 2000ppm y 3000ppm

Figura 19:

Comparación en la extracción de oro con 2000 y 3000 ppm de NaCN de cianuro de sodio.



La tendencia representada por líneas punteadas corresponde a la prueba N° 01, en la cual se evaluó la extracción de oro mediante cianuración convencional y una concentración de 2000 ppm de NaCN. La segunda tendencia, representada por una línea continua, también corresponde a una cianuración convencional, pero con una concentración de 3000 ppm de NaCN. Se observa que existe una diferencia notable durante las primeras dos horas de cianuración; sin embargo, después de ese tiempo, la tendencia de extracción es similar en ambas pruebas.

A continuación, se muestra el balance metalúrgico para cada prueba ejecutada y se detallan las fórmulas para determinar la ley calculada, % de extracción analizada y calculada. En Tabla 18 se detalla los datos requeridos para realizar los cálculos correspondientes:

Tabla 18:

Valores para determinar la ley calculada y % de extracción analizada y calculada

Datos	
Ley de oro ensayada(g/TM)	15.245
Dilución de la prueba (m ³ /TM)	2.160

Las fórmulas para realizar el balance metalúrgico tanto para las pruebas preliminares y segunda etapa con la adición del peróxido de hidrógeno.

$$\text{Ley Au calculada} = \text{Au s\u00f3lido} + \text{Au L\u00edquido} * \text{Diluci\u00f3n}$$

$$\% \text{Extracci\u00f3n Calculada} = (1 - \text{Au s\u00f3lido} / \text{Ley Au Calculada}) * 100$$

$$\% \text{Extracci\u00f3n Calculada} = (1 - \text{Au s\u00f3lido} / \text{Ley Au Ensayada}) * 100$$

Las ecuaciones mencionadas anteriormente se usar\u00e1n para realizar los c\u00e1lculos correspondientes.

En las tablas 19 y 20 se muestran los balances metal\u00fargicos de la pruebas N\u00b0 1 y N\u00b0 2.

Tabla 19:

Balance metal\u00fargico Prueba 01 cianuraci\u00f3n convencional

Variable	Rango	Au s\u00f3lido (g/TM)	Au soluci\u00f3n (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracci\u00f3n de Au Calculada (%)	Extracci\u00f3n de Au Ensayada (%)
A	3000ppm					
B	72 horas	5.246	4.933	15.915	67.04	65.591

Tabla 20:

Balance metal\u00fargico Prueba 02 cianuraci\u00f3n convencional

Variable	Rango	Au s\u00f3lido (g/TM)	Au soluci\u00f3n (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracci\u00f3n de Au Calculada (%)	Extracci\u00f3n de Au Ensayada (%)
A	2000ppm					
B	72horas	5.143	4.571	15.029	65.781	66.266

En la tabla 21 se muestra la matriz codificada de los resultados obtenidos.

Tabla 21:*Matriz codificada de resultados*

Prueba	Variables a estudiar				Extracción de oro (%)
	Concentración de NaCN (ppm)	Tiempo de cianuración (Hrs)	Granulometría -200 malla (%)	pH	
1	2000	72	90	11	65.781
2	3000	72	90	11	67.04

Luego de comparar los resultados de la extracción de oro obtenida en ambas pruebas, se determina que, por conveniencia, se utilizará una concentración de 2000 ppm de NaCN para la siguiente prueba, que incluirá la adición de peróxido de hidrógeno en el proceso de cianuración. Esto se debe a que la diferencia en la extracción de oro con respecto a la concentración de 3000 ppm de NaCN es solo del 1.26%.

Además, se elige la concentración de 2000 ppm de NaCN debido a que el consumo de cianuro de sodio a esa concentración es de 8.78 kg/TM, mientras que a 3000 ppm es de 9.33 kg/TM. De este modo, se logrará un ahorro de 0.55 kg/TM por cada tonelada de mineral procesado.

5.2.2 Segunda etapa: ensayos de cianuración con adición de peróxido de hidrogeno

Luego de determinar la concentración de cianuro de sodio óptimo, se procede a evaluar los resultados obtenidos de las 9 pruebas que se ejecutó, según el diseño factorial que se aplicó. En la tabla 22 se muestra las condiciones iniciales de las variables a evaluar en los ensayos.

Tabla 22:*Condiciones iniciales de variables codificadas de concentración de H₂O₂ y tiempo de lixiviación*

Variable	Denotación	Variable codificada	Unidad	Nivel		
				Inferior	Central	Superior
Concentración de H ₂ O ₂	A	X ₁	ml	3	5.5	8
Tiempo de lixiviación	B	X ₂	Horas	50	62	72

En la tabla 23 se muestra el rango de los parámetros operacionales con las que se desarrollaran los ensayos de laboratorio, en la que se consideran algunas variables intervinientes con parámetros de operación en la planta de beneficio.

Tabla 23:

Rango de variables operacionales para pruebas de cianuración con adición de peróxido de hidrógeno

Variable	Rango
Concentración de cianuro de sodio (ppm)	2000
Tiempo de lixiviación (horas)	50, 62, 72
Concentración de peróxido de hidrógeno (ml)	3, 5.5, 8
Granulometría malla -200 (%)	90
pH	11

A continuación, se muestra el balance metalúrgico para cada prueba ejecutada.

Tabla 24:

Prueba N° 01 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno a 3 mL y 72 horas

Variable	X_{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	-	3					
B	+	72	4.526	5.437	16.325	72.21	70.241

Tabla 25:

Prueba N° 02 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 50 horas

Variable	X_{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	-	3					
B	-	50	4.423	4.819	14.942	70.210	70.803

Tabla 26:*Prueba N° 03 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 72 horas*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	+	8					
B	+	72	3.977	5.666	16.310	75.500	73.788

Tabla 27:*Prueba N° 04 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 50 horas*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	+	8					
B	-	50	3.943	5.004	14.855	73.300	73.983

Tabla 28:*Prueba N° 05 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 5.5 mL y 62 horas (punto central)*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	0	5.5					
B	0	62	4.354	5.518	16.414	73.270	71.221

Tabla 29:*Prueba N° 06 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 72 horas (replica)*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	-	3					
B	+	72	4.286	4.856	14.788	71.021	71.888

Tabla 30:*Prueba N° 07 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 3 mL y 50 horas (replica)*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	-	3					
B	-	50	4.834	4.826	15.366	68.350	68.098

Tabla 31:*Prueba N° 08 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 72 horas (replica)*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	+	8					
B	+	72	3.908	5.279	15.388	74.500	72.261

Tabla 32:*Prueba N° 09 cianuración con adición de peróxido de hidrógeno 8 mL y 50 horas (replica)*

Variable	X _{1,2}	Rango	Au sólido (g/TM)	Au solución (g/m ³)	Ley calculada (g/TM)	Extracción de Au Calculada (%)	Extracción de Au Ensayada (%)
A	+	8					
B	-	50	4.217	5.526	16.152	73.921	72.369

5.2.3 Aplicación factorial 2² utilizando minitab

En la tabla 34 se muestra el resumen del diseño de las pruebas experimentales.

Tabla 33:*Resumen de diseño de pruebas experimentales*

Factores:	2
Corridas:	9
Bloques:	1
Diseño de la base:	2; 4
Réplicas:	2
Puntos centrales (total):	1

Tabla 34:*Factores y niveles codificados de las variables independientes*

Variables		Nivel	Nivel	Nivel
		superior	intermedio	inferior
A	Concentración H ₂ O ₂ (mL)	8	5.5	3
B	Tiempo de cianuración (horas)	72	61	50

Tabla 35:*Matriz de diseño del experimento de adición de peróxido de hidrógeno en cianuración 2²*

Corrida	Blq	A	B
1	1	-	-
2	1	+	-
3	1	-	+
4	1	+	+
5	1	-	-
6	1	+	-
7	1	-	+
8	1	+	+
9	1	0	0

Tabla 36:*Plan de pruebas experimentales de diseño factorial 2² con dos replicas y 1 punto central*

N° de pruebas	Escala codificada		Escala natural	
	X1	X2	A	B
1	-1	-1	3	50
2	1	-1	8	50
3	-1	1	3	72
4	1	1	8	72
5	-1	-1	3	50
6	1	-1	8	50
7	-1	1	3	72
8	1	1	8	72
9	0	0	5.5	61

Tabla 37:*Ajuste matricial del diseño factorial 2²*

N° de pruebas	Escala codificada		Escala natural		Y(Respuesta) (%)
	X1	X2	A	B	
1	-1	-1	3	50	70.21
2	1	-1	8	50	73.3
3	-1	1	3	72	72.21
4	1	1	8	72	74.50
5	-1	-1	3	50	68.35
6	1	-1	8	50	73.92
7	-1	1	3	72	71.02
8	1	1	8	72	75.50
9	0	0	5.5	61	73.27

La tabla 37 muestra el ajuste matricial del diseño factorial 2², evaluando el impacto de dos variables principales, la concentración de H₂O₂ (A) y el tiempo de lixiviación (B), sobre la extracción de oro en el proceso de cianuración. En este diseño, los factores se analizaron en dos niveles: bajo (-1) y alto (+1), incluyendo además un punto central (0) para confirmar la linealidad de los efectos y evaluar posibles curvaturas. La concentración de H₂O₂ varió entre 3 mL y 8 mL, mientras que el tiempo de cianuración osciló entre 50 y 72 horas, llevándose a cabo nueve pruebas experimentales.

Los resultados muestran que los mayores porcentajes de extracción de oro se obtienen con niveles altos de ambos factores: concentración de H₂O₂ de 8 mL y un tiempo de lixiviación de 72 horas, alcanzando valores del 75.5% (prueba 8) y 74.5% (prueba 4). En contraste, las menores extracciones, como el 68.35% (prueba 5), se lograron en niveles bajos de ambos factores: 3 mL de concentración y 50 horas de tiempo de lixiviación. El análisis de los puntos centrales (prueba 9), con un porcentaje de extracción del 73.27%, valida que los resultados se encuentran dentro de lo esperado en el rango estudiado.

En términos de interpretación, la concentración de H₂O₂ demostró ser el factor con mayor incidencia en la extracción de oro, como se evidencia en el incremento significativo de la respuesta al pasar de 3 mL a

8 mL. Por otro lado, aunque el tiempo de lixiviación también influye, su efecto es menos pronunciado, mostrando incrementos más moderados al aumentar de 50 a 72 horas.

Tabla 38:

Efecto estimado para la extracción de oro en unidades codificadas

Término	Efecto	Coef.	EE del coef	Valor T	Valor p	FIV
Constante		72.376	0.313	231.42	0	
Concentración H ₂ O ₂ (A)	3.858	1.929	0.313	6.17	0.004	1
Tiempo de cianuración (B)	1.863	0.931	0.313	2.98	0.041	1
A*B	-0.472	-0.236	0.313	-0.76	0.492	1
Pt Ctral		0.894	0.938	0.95	0.395	1

La Tabla 38 muestra los coeficientes estimados para el modelo de regresión lineal basado en un diseño factorial 2², donde se evalúan los efectos principales y la interacción entre las variables experimentales: concentración de H₂O₂ (A) y tiempo de cianuración (B) sobre la extracción de oro. La tabla revela que la constante (72.376) representa la extracción promedio en el punto central del espacio experimental, indicando que la base de recuperación del oro es del 72.38%.

La concentración de H₂O₂ muestra un efecto significativo (valor p=0.004) y es la variable más influyente, con un incremento promedio del 3.86% en la extracción al pasar del nivel bajo (-1) al nivel alto (+1). Por otra parte, el tiempo de cianuración también resulta significativo (valor p=0.041) y contribuye con un aumento promedio del 1.86% en la extracción bajo las mismas condiciones. Sin embargo, la interacción entre ambos factores (A*B) no es estadísticamente significativa (valor p=0.492), lo que indica que estos actúan de manera independiente en el rango evaluado.

El punto central (Pt Ctral) sugiere que no existe curvatura relevante en el modelo, lo cual valida el uso de un enfoque lineal. Además, el Factor de Inflación de Varianza (FIV) igual a 1 en todos los términos confirma la ausencia de colinealidad entre las variables, garantizando la fiabilidad del modelo.

Tabla 39:*Análisis de varianza (ANOVA)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	37.855	9.4637	12.09	0.017
Lineal	2	36.6984	18.3492	23.45	0.006
Concentración H ₂ O ₂ (A)	1	29.7606	29.7606	38.03	0.004
Tiempo de cianuración (B)	1	6.9378	6.9378	8.87	0.041
Interacciones de términos	2	0.4465	0.4465	0.57	0.492
A*B	1	0.4465	0.4465	0.57	0.492
Curvatura	1	0.71	0.71	0.91	0.395
Error	4	3.13	0.7825		
Total	8	40.985			

En la tabla 39 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) aplicado al diseño factorial 2², utilizado para evaluar cómo influyen las variables concentración de H₂O₂ (A), el tiempo de cianuración (B) y su interacción (A*B) en la extracción de oro. Este análisis permite comprender cuáles son los factores más importantes y de tal manera se pueda realizar una optimización

En términos generales, el modelo es estadísticamente significativo, con un valor p=0.017 y un valor F=12.09. Esto confirma que el modelo desarrollado es confiable para explicar las variaciones observadas durante los experimentos. Entre las variables estudiadas, la concentración de H₂O₂ es la que tiene el mayor impacto sobre la extracción de oro, mostrando un efecto muy significativo (valor p=0.004 y valor F=38.03). Esto indica que pequeñas variaciones en la concentración de peróxido de hidrógeno pueden generar grandes cambios en la eficiencia del proceso.

Por otro lado, el tiempo de cianuración también influye de forma significativa, aunque en menor medida, con un valor p=0.041 y un valor F=8.87. Esto sugiere que extender o reducir el tiempo puede mejorar la extracción, pero su efecto no es tan pronunciado como el de la concentración de H₂O₂.

Por otra parte, la interacción entre ambas variables ($A*B$) no resulta significativa, lo que indica que no hay un efecto combinado relevante entre la concentración de H_2O_2 y el tiempo. Además, el análisis de curvatura muestra que el modelo lineal es suficiente para describir el comportamiento del sistema en el rango estudiado, ya que no se observan desviaciones significativas en los datos.

Tabla 40:

Resumen del modelo estadístico de la extracción del oro

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.884597	92.36%	84.73%	89.52

En la tabla 40 se presenta un análisis estadístico del modelo utilizado para evaluar el proceso de cianuración con peróxido de hidrógeno aplicado a minerales sulfurados de la planta Españolita S.A.C. en Chala, Arequipa. Los resultados evidencian la solidez del modelo y su capacidad para explicar y predecir los datos experimentales, lo que lo convierte en una herramienta clave para optimizar el proceso.

El R-cuadrado, con un valor del 92.36%, indica que el modelo explica un porcentaje significativo de la variabilidad en los resultados experimentales. Este valor refleja que las variables seleccionadas (concentración de H_2O_2 y tiempo de cianuración) reflejan adecuadamente el comportamiento del sistema en las condiciones evaluadas. Por otro lado, el R-cuadrado ajustado (84.73%) toma en cuenta la cantidad de variables incluidas en el modelo y corrige posibles sobreestimaciones, manteniendo un nivel alto que valida la relevancia de las variables principales en el modelo.

El R-cuadrado predicción, con un valor de 89.52%, demuestra la capacidad del modelo para generalizar los resultados y predecir comportamientos bajo condiciones similares a las experimentadas. Este valor cercano al R-cuadrado inicial indica que el modelo tiene una buena capacidad predictiva y puede ser útil para futuras aplicaciones en el proceso de cianuración. Por otra parte.

El error estándar ($S = 0.884597$) muestra una baja dispersión de los datos experimentales respecto a los valores predichos por el modelo, reforzando la precisión del ajuste.

Ecuación del modelo matemático

Tomando en cuenta todas las variables y sus interacciones tenemos la siguiente relación matemática:

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{Extracción de oro} &= 60.09 + 1.296 \text{ Concentración H2O2} + 0.1319 \text{ Tiempo de} \\ &\text{cianuración} - 0.0086 \text{ Concentración H2O2} * \text{Tiempo de cianuración} \\ &+ 0.894 \text{ Pt Ctrial} \end{aligned}$$

$$\text{Extracción de oro} = 60.09 + 1.296 A + 0.1319 B - 0.0086 A*B + 0.894 \text{ Pt Ctrial}$$

Tabla 41:

Análisis de residuo de valores observados y estimados para la extracción de oro

N°	Y observado	Y estimado	Residuo
1	70.21	69.38	0.83
2	73.30	73.71	-0.41
3	72.21	71.71	0.50
4	74.50	75.10	-0.60
5	68.35	69.38	-1.03
6	73.92	73.71	0.21
7	71.02	71.71	-0.69
8	75.50	75.10	0.40
9	73.27	72.48	0.79

El análisis de residuos presentado en la tabla 41 muestra la diferencia entre los valores observados y estimados en el modelo de cianuración por agitación con peróxido de hidrógeno para los minerales sulfurados de la planta Españolita S.A.C., en Chala, Arequipa. Los residuos oscilan en un rango de -1.03 a 0.83, lo que indica que las predicciones del modelo están, en general, muy cercanas a los valores experimentales observados. Este rango refleja un nivel aceptable de precisión del modelo y su capacidad de ajuste a los datos experimentales.

La distribución de los residuos no muestra un patrón sistemático, alternando entre valores positivos y negativos de manera uniforme. Esto sugiere que el modelo no presenta sesgos y que las variables seleccionadas explican adecuadamente las variaciones en los resultados de extracción de oro. Además, los residuos se distribuyen aleatoriamente, lo cual es un indicador clave de la validez del modelo estadístico.

En particular, el mayor residuo se encuentra en la prueba 5 (-1.03), donde el valor observado (68.35%) es ligeramente inferior al estimado (69.38%). Este residuo, aunque más alto que los demás, sigue estando dentro de un rango aceptable. Por otro lado, el residuo más bajo se observa en la prueba

2 (-0.41), lo que denota una excelente correspondencia entre el valor observado (73.30%) y el estimado (73.71%).

Tabla 42:

Parámetros fundamentales de proceso

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Extracción (%)	Objetivo	68.35	75	75.5	1	1

En la tabla 42 se define los parámetros fundamentales para el proceso de cianuración por agitación de oro utilizando peróxido de hidrógeno, llevado a cabo en la planta Españolita S.A.C., en Chala, Arequipa. La variable objetivo es la extracción de oro (%), cuyo rendimiento se ha delimitado dentro de un rango predefinido para garantizar tanto la eficiencia como la estabilidad operativa del proceso.

El objetivo central del proceso es alcanzar una extracción del 75%, considerado el estándar de rendimiento que equilibra la eficiencia técnica y la viabilidad económica. Los límites establecidos para esta variable son:

- **Límite inferior:** 68.35 %, que representa el mínimo aceptable de extracción. Valores por debajo de este rango indican ineficiencias significativas en el proceso.
- **Límite superior:** 75.5 %, que marca el rendimiento óptimo esperado sin comprometer el balance en el consumo de reactivos o los costos operativos.

La ponderación e importancia asignadas a la extracción de oro son ambas de valor 1, lo que refleja que esta es la variable más crítica para evaluar el éxito del proceso. Cualquier desviación dentro de este rango debe ser cuidadosamente monitoreada y ajustada, ya que influye directamente en el cumplimiento de los objetivos de la operación.

Tabla 43:

Resultados de la optimización del proceso de cianuración con peróxido de hidrógeno

Solución	Concentración H₂O₂ (mL)	Tiempo de cianuración (horas)	Extracción (%) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	7.85332	72.0000	75.0000	1.00000
2	7.85332	72.0000	75.0000	1.00000
3	7.87448	71.7732	74.9998	0.99996
4	8.00000	51.4265	73.7994	0.81946
5	3.00000	61.9306	70.6456	0.34520

La tabla 43 se muestra los resultados de la optimización del proceso de cianuración con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para la extracción de oro en la planta Españolita S.A.C., destacando las condiciones experimentales y su impacto en la eficiencia del proceso. Las soluciones 1 y 2 se identifican como las más óptimas, alcanzando un porcentaje de extracción ajustado del 75% con una concentración de 7.85 mL de H₂O₂ y un tiempo de cianuración de 72 horas. Estas soluciones logran una deseabilidad compuesta perfecta de 1.0000, indicando que cumplen plenamente con los objetivos establecidos en el modelo de optimización.

La solución 3, con una concentración ligeramente superior de H₂O₂ (7.87 mL) y un tiempo de cianuración de 71.77 horas, también logra una extracción ajustada del 75% y una deseabilidad casi perfecta (0.99996), lo que la hace comparable a las soluciones óptimas. Por otro lado, la solución 4 ofrece una alternativa interesante, con un porcentaje de extracción ajustado de 73.7994 %, utilizando una concentración de H₂O₂ de 8.00 mL y un tiempo de cianuración reducido a 51.43 horas. Sin embargo, su deseabilidad compuesta de 0.81946 es inferior, lo que sugiere una ligera desviación respecto a los parámetros ideales.

Por otra parte, la solución 5 muestra un rendimiento significativamente menor, con un porcentaje de extracción de 70.6456 %, asociado a la concentración más baja de H₂O₂ (3.00 mL) y un tiempo de

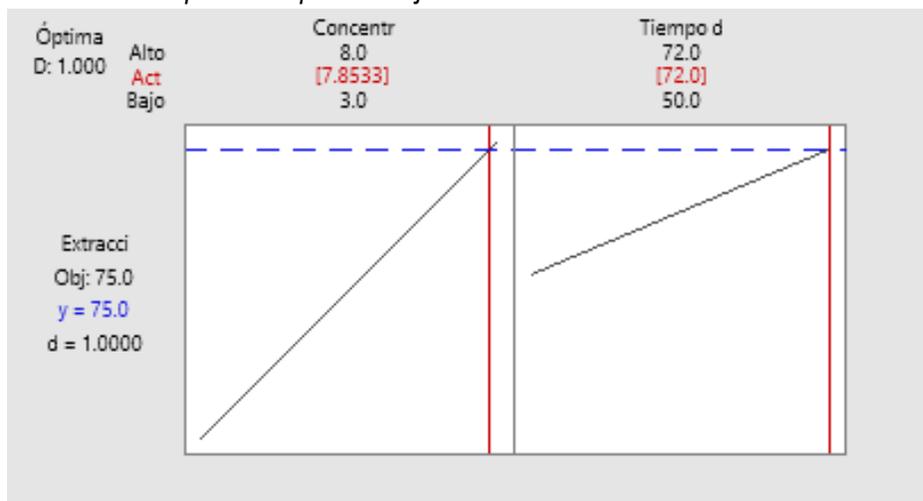
cianuración de 61.93 horas. Su deseabilidad compuesta de 0.34520 refleja que estas condiciones no son las más favorables para maximizar la eficiencia del proceso.

5.2.4 Interpretación de graficas del diseño factorial

A continuación, se interpretan las gráficas del diseño factorial

Figura 20:

Grafica de interpretación para el objetivo de extracción



En figura 20 se muestra el modelo estadístico desarrollado para optimizar la extracción de oro mediante cianuración con peróxido de hidrógeno en la planta Españolita S.A.C. En este análisis, se identificaron los niveles óptimos de las variables experimentales, con un objetivo de extracción del **75%**, asegurando máxima deseabilidad y cumplimiento de los parámetros establecidos en el modelo.

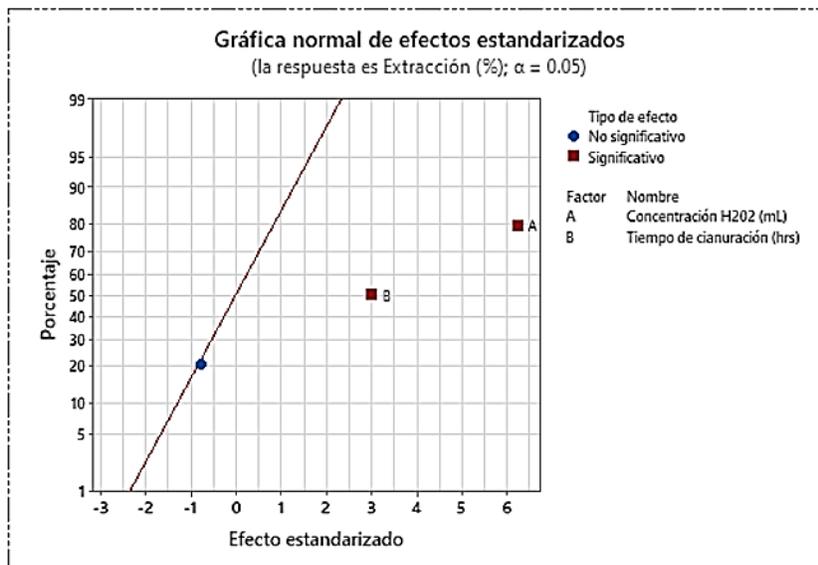
En cuanto a la concentración de H_2O_2 , el nivel óptimo identificado es de 7.8533 mL, situado cerca del límite superior evaluado de 8.0 mL, lo que confirma que mayores concentraciones de H_2O_2 tienen un impacto significativo en la mejora de la extracción de oro. Por otro lado, el tiempo de cianuración óptimo es de 72 horas, el máximo valor dentro del rango experimental, lo que demuestra que un tiempo prolongado de lixiviación contribuye positivamente a la eficiencia del proceso. Sin embargo, no se

evaluaron incrementos adicionales en el tiempo, por lo que es necesario considerar este límite en futuras evaluaciones.

La gráfica de la figura 20 muestra que el porcentaje de extracción alcanzado bajo estas condiciones óptimas es exactamente el objetivo planteado del 75%, con una deseabilidad compuesta de 1.0000, indicando que el modelo estadístico ajusta perfectamente a las metas de optimización. Las líneas rojas verticales marcan los niveles actuales seleccionados para cada variable, mientras que la línea azul discontinua en el gráfico de extracción refleja el valor objetivo, corroborando que las condiciones propuestas cumplen con los requisitos establecidos.

Figura 21:

Gráfica de efectos estandarizados



En la figura 21 se evaluó la significancia estadística de las variables experimentales en el proceso de cianuración por agitación del oro utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Los resultados destacan que tanto la concentración de H_2O_2 (Factor A) como el tiempo de cianuración (Factor B) son factores estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). Esto se refleja en que sus puntos se encuentran fuera de la línea roja de referencia, que indica el umbral de significancia.

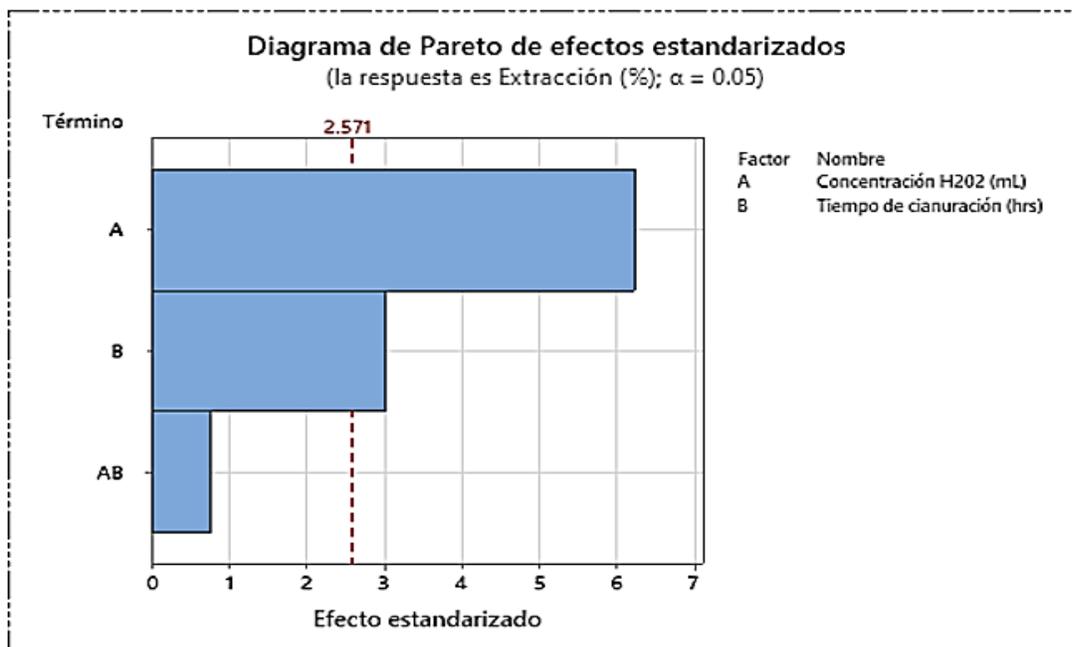
En detalle, el factor A (concentración de H_2O_2) demuestra ser el más influyente en el porcentaje de extracción de oro, ya que su efecto estandarizado es el más elevado y su distancia a la línea de referencia es considerablemente mayor. Esto sugiere que un aumento en la concentración de H_2O_2 impacta de manera directa y positiva en la eficiencia del proceso.

Por su parte, el factor B (tiempo de cianuración) también es significativo, aunque su influencia es menor en comparación con la concentración de H_2O_2 . Este resultado indica que la duración del proceso es relevante para optimizar la extracción de oro, especialmente cuando se combina con niveles adecuados de concentración de H_2O_2 .

Finalmente, no se observan interacciones ni otros factores con significancia estadística, ya que sus puntos permanecen dentro de la línea de referencia, lo que implica que su efecto sobre el porcentaje de extracción es despreciable en el diseño experimental evaluado.

Figura 22:

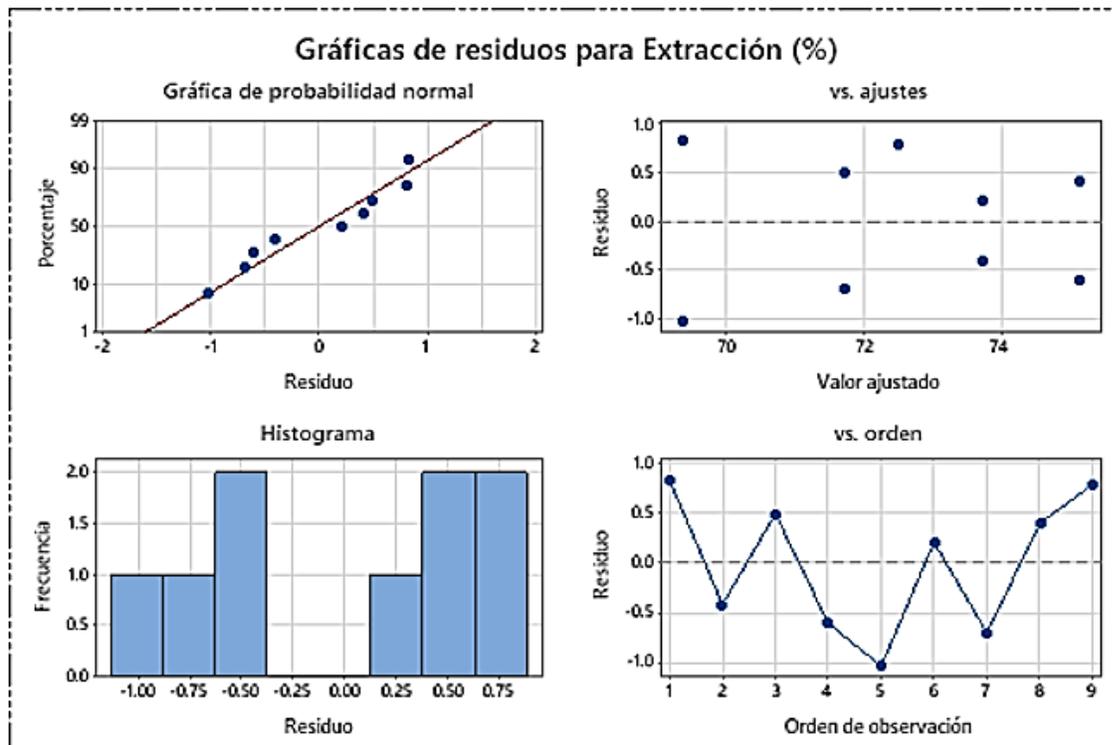
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la incidencia del peróxido de hidrógeno



El diagrama de Pareto muestra que la concentración de H_2O_2 (Factor A) tiene el mayor impacto en la extracción de oro, superando ampliamente el nivel de significancia establecido (2.571). El tiempo de cianuración (Factor B) también es significativo, aunque con menor influencia. Por otro lado, la interacción entre ambos factores (A*B) no resulta significativa, lo que indica que sus efectos son principalmente independientes. Este análisis destaca que la optimización del proceso debe centrarse en ajustar individualmente los niveles de concentración de H_2O_2 y tiempo de cianuración para maximizar la eficiencia en la extracción de oro.

Figura 23:

Grafica de residuos para la extracción de oro

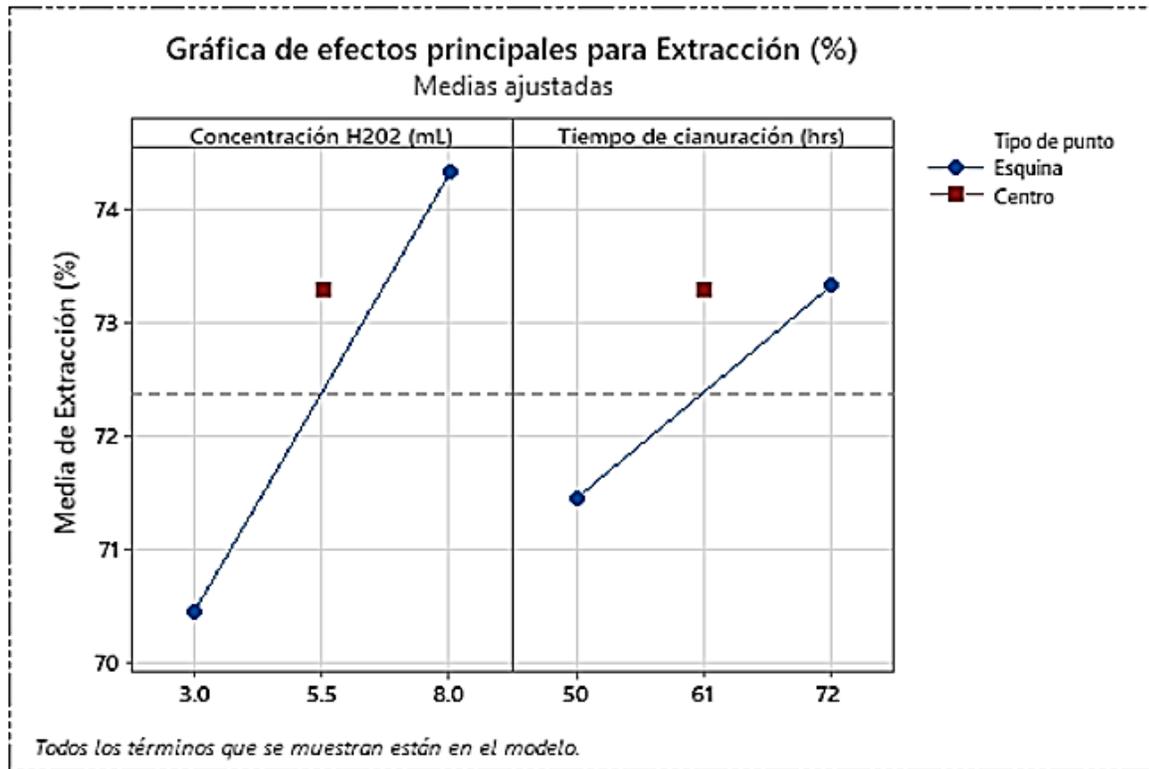


De la figura 23 se muestran el análisis de las gráficas de residuos para la extracción de oro indica que los residuos siguen una distribución aproximadamente normal, como se observa en la gráfica de probabilidad normal y el histograma. No se detectan patrones sistemáticos ni problemas de heterocedasticidad en los residuos frente a los valores ajustados, lo que confirma un buen ajuste del

modelo. Además, los residuos son independientes, como muestra la ausencia de tendencias en la gráfica de residuos vs. orden de observación. Estos resultados validan la idoneidad del modelo estadístico para describir y predecir el comportamiento del proceso de extracción de oro.

Figura 24:

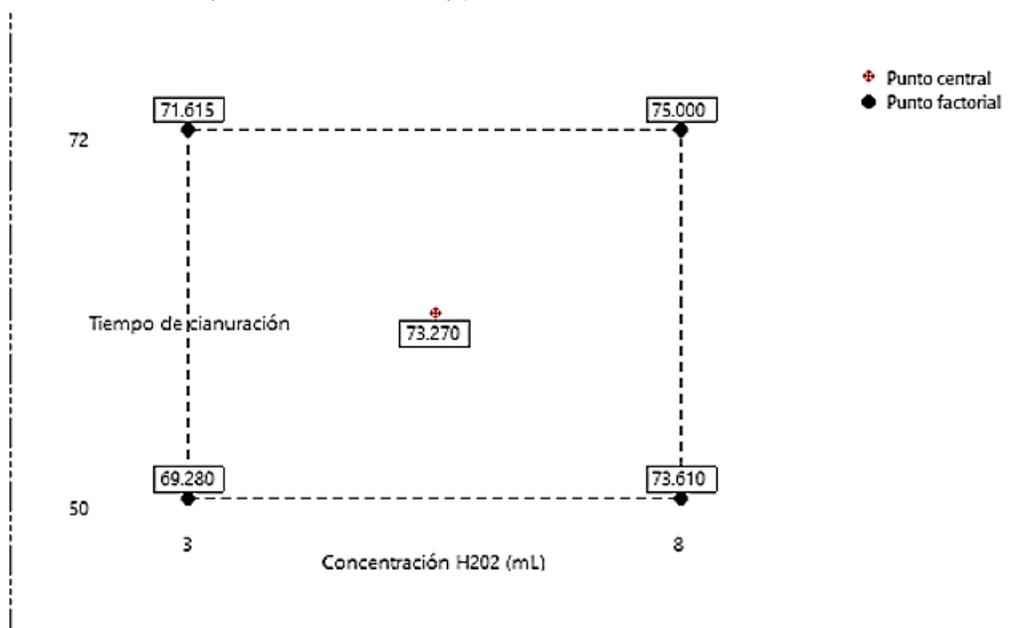
Gráfica de efectos principales para la extracción de oro



En la figura 24 se muestra la gráfica de efectos principales muestra el impacto de las variables "Concentración de H₂O₂ (mL)" y "Tiempo de cianuración (horas)" en la extracción de oro (%). Se observa que la concentración de H₂O₂ tiene un efecto más significativo, con un aumento notable en la extracción al incrementar su valor de 3.0 a 8.0 mL. Por otro lado, el tiempo de cianuración también influye positivamente, aunque en menor medida, mostrando una tendencia creciente en la extracción de 50 a 72 horas.

Figura 25:

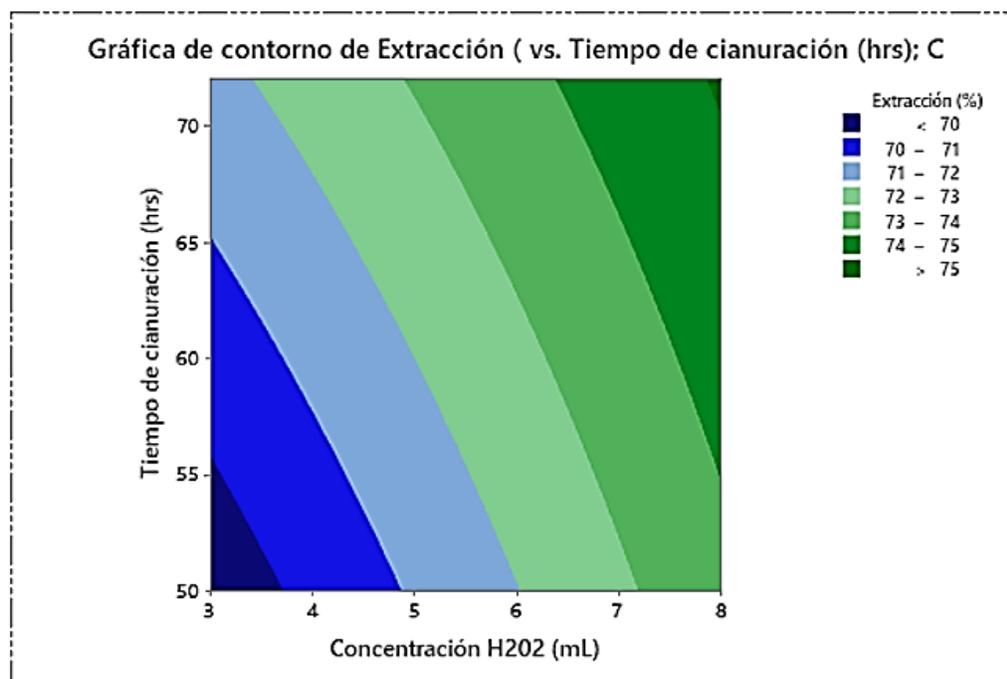
Grafica de cubos (medias de los datos) para extracción de oro



La figura 25 muestra la gráfica de cubos cómo la concentración de H₂O₂ y el tiempo de cianuración afectan la extracción de oro (%). Se observa que la concentración de H₂O₂ es el factor más influyente, ya que un aumento de 3 mL a 8 mL incrementa significativamente la extracción, alcanzando un máximo de 75.000% para 72 horas de cianuración. Aunque el tiempo de cianuración tiene un efecto positivo, su impacto es menor en comparación con la concentración de H₂O₂. El punto central (5.5 mL, 61 horas) muestra un rendimiento intermedio de 73.270%. En conclusión, las condiciones óptimas se logran con una alta concentración de H₂O₂ y tiempos prolongados, siendo la concentración el factor determinante para maximizar la extracción de oro.

Figura 26:

Grafica de gradientes de color para la extracción de oro

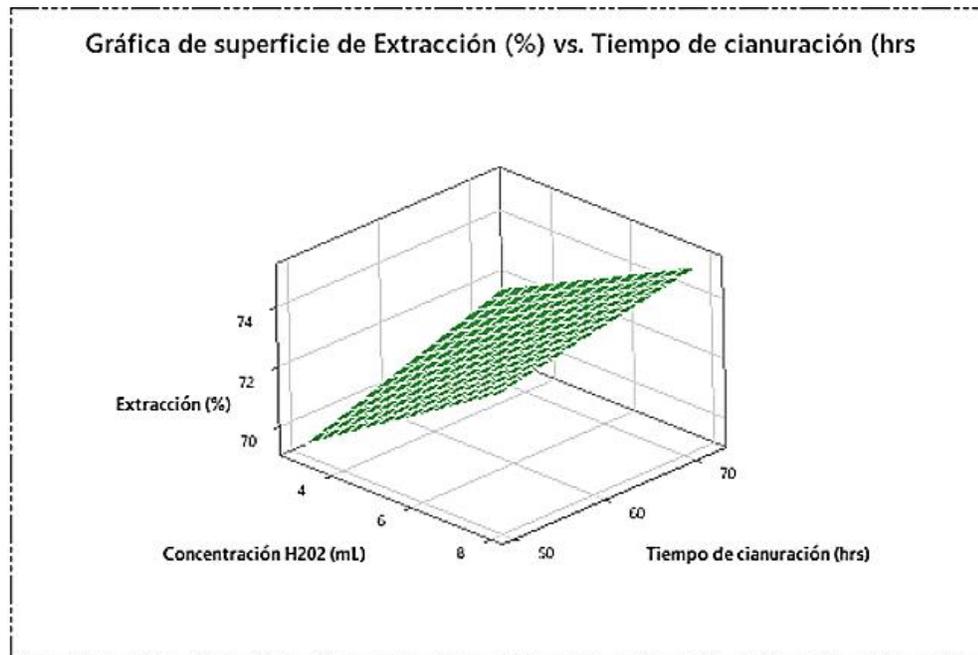


La gráfica de contorno es la ilustración de la relación entre la concentración de H₂O₂ (mL) y el tiempo de cianuración (horas) en la extracción de oro (%). Se observa un gradiente claro donde la extracción incrementa progresivamente al aumentar ambos factores, con regiones más oscuras (verde) indicando mayores porcentajes de extracción superiores al 75%.

La concentración de H₂O₂ tiene un impacto significativo en el proceso, ya que extracciones más altas se logran con valores cercanos a 8 mL. Por otro lado, el tiempo de cianuración contribuye positivamente, pero con un efecto relativamente menor, alcanzando el máximo rendimiento a partir de las 70 horas. La combinación de una alta concentración de H₂O₂ y tiempos prolongados de cianuración asegura condiciones óptimas para maximizar la eficiencia del proceso.

Figura 27:

Gráfica de superficies para la extracción de oro

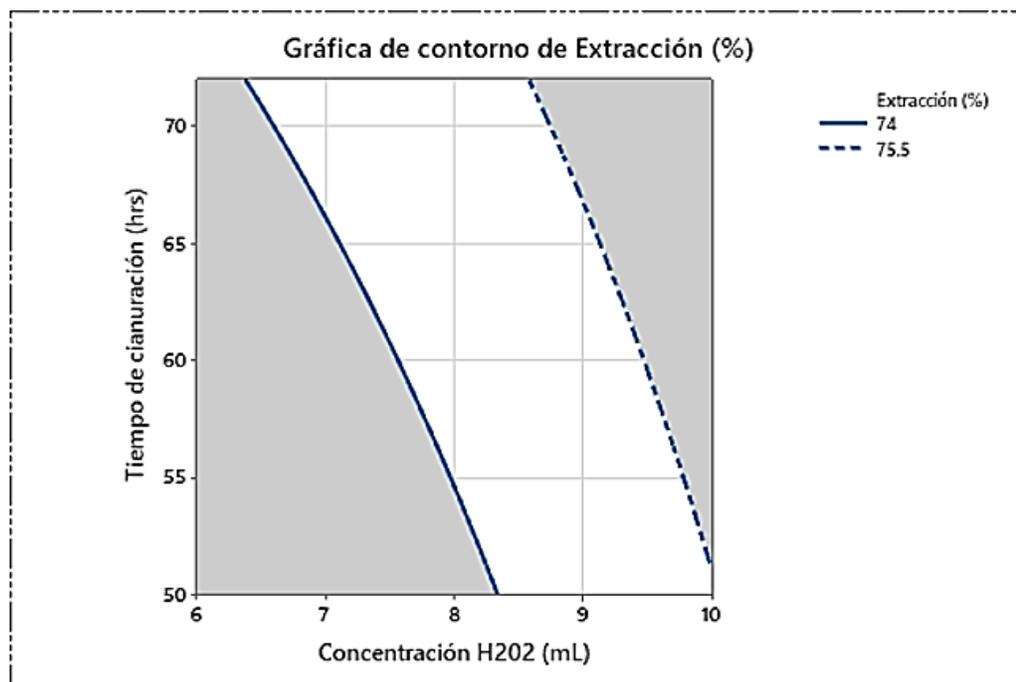


En la gráfica de superficie se describe la relación entre la concentración de H₂O₂ (mL), el tiempo de cianuración (horas) y la eficiencia de extracción de oro (%). Se evidencia una tendencia ascendente en la extracción a medida que ambos factores aumentan, lo cual confirma su impacto positivo en el proceso.

Los niveles más altos de extracción se alcanzan cuando la concentración de H₂O₂ se aproxima a 8 mL y el tiempo de cianuración se extiende hacia las 70 horas, indicando que estas condiciones maximizan la interacción química necesaria para una cianuración eficiente. La superficie inclinada muestra una mayor sensibilidad del proceso a la concentración de H₂O₂ en comparación con el tiempo de cianuración, lo cual resalta que este factor es predominante en el diseño experimental.

Figura 28:

Grafica de contorno para la extracción de oro



La figura 28 se presenta la relación entre la concentración de H_2O_2 (mL) y el tiempo de cianuración (horas) en la extracción de oro, destacando cómo estas variables influyen en el porcentaje de extracción. Las curvas de contorno, representadas por líneas azul sólido y punteado, corresponden a valores de extracción del 74% y 75.5%, respectivamente. La gráfica indica que, a medida que la concentración de H_2O_2 aumenta hacia valores cercanos a 9 mL y el tiempo de cianuración supera las 65 horas, se logra mayor eficiencia en la extracción. La región óptima se encuentra hacia la derecha del contorno punteado, donde las condiciones experimentales sugieren concentraciones de H_2O_2 superiores a 9 mL y tiempos de cianuración cercanos a 70 horas para alcanzar niveles máximos de extracción. Este análisis reafirma la importancia de estas variables en el proceso de cianuración y permite identificar combinaciones óptimas para maximizar la eficiencia del proceso, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en ajustes operativos.

5.3 Interpretación y discusión de resultados

La investigación se centró en el aumento de la extracción de oro de minerales sulfurados de baja recuperación, cuyos resultados en pruebas de laboratorio se encuentran entre el 50 % y el 70 % de extracción. Con la aplicación de peróxido de hidrógeno, utilizando un volumen de 8 mL y un tiempo de 72 horas, se alcanzó una extracción del 75.5 %, obtenida en la prueba experimental N° 8 de un conjunto de 9 pruebas experimentales, con un diseño factorial 2^2 , una réplica en cada punto y un punto central, como se muestra en la tabla 35.

Se identificó que las variables estudiadas tienen significancia en el experimento, lo cual se evidencia en el diagrama de Pareto para los efectos estandarizados. De estas variables, el peróxido de hidrógeno tiene el mayor impacto en la extracción de oro, mientras que el tiempo muestra una significancia menor, pero aún así supera la significancia establecida. Además, se observó que la interacción entre ambos factores, peróxido de hidrógeno y tiempo, no es significativa, lo que indica que ambas variables deben manipularse por separado en los ensayos de laboratorio.

Nuestros resultados son consistentes con los antecedentes revisados, en los cuales se demuestra que la adición de peróxido de hidrógeno incrementa la extracción de oro conforme aumenta su concentración. En este sentido, también es válido aclarar que, a diferencia de las citas bibliográficas, la dependencia entre nuestras variables de estudio no es directamente proporcional. Esto se debe a que pequeños cambios en la concentración del peróxido de hidrógeno provocan cambios considerables en los ensayos de laboratorio. Además, un tiempo prolongado de lixiviación genera una extracción con tendencia lineal, lo que provoca una pérdida de reactivos.

La investigación realizada por Quispe (2020), que empleó peróxido de hidrógeno en la cianuración de oro y plata, demostró que la adición de este agente mejoró la extracción de estos metales, pasando del 88.3 % al 91.0 %, y redujo el tiempo de lixiviación de 96 a 72 horas. Estos resultados fueron

obtenidos en condiciones normales de planta con minerales de blending y recuperaciones adecuadas. Este hallazgo es consistente con el reto de investigar minerales de baja recuperación, en este caso, minerales sulfurados. En nuestra investigación, se logró incrementar la extracción de oro de 65.78 % a 75.5 %, reduciendo el tiempo de operación de 72 a 50 horas.

En comparación con nuestros antecedentes, los resultados de esta investigación difieren principalmente debido a la composición mineralógica y al tiempo de lixiviación. Además, se deben considerar variables no estudiadas, como la temperatura, la disminución del tamaño de partícula y la relación sólido-líquido.

CONCLUSIONES

- Se logro incrementar la extracción de oro con el empleo del proceso de lixiviación con adición de peróxido de hidrógeno de 65.78 % a 75.50 con relación a la cianuración por agitación, obtenida en planta a nivel de laboratorio, en un tiempo de 72 horas, considerando las siguientes variables más influyentes; una concentración de cianuro de sodio de 2000 ppm, granulometría M-200 Tyler de 90 %, pH 11 y aplicando peróxido de hidrógeno igual 8 mL a una concentración de 50%.
- El ciclo de cianuración por agitación, con adición de peróxido de hidrógeno muestra que en un tiempo de 50 horas que se llega a obtener una extracción equivalente a 72 horas de una cianuración convencional, permitiendo reducir tiempo de lixiviación en 22 horas con las que podemos establecer un mejor majeo de variables que permita tratar maximizar el tonelaje de tratamiento.
- A través de un modelo de optimización asumiendo las pruebas experimentales aplicando el diseño factorial 2^2 se encontró un modelo matemático de regresión lineal que permite obtener resultados con error mínimo experimental

$$Y = 60.09 + 1.296 A + 0.1319 B - 0.0086 A*B + 0.894 P$$

Y: extracción de oro
A: peróxido de hidrógeno
B: tiempo
P: punto central
- Se observa la reducción del consumo de cianuro de sodio con la aplicación de peróxido de hidrógeno en comparación al proceso convencional de 8.78Kg/TM a 8.34Kg
- Se acepta la hipótesis planteada por lo que se puede afirmar que a medida que incrementa la concentración de peróxido de hidrógeno se incrementa proporcional la extracción de oro obteniéndose un valor mínimo de 68.35% al usar 3 mL y un valor máximo de 75.5% al usar 8ml de peróxido de hidrógeno.

RECOMENDACIONES

- Investigar que concentración de peróxido de hidrógeno no tiene efecto significativo sobre la extracción del oro.
- Evaluar la incidencia del peróxido de hidrógeno en cianuración por percolación en columnas a nivel de laboratorio.
- Realizar la evaluación económica exhaustiva con el uso de peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación a nivel planta.
- Evaluar la incidencia del peróxido de hidrógeno a diferente granulometría, pH, velocidad de agitación y temperatura
- Estudio de la aplicación de peróxido de hidrógeno en minerales refractarios

BIBLIOGRAFÍA

- Arminta, L., & Vargas, D. N. (2022). *Extraccion de oro del mineral aurifero por lixiviacion en columnas con reactivo bromuro de potasio y acido bromhidrico en la Unidad Minera Utunsa - Anabi - Haquira Apurimac*. Cusco: UNSAAC.
- Aroquipa, J. C. (2019). *Optimizació del proceso de cianuracion mediante el uso de peroxido de hidrogeno en planta metalurgica Chala One S.A.C*. Arequipa: UNSA.
- Beltran, S. (2012). *Cianuracion de minerales auriferos y adsorcion de oro y plata con carbon activado inmovilizado(IAC)*. Escuela Politecnica Nacional, Quito-Ecuador. Obtenido de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4552/1/CD-4170.pdf
- Cardoña, P. V., & Ordoñez, R. (2006). *Estudio de la dilución de oro aplicando el proceso de cianuración, carbón activado por agitación CIP, presente en un mineral de la mina La Palmera del Municipio da Llanada del Departamento de Nariño*. Nariño, Colombia: Universidad de Nariño.
- Chuquiyauri Pomacino, M. N. (2018). *Cianuracion intensiva de concentrados y la recuperacion de oro y plata en minera Poracota S.A. - Arequipa*. Universidad Nacional David Alcides Carrion, Escuela de formacion profesional de Ingenieria Metalurgica, Cerro de Pasco.
- Domic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago.
- Forja, J. L. (2018). *Mejoramamiento dle proceso de extracion del oro y lata usando peróxido de Hidrógeno en la unidad Minera Pucamarca - Minsur - Tacna*. Tacna: UNJBG.
- Garcia, E. M. (2021). *Principios termodinámicos y cinéticos de la cianuración de oro y sus efectos en el proceso*. Universidad Autónoma de Coahuila , Mexico. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/CC66
/principiostermodinamicos.pdf

Gaviria, A. C., Restrepo, O. J., & Bustamante, M. O. (2007). *Hidrometalurgia aplicada, linea de metales preciosos*. Medellin: UNC.

Gomez, J. L., & Morales, M. (2012). *Evaluacion del proceso de lixiviacion por agitacion de Au - Ag en la compañía minera Ares Castilla - Arequipa*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Arequipa.

Guillen, H. M. (2019). *Analisis del proceso PAL en la recuperacion aurifera en la empresa minera Century Gold Mines SAC*. Arequipa: UNSA.

Gutiérrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimntos*. Mexico DF: McGraw-Hill.

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodologia de la investigacion*. SEXTA EDICION. Mexico: Mc GRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Huaco Condori, M. C. (2017). *Evaluacion del porcentaje de disolucion de oro en la lixiviacion con sandioss mediante diseños experimentales*. Universidad Nacional de San Agustin. Arequipa: UNSA.

Huarca, A., & Orlando, M. D. (2023). *Optimización de la concentracion de cianuro y granulometria de inerales en la extraccion del oro por el proceso en lixiviacion en la Empres Minera FIDAMI SA Sancos Ayacucho*. Cusco: UNSAAC.

Leon, D. (2022). *Optimizacion del proceso CIP, mediante variables de concentracion de cianuro,pH y temperatura, en la adsorcion de oro, en la minera Santa Barbara de Trujillo*. Universidad Nacional de Piura, Piura- Peru. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://repositorio.unp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a915efdc-b950-42e7-b63e-c040bd4c2dc0/content

- Lopez, A. S. (2014). *Efecto de la densidad de pulpa y de la concentracion de cianuracion de sodio en la lixiviacion por agitacion para la recuperacion de oro en la planta de beneficio Doble D*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/2813/L%C3%B3pez_Rosello_Arturo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lu, J., Dreisiger, D., & Cooper, W. (2002). *Thermodynamics of the aqueous copper–cyanide system*. Hydrometallurgy.
- MINEM. (2024). *Anuario minero 2023*. Lima: MINEM Promocion Minera.
- Misari, F. S. (2012). *Metalurgia del oro* (Primera edicion ed.). Lima, Peru: San Marcos E.I.R.L.
- Montgomery, D. C. (2017). *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico D.F.: Limusa SA.
- Morales, E. L. (2016). *Extracción de plata y oro del relave sulfurado de la minera Santa Fe por lixiviación con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo*. Lima: UNMSM.
- Navarro, P. (2006). *Hidrometalurgia del oro. Curso: Hidrometalurgia del oro*. Santiago.
- Pelaez, H. M., & Rodriguez, C. M. (2012). *Optimizacion de la lixiviacion de minerales auriferos*. Trujillo: UNT.
- Poblete, R. A. (2019). *Lixiviacion cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto*. Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Santiago-Chile. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47948/3560902038864UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Prieto Uscamayta, P. J. (2020). *Evaluación metalúrgica de la planta aurífera Compañía Minera Chacchulle de la compañía minera Caravelí*. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa: UNSA.
- Quispe, N. M. (2020). *Implementación del proceso para incrementar la recuperación de oro y plata en la joya Minig SAC*. Arequipa: UNSA.
- Ramirez, A. (2016). *Estudio e implementación de una planta de cianuración de oro de una capacidad de 20tmsd*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa- Peru.
- Robles, J. (2019). *Extracción de plata a partir de concentrados de plomo mediante una cianuración con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo*. huancayo: UNCP.
- Rojas, N. R. (2003). *Recuperación de oro y plata desde residuos ferríticos mediante cianuración*. Universidad Concepción, Chile. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfmkaj/http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/1778/1/ TESIS%20RECUPERACION%20DE%20ORO%20Y%20PLATA%20DESDE%20RESIDUOS%20FERRITICOS.Image.Marked.pdf
- Romero, A. A., & Flores, S. L. (2010). *La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación dinámica de minerales alterados*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG , Lima. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/391/334>
- Romero, J. (2020). *Extracción del oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo sandiós del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco - Chumbivilcas, Región Cusco*. Cusco: UNSAAC.
- Rosado, P. E. (2012). *La minería y el cianuro*. Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador - Argentina. Obtenido de https://www.academia.edu/7134297/LA_MINERIA_Y_EL_CIANURO
- Solvay, C. (2019). *MSDS Peróxido de hidrógeno seguridad y manejo*. Bélgica: Solvay.
- Sydney, 2. (2018). *Hoja técnica de peróxido de hidrógeno*. México DF: Sydney.

Troya, M. (1993). *Procesos alternativos de cianuración*. Guayaquil: ESPL.

Vargas, J. (1990). *Metalurgia del oro y la plata*. Lima.

Yana, J. C. (2018). *Optimización del proceso de cianuración de oro en la planta de la Joya minig*. Arequipa: UNSA.

Zevallos, G. G. (2014). *Optimización de la recuperación de oro con el uso del peróxido de hidrógeno a nivel de laboratorio en la mina Arasi SAC*. Arequipa: UNAP.

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: “CIANURACIÓN POR AGITACIÓN DEL ORO CONTENIDO EN MINERALES SULFURADOS USANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE – PLANTA DE BENEFICIO ESPAÑOLITA S.A.C – CHALA – AREQUIPA”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><u>Problema general</u> ¿Se logrará incrementar la extracción de oro contenido en minerales sulfurados por el proceso de cianuración por agitación con la adición de peróxido de hidrógeno como agente oxidante en la Planta de Beneficio Españolita SAC, Chala, Arequipa?</p> <p><u>Problemas específicos</u> PE1 ¿Cuál será la concentración de peróxido de hidrógeno que permita incrementar la extracción de oro por el método de cianuración por agitación contenido de minerales sulfurados? PE2 ¿Cuál será el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro con la adición de peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación contenido de minerales sulfurados?</p>	<p><u>Objetivo general</u> Incrementar la extracción del oro contenido en minerales sulfurados mediante la adición del peróxido de hidrógeno como agente oxidante por el proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio Españolita S.A.C, Chala, Arequipa.</p> <p><u>Objetivos específicos</u> OE1 Determinar la concentración de peróxido de hidrógeno que permita incrementar la extracción de oro por el método de cianuración por agitación contenido en minerales sulfurados. OE2 Determinar el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro con la adición de peróxido de hidrógeno en la cianuración por agitación contenido en minerales sulfurados.</p>	<p><u>Hipótesis general</u> La extracción de oro se incrementa con el uso de peróxido de hidrogeno como agente oxidante en el proceso de cianuración por agitación de oro contenido en minerales sulfurados en la Planta de Beneficio Españolita S.A.C.</p> <p><u>Hipótesis específicas</u> HE1 El peróxido de hidrógeno incrementa la extracción de oro contenido en los minerales sulfurados por el método de cianuración por agitación. HE2 El tiempo de cianuración tiene un efecto significativo en la recuperación de oro cuando se adiciona peróxido de hidrógeno, en la extracción de oro de minerales sulfurados.</p>	<p><u>Variables dependientes</u> Porcentaje de extracción de oro en minerales sulfurados.</p> <p><u>Variables independientes</u> Concentración de peróxido de hidrógeno Tiempo de cianuración</p>	<p>Tipo de investigación: Correlacional, explicativo, descriptivo</p> <p>Diseño de investigación: Experimental</p> <p>Población y muestra: 118290 Kg de mineral sulfurado como poblacion. 80 kg de muestra</p> <p>Técnica: La técnica de muestreo aplicado será el probabilístico por conveniencia</p> <p>Métodos de análisis de datos: Software Microsoft Excel para la elaboración de los balances metalúrgicos.</p>

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2: CONSUMOS DE REACTIVO

Consumo de reactivo de las pruebas preliminares

Prueba con NaCN al 0.3%, pH 11 y tiempo 72 horas

	Parámetros		Tiempo	pH	Adición NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN (%)	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra (g)	Vol. H ₂ O (ml)											
90.00% - 200 M	350	758	0	7	1.3	0	0.2	0	0	0	0	8.78	4.57
			1 hora	11	0	1.4	0.07	0.99	0.99	1 hora	2.812		
			6 horas	10.8	0.3	1.9	0.095	0.8	1.78	5 horas	5.084		
			12 horas	11	0	2.3	0.115	0.64	2.43	12 horas	6.924		
			24 horas	11	0	2.8	0.14	0.46	2.88	24 horas	8.223		
			36 horas	11	0	3.7	0.185	0.11	3	36 horas	8.551		
			48 horas	11	0	3.8	0.19	0.08	3.07	50 horas	8.77		
			72 horas	11	0	4	0.2	0	3.07	62 horas	8.774		
							1.6		3.08				

Prueba con NaCN al 0.3%, pH 11 y tiempo 72 horas

	Parámetros		Tiempo	pH	Adición NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN (%)	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra (g)	Vol. H ₂ O (ml)											
90.00% - 200 M	350	758	0	7	1.3	0	0.3	0	0	0	0	9.33	4.57
			1 hora	11	0	2.1	0.105	1.48	1.48	1 hora	4.218		
			6 horas	11	0	3.8	0.19	0.83	2.31	5 horas	6.6		
			12 horas	10.8	0.3	4.8	0.24	0.46	2.77	12 horas	7.901		
			24 horas	11	0	5.4	0.27	0.23	3	24 horas	8.554		
			48 horas	11	0	5.6	0.28	0.15	2.15	36 horas	8.991		
			36 horas	11	0	5.8	0.29	0.08	3.23	50 horas	9.212		
			72 horas	11	0	5.9	0.295	0.04	3.27	62 horas	9.325		
							1.6		3.27				

Consumo de reactivo con la adición de H₂O₂

Prueba con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 72 horas y H2O2=3ml

	Parámetros		Tiempo	pH	Adición NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)	
	Peso Muestra g	Vol. H ₂ O ml												
90.00% - M200	350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.24	4.57	
			1 hora	11.00	0.00	1.80	0.090	0.83	0.83	1 hora	2.380			
			5 horas	10.80	0.30	2.00	0.100	0.76	1.59	5 horas	4.544			
			12 horas	11.00	0.00	2.30	0.115	0.64	2.24	12 horas	6.384			
			24 horas	11.00	0.00	3.40	0.170	0.23	2.46	24 horas	7.035			
			36 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.54	36 horas	7.254			
			50 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.73	50 horas	7.798			
			62 horas	11.00	0.00	3.70	0.185	0.11	2.85	62 horas	8.125			
			72 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.0	2.89	72 horas	8.237			
							1.60		2.89					

Prueba N02 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 72 horas y H2O2=8ml

	Parámetros		Tiempo	pH	Adición NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)	
	Peso Muestra g	Vol. H ₂ O ml												
90.00% - M200	350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.34	4.57	
			1 hora	11.00	0.00	1.50	0.075	0.95	0.95	1 hora	2.704			
			5 horas	10.80	0.30	1.80	0.090	0.83	1.78	5 horas	5.084			
			12 horas	11.00	0.00	2.40	0.120	0.61	2.39	12 horas	6.816			
			24 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.58	24 horas	7.359			
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.62	36 horas	7.471			
			50 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.81	50 horas	8.014			
			62 horas	11.00	0.00	3.70	0.185	0.11	2.92	62 horas	8.341			
			72 horas	11.00	0.00	4.00	0.200	0.0	2.92	72 horas	8.345			
							1.60		2.92					

Prueba N03 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 50 horas y H2O2=3ml

	Parámetros		Tiempo	pH	Adición NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H ₂ O ml											
90.00% - M200	350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	7.70	4.57
			1 hora	11.00	0.00	1.60	0.080	0.91	0.91	1 hora	2.596		
			5 horas	10.80	0.30	1.80	0.090	0.83	1.74	5 horas	4.976		
			12 horas	11.00	0.00	2.50	0.125	0.57	2.31	12 horas	6.600		
			24 horas	11.00	0.00	3.60	0.180	0.15	2.46	24 horas	7.035		
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.50	36 horas	7.146		
			50 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.69	50 horas	7.690		
				1.60		2.70							

Prueba N04 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 50 horas y H2O2=8ml

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	7.91
			1 hora	11.00	0.00	1.20	0.060	1.06	1.06	1 hora	3.028		
			5 horas	11.00	0.00	1.80	0.090	0.83	1.89	5 horas	5.408		
			12 horas	11.00	0.00	2.50	0.125	0.57	2.46	12 horas	7.032		
			24 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.65	24 horas	7.575		
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.69	36 horas	7.687		
			50 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.77	50 horas	7.906		
					1.30			2.77					

Prueba N05 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 62 horas y H2O2=5.5ml

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.02
			1 hora	11.00	0.00	1.30	0.065	1.02	1.02	1 hora	2.920		
			5 horas	11.00	0.00	1.80	0.090	0.83	1.86	5 horas	5.300		
			12 horas	10.90	0.01	2.50	0.125	0.57	2.43	12 horas	6.924		
			24 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.62	24 horas	7.467		
			36 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.69	36 horas	7.687		
			50 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.77	50 horas	7.906		
			62 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.81	62 horas	8.017		
					1.31			2.81					

Prueba N06 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 72 horas y H2O2=3ml (2)

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.13
			1 hora	11.00	0.00	1.60	0.080	0.91	0.91	1 hora	2.596		
			5 horas	10.80	0.30	2.00	0.100	0.76	1.67	5 horas	4.760		
			12 horas	11.00	0.00	2.30	0.115	0.64	2.31	12 horas	6.600		
			24 horas	11.00	0.00	3.40	0.170	0.23	2.54	24 horas	7.251		
			36 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.62	36 horas	7.471		
			50 horas	11.00	0.00	3.70	0.185	0.11	2.73	50 horas	7.798		
			62 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.81	62 horas	8.017		
			72 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.0	2.85	72 horas	8.129		
					1.60			2.85					

Prueba N07 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 72 horas y H2O2=8ml (2)

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.56
			1 hora	11.00	0.00	1.70	0.085	0.87	0.87	1 hora	2.488		
			5 horas	10.80	0.30	1.80	0.090	0.83	1.71	5 horas	4.868		
			12 horas	11.00	0.00	2.40	0.120	0.61	2.31	12 horas	6.600		
			24 horas	11.00	0.00	2.80	0.140	0.46	2.77	24 horas	7.899		
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.81	36 horas	8.011		
			50 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.88	50 horas	8.230		
			62 horas	11.00	0.00	3.70	0.185	0.11	3.00	62 horas	8.558		
			72 horas	11.00	0.00	4.00	0.200	0.0	3.00	72 horas	8.561		
					1.60			3.00					

Prueba N08 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 50 horas y H2O2=3ml

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	7.26
			1 hora	11.00	0.00	1.20	0.060	1.06	1.06	1 hora	3.028		
			5 horas	10.80	0.30	2.30	0.115	0.64	1.71	5 horas	4.868		
			12 horas	11.00	0.00	2.50	0.125	0.57	2.27	12 horas	6.492		
			24 horas	11.00	0.00	3.60	0.180	0.15	2.43	24 horas	6.927		
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.47	36 horas	7.038		
			50 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.54	50 horas	7.258		
					1.60			2.55					

Prueba N09 con NaCN al 0.2%, pH 11, tiempo 50 horas y H2O2=8ml

90.00% - M200	Parámetros		Tiempo	pH	Adicion NaOH	Gasto AgNO ₃ (ml)	Fza NaCN %	Consumo NaCN (g) - reposición	Acumulado (g) NaCN	Tiempo	Acum (kg/Tm) NaCN	NaCN TOTAL (kg/Tm)	NaOH TOTAL (kg/Tm)
	Peso Muestra g	Vol. H2O ml											
		350	758	0	7.00	1.30	0.00	0.200	0.00	0.00	0	0.000	8.02
			1 hora	11.00	0.00	1.00	0.050	1.14	1.14	1 hora	3.244		
			5 horas	11.00	0.00	1.80	0.090	0.83	1.97	5 horas	5.624		
			12 horas	11.00	0.00	2.60	0.130	0.53	2.50	12 horas	7.140		
			24 horas	11.00	0.00	3.50	0.175	0.19	2.69	24 horas	7.683		
			36 horas	11.00	0.00	3.90	0.195	0.04	2.73	36 horas	7.795		
			50 horas	11.00	0.00	3.80	0.190	0.08	2.81	50 horas	8.014		
					1.30			2.81					

ANEXO 3. LISTA DE LOTES QUE SE OBTUVO LA MUESTRA PARA LA INVESTIGACIÓN

LOTE	TIPO	PESO HÚMEDO (TMH)	HUMEDAD (%)	PESO SECO (TMS)	LEY (Oz/TC)	LEY (g/TM)	RECUPERACIÓN METALÚRGICA (%)	PROCEDENCIA
1	MINERAL SULFURADO	1.49	10.14	1.34	0.75	25.78	32.00	PROYECTO MINERO LUCIANA I COLQUEMARCA CHUMBIVILCAS CUSCO
2	MINERAL SULFURADO	22.65	1.54	22.30	0.12	4.22	60.00	CRISTOFORO 15 CHAPARRA CARAVELI
3	MINERAL SULFURADO	24.97	7.20	23.17	0.26	8.98	60.00	LLUSCO COLQUEMARCA CHUMBIVILCA
4	MINERAL SULFURADO	21.35	10.73	19.06	0.30	10.11	60.00	CEP 34 CHALHUANCA AYMARES AP
5	MINERAL SULFURADO	1.86	1.62	1.83	0.43	14.88	58.00	SANTIAGO DE COMPOSTELA A ATICO CARAVELI AREQUIPA
6	MINERAL SULFURADO	5.72	1.61	5.63	0.52	17.76	75.00	SANTIAGO DE COMPOSTELA A ATICO CARAVELI AREQUIPA
7	MINERAL SULFURADO	11.59	2.32	11.32	0.31	10.66	76.00	MINA ROSARIO 2 COLQUEMARCA CHU
8	MINERAL SULFURADO	1.13	3.78	1.09	0.63	21.66	65.00	SA3001 COLQUEMARCA CHUMBIVILCA
9	MINERAL SULFURADO	1.65	7.04	1.53	1.43	48.86	76.00	CEP 34 CHALHUANCA AYMARES AP
10	MINERAL SULFURADO	1.44	2.20	1.41	0.43	14.81	78.00	MINERA CERRO DE ORO CAHUACHO CARAVELI AREQUIPA
11	MINERAL SULFURADO	16.01	1.56	15.76	0.15	5.01	75.00	CRISTOFORO 15 CHAPARRA CARAVELI
12	MINERAL SULFURADO	14.08	1.61	13.85	0.16	5.52	77.00	MINA ROSARIO 2 COLQUEMARCA CHU
SUMATORIA		123.94	51.35	118.29				
PROMEDIO		10.33	4.28	9.86	0.46	15.68	65.00	

ANEXO 4. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA

Peso Fiola	Peso Mineral	Peso Fiola + Agua	Peso Fiola + Agua +	Peso Agua Inicial	Peso Fiola + Mineral	Peso Agua Final	Volumen Mineral	Gr. Sp. (gr/ml)
60.79	10.00	168.47	175.00	107.68	70.79	104.21	3.47	2.88

ANEXO 5. FICHA DE SEGUIMIENTO DE REPORTE DE ANÁLISIS DE SOLUCIÓN Y RELAVE



MINERA ESPAÑOLITA DEL SUR S.A.

LABORATORIO QUÍMICO

RUC: 20455296812

CERTIFICADO DE ENSAYO
LQ-2024-009-1150

A SOLICITUD:	WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
POR CUENTA DE:	WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Pulpa de Au.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Reconocimiento Solido-Solución-Mineral-Au
CANTIDAD DE MUESTRAS:	02.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En bolsa sellada -Pulpa. Peso Aprox.(350g)
FECHA DE RECEPCION:	15-08-2024
FECHA DE REPORTE:	16-08-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:

LQ-PR-13-DETERMINACION DE SOLUCION GANURADA Au-
POR ABSORCION ATOMICA
LQ-PR-15-DETERMINACION DE ORO POR
RECONOCIMIENTO- GRAVIMETRIA.

DETALLE DEL INFORME

ITEM	CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	SOLIDO		LIQUIDO
		METODO	LQ-PR-15	LQ-PR-15	LQ-PR-13
		UNIDAD	Oz/Tc	g/Tm	gr/m ³
		RECONOCIMIENTO	Ley Au	Ley de Au	Ley de Au
01	PM-1	PULPA DE AU	0.150	5.143	4.571
02	PM-2	PULPA DE AU	0.153	5.246	4.933



Ing. Moisés Moisés Frey
JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO
DIP:187812

 Panamericana Sur Km. 616 - Quebrada Huanca
Chala - Caraveli - Arequipa

 959800399 / 950548350 / 993053223

 054-296472

 labquim@medsursa.com



MINERA ESPAÑOLITA DEL SUR S.A.

LABORATORIO QUÍMICO

RUC: 20455296812

CERTIFICADO DE ENSAYO
LQ-2024-009-1151

A SOLICITUD: WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
POR CUENTA DE: WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
PRODUCTO DESCRITO COMO: Pulpa de Au.
TIPO DE ANALISIS: Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS: Reconocimiento Solido-Solución-Mineral-Au
CANTIDAD DE MUESTRAS: 04.
DESCRIPCION DE RECEPCION: En bolsa sellada -Pulpa.
 Peso Aprox.(350g)
FECHA DE RECEPCION: 15-09-2024
FECHA DE REPORTE: 16-09-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: LQ-PR-13-DETERMINACION DE SOLUCION CIANURADA Au-
 POR ABSORCION ATOMICA
 LQ-PR-15-DETERMINACION DE ORO POR
 RECONOCIMIENTO- GRAVIMETRIA.

DETALLE DEL INFORME

ITEM	CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	SOLIDO		LIQUIDO
		METODO	LQ-PR-15	LQ-PR-15	LQ-PR-13
		UNIDAD	Oz/Tc	gr/Tm	gr/m ³
		RECONOCIMIENTO	Ley Au	Ley de Au	Ley de Au
1	PMH-1	PULPA DE AU	0.132	4.526	5.437
2	PMH-2	PULPA DE AU	0.129	4.423	4.819
3	PMH-3	PULPA DE AU	0.116	3.977	5.666
4	PMH-4	PULPA DE AU	0.114	3.943	5.004


 Ing. Moisés Ylla Moisés Freidy
 QUANTUM SA SET DE LABORATORIO QUIMICO
 CP:15/812

 Panamericana Sur Km. 616 - Quebrada Huanca
 Chala - Caraveli - Arequipa
 959800399 / 950548350 / 993053223
 054-296472
 labquim@medsursa.com



MINERA ESPAÑOLITA DEL SUR S.A.

LABORATORIO QUÍMICO

RUC: 20455296812

CERTIFICADO DE ENSAYO LQ-2024-009-1152

A SOLICITUD:	WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
POR CUENTA DE:	WILMER HUAMAN CCOTOHUANCA
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Pulpa de Au.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Reconocimiento Solido-Solución-Mineral-Au 05.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	En bolsa sellada -Pulpa.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	Peso Aprox.(350g)
FECHA DE RECEPCION:	15-09-2024
FECHA DE REPORTE:	16-09-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:	LQ-PR-13-DETERMINACION DE SOLUCION CIANURADA Au- POR ABSORCION ATOMICA LQ-PR-15-DETERMINACION DE ORO POR RECONOCIMIENTO- GRAVIMETRIA.
--------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

DETALLE DEL INFORME

ITEM	CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	SOLIDO		LIQUIDO
		METODO	LQ-PR-15	LQ-PR-15	LQ-PR-13
		UNIDAD	Oz/Tc	gr/Tm	gr/m ³
		RECONOCIMIENTO	Ley Au	Ley de Au	Ley de Au
1	PMR-1	PULPA DE AU	0.127	4.354	5.518
2	PMR-2	PULPA DE AU	0.125	4.286	4.856
3	PMR-3	PULPA DE AU	0.141	4.834	4.826
4	PMR-4	PULPA DE AU	0.114	3.908	5.279
5	PMR-5	PULPA DE AU	0.123	4.217	5.526


Ing. Mejía Ylo Moisés Fredy
 JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO
 CP-157812

 Panamericana Sur Km. 616 - Quebrada Huanca
 Chala - Caraveli - Arequipa
 959800399 / 950548350 / 993053223
 054-296472
 labquim@medsursa.com

ANEXO 6 : CARACTERIZACIÓN DE MINERAL A ESTUDIAR

Caracterización del mineral



Fot. N° 001 Se observa la presencia de cuarzo hialino en escala menor, más el cuarzo lechoso es más abundante, presencia de arsenopirita en alto porcentaje de color blanco irregular, la pirita micro granulas, esporádicamente se observó la pirita octagonal, limonita esta entre jarosita y goethita

[Handwritten signature]



Fot. N° 002 Se observa la presencia de cuarzo hialino en escala menor, más el cuarzo lechoso es más abundante, presencia de arsenopirita en alto porcentaje de color blanco irregular, la pirita micro granulas se observa de color rojizo, limonita esta entre jarosita y goethita



Fot. N° 003 Se observa la mayor presencia de arsenopirita en alto porcentaje de color blanco irregular, la pirita micro granulas muy esporádico al igual que la pirita bien cristalizada, limonita esta entre jarosita y goethita

En % de minerales existentes en la muestra.

Mineral valor económico	Porcentaje
Pirita micro granular	2%
Pirita octagonal	0.5%
Arsenopirita	3%
Magnetita	0.4%
Galena	0.6%
Material de ganga	Porcentaje
Cuarzo hialino	0.5%
Cuarzo lechoso	1%
Jarosita	0.5%
Goethita	0.5%
Hematita	0.5
Plagioclasa	0,5

Cusco, 14 de mayo del 2024


 Mgt. Elias Macrobid Espinoza Cardenas

ANEXO 7: CONSTANCIA DE DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

	Tipo de Documento: Informe Interno	Código de Formato: ME.002.DI25/Enero.2025 Versión: 01
	Minera Española del Sur S.A. – MEDSURSA Panamericana Sur Km 616, Quebrada Huanca, Chala - Caravelí - Arequipa	

INFORME INTERNO

INFORME N° 015-2025-PLANTA/MEDSURSA	Fecha: 02/04/2025
Asunto	CONSTANCIA DE HABER DESARROLLADO LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN NUESTRA UNIDAD

De **ING. VÍCTOR A. SALAZAR ASENCIO** **JEFE DE PLANTA**
Con CIP: **175757**

En el presente informe, hago constatar que los bachilleres Aldo Sabino Flores Sapacayo y Ocran Wilner Huaman Ccotohuanca, desarrollaron las pruebas experimentales para la tesis titulada **“Cianuración por agitación del oro contenido en minerales sulfurados usando peróxido de hidrógeno como agente oxidante – planta de beneficio “ La Encañada” de Minera Española del Sur S.A.**

Se constata que ambos hicieron uso de los equipos y materiales necesarios en el área de muestreo, polveo y laboratorio metalúrgico de nuestra unidad minera Española del Sur S.A. haciendo uso de las áreas mencionadas fuera el horario de turno de trabajo.

Así mismo, destacar que el Sr. Ocran Wilner Huaman Ccotohuanca viene actualmente laborando en nuestra empresa hace mas de un año, desempeñándose como **Asistente Jefe de Planta.**

La solicitud se les brinda a los interesados, con el fin de contribuir en el crecimiento profesional, en vista de que el trabajo de investigación es de gran aporte para la empresa el optimizar la extracción de oro de los minerales acopiados que son nuestra materia prima.

ATTE:


MINERA ESPAÑOLA DEL SUR S.A.
RUC: 204850993
ING. VÍCTOR A. SALAZAR ASENCIO
CIP: 175757
JEFE DE PLANTA

DNI:40024734