

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



---

**TESIS**

---

**“EXTRACCIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR  
AGITACIÓN EN LA MINERA ARTESANAL SAN LUCAS”**

**(Investigación Tecnológica)**

---

PRESENTADO POR:

Br. DAVID LEVA HOLGUIN

Br. TONNY HENRY PUMACAYO CRUZ

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALÚRGICO

ASESOR:

Ing. PORFIRIO CARRASCO TAPIA

CUSCO – PERÚ  
2024

# INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: "Extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación en la minera artesanal san Lucas" (Investigación Tecnológica)

presentado por: David Leva Holguin con DNI Nro.: 47946183

presentado por: Tony Henry Pomacayo Cruz con DNI Nro.: 72466838

para optar el título profesional/grado académico de Ingeniería Metalúrgica

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9%.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	9
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 21 de Enero de 2025



Firma

Post firma: Porcilio Carrasco Tapia

Nro. de DNI: 24002881

ORCID del Asesor: 0000-0002-4360-9866

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: Old: 27259:422333632

# David Leva H y Tonny Pumacayo

## Extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación\_pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:422333632

166 Páginas

Fecha de entrega

21 ene 2025, 8:51 a.m. GMT-5

27,633 Palabras

Fecha de descarga

21 ene 2025, 9:00 a.m. GMT-5

144,343 Caracteres

Nombre de archivo

Extracción de oro mediante el proceso de cianuración por agitación..pdf

Tamaño de archivo

8.0 MB

# 9% Similitud general

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

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

## Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

## **PRESENTACION**

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGIA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO

De acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, les presentamos el trabajo de investigación intitulado:

**“EXTRACCIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN EN LA MINERA ARTESANAL SAN LUCAS.”**

*(Investigación tecnológica)*

El objetivo es extraer oro mediante cianuración por agitación en la minera San Lucas del Consorcio Ccochasayhuas-Progreso-Grau-Apurímac.

**Leva Holguin, David**

**Pumacayo Cruz, Tonny Henry**

## RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo por objetivo optimizar la extracción de oro mediante cianuración por agitación en la minera artesanal San Lucas, ubicado en departamento Apurímac. La cual, actualmente extrae el mineral de oro; primero pasando por un proceso de molienda en un molino de bolas de propiedad de la empresa, alcanzado un tamaño de aproximadamente -150 malla, luego se le amalgama con mercurio líquido, a continuación, el oro extraído es separado del mercurio y el relave es acopiado en las zonas destinadas para tal. En este estudio de investigación se describen los antecedentes y las características del proceso de cianuración por agitación por tal motivo se evaluó la viabilidad de utilizar el proceso de cianuración como una alternativa para la extracción de oro en la región. Teniendo como hipótesis que el proceso de cianuración nos permitirá obtener extracciones mayores al 95%, para esto se llevaron a cabo experimentos en laboratorio utilizando un diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales. Los resultados preliminares indicaron que las variables más significativas son el porcentaje de sólidos en la pulpa, la concentración del reactivo (cianuro de sodio) y el pH del proceso, los cuales han tenido de mayor significancia en la realización las pruebas. Según los resultados encontrados en la parte experimental se concluyó que, el mayor porcentaje de extracción se encuentra en las pruebas centrales, alcanzando la máxima extracción de oro un 95.5%, donde las variables que tienen más influencia fueron una concentración de cianuro de 0.75% y un pH de 10.5.

El modelo matemático hallado según los resultados, es el siguiente:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 0.279Z_1 + 8.020Z_2 + 4.235Z_3$$

Palabras claves: cianuración por agitación, extracción del oro.

## ABSTRACT

This research aimed to optimize gold extraction through agitation cyanidation at the San Lucas artisanal mine, located in the Apurímac region. Currently, the mine extracts gold ore by first grinding it in a ball mill owned by the company, achieving a particle size of approximately - 150 mesh. The ore is then amalgamated with liquid mercury, after which the extracted gold is separated from the mercury, and the tailings are collected in designated areas. This study describes the background and characteristics of the agitation cyanidation process. As part of the research, the feasibility of using cyanidation as an alternative method for gold extraction in the region was evaluated. The hypothesis proposed that the cyanidation process would yield extraction rates greater than 95%. Laboratory experiments were conducted using a 2K factorial design with central points. Preliminary results indicated that the most significant variables were the percentage of solids in the pulp, the concentration of the reagent (sodium cyanide), and the pH of the process, which had the greatest influence during the tests.

Based on the experimental results, it was concluded that the highest extraction percentage was achieved in the central tests, reaching a maximum gold extraction rate of 95.5%. The most influential variables were a cyanide concentration of 0.75% and a pH of 10.5.

The mathematical model derived from the results is as follows:

:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 0.279Z_1 + 8.020Z_2 + 4.235Z_3$$

Keywords: agitation cyanidation, % gold extraction.

## INTRODUCCION

Actualmente, la minería extractiva del oro enfrenta desafíos globales en cuanto a obtener el metal precioso de una manera económica y eficiente. Aunque se han utilizado diversos reactivos que cumplen con los requisitos, aún persisten prácticas tradicionales en algunas minas artesanales que siguen utilizando mercurio para la extracción del oro. Esta técnica no solo causa daños ambientales, sino que también resulta en una menor recuperación del metal.

El proceso de cianuración por agitación es importante porque nos ha llevado a la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías con mayor urgencia y frecuencia. Se han creado diversos métodos para tratar minerales auríferos, adaptados al tipo de mineral y su composición., aunque hoy en día se somete a pretratamiento a cualquier tipo de mineral y se puede usar el proceso de extracción que uno vea más por conveniente. El uso de cianuro en la extracción de oro se considera una opción viable, ya que, en comparación con el mercurio, es menos tóxico, más económico y se puede regenerar fácilmente. Asimismo, su impacto ambiental se puede minimizar utilizando ozono o cloro.

Así, esta investigación tecnológica se centra en el uso de cianuro de sodio para la extracción de oro a través del método de agitación mediante el cual se desea obtener recuperaciones mayores al 90% haciendo que la granulometría sea constante en 80% pasante de la malla 200, con una concentración de cianuro que varía entre 0.5 a 1.0 g/l CN, el porcentaje de sólidos este entre los rangos de 25 y 35%, con un control de pH entre los rangos de 10 a 11. Con el propósito de evaluar si el cianuro puede sustituir al mercurio y establecer el porcentaje máximo de extracción de oro en la mina artesanal San Lucas. Las limitaciones que se encontró son la falta de caracterización del mineral liberado mediante la evaluación de mallas valoradas en la cabeza de mineral, relave y la falta de equipos de medición como el phmetro, balanza de precisión, DRX, microscopia óptica.

## DEDICATORIA I

Dedico esta tesis a Dios, quien ha sido la mayor fuente de inspiración, guiando mi espíritu hasta la finalización de este trabajo y otorgándome la salud, crucial para conseguir mis objetivos.

A mis padres, Teodoro Leva y Aleja Holguín, los que me brindaron la vida, la educación, el apoyo, los consejos y el estímulo necesarios para finalizar esta tesis. A mi hermano y hermanas, Amílcar, Jessica y Sandra, gracias a su constante presencia y apoyo incondicional.

A mi compañera de vida, María Taipe, por bendecirme con una hija maravillosa, y a mi adorada Sahily Aine, quienes son el pilar fundamental que me motiva a seguir adelante y a perseverar en la consecución de mis metas

A mis docentes, por guiarme no solo en los aspectos técnicos de los procesos, sino también en los valores éticos fundamentales para ejercer mi profesión con integridad. A mis compañeros y amigos, con quienes viví experiencias únicas y memorables a lo largo de nuestra trayectoria.

Leva Holguín, David

## DEDICATORIA II

Dedico esta tesis para mis amados papas, Yolanda y Odilon. Este éxito académico es el resultado del esfuerzo constante que han puesto en darme una educación de calidad. Cada dedicación que han ofrecido, cada jornada laboral junto con cada decisión tomada para mi beneficio es la base de mi logro. Su entrega y compromiso con mi formación son un obsequio invaluable. Este trabajo es un homenaje a su sacrificio y cariño, es un honor para mí rendirles homenaje de esta manera. Gracias por ser las luces que han guiado mi trayecto hacia el saber y por enseñarme a valorar el esfuerzo. Les expreso mi amor con todo mi corazón.

A mi esposa Irma Natividad y mi hijo Thiago, quienes han sido mi ancla en los días difíciles y mi fuente de sonrisas en los momentos felices. Ustedes son la fuerza que me impulsa a seguir mejorando y alcanzar mis objetivos. Estoy agradecido por todo su amor y apoyo.

A los docentes, quienes fueron parte fundamental en mi desarrollo profesional, gracias por su empeño de educar e instruir para la formación de profesionales de éxito.

A mi asesor que siempre tuvo la predisposición de guiarnos con su experiencia y sabiduría.

A mis compañeros de trabajo, compañeros de estudio quienes se convirtieron con el tiempo más que amigos en familia con quienes compartimos momentos únicos a lo largo de nuestras vidas.

Pumacayo Cruz, Tonny Henry

## AGRADECIMIENTO

Primero, queremos expresar nuestro agradecimiento a Dios por sus bendiciones y por todo lo que ha hecho y continúa haciendo en nuestras vidas.

A la prestigiosa Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por ser nuestra alma mater.

A la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica y en particular a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, donde recibimos nuestra formación y compartimos numerosas experiencias.

Al Ing. Porfirio Carrasco Tapia, por su asesoría orientación y respaldo durante la elaboración de nuestra tesis, y al Ing. Eduardo Quispe Nina por brindarnos acceso al laboratorio de hidrometalurgia y compartir su experiencia, lo que fue crucial para finalizar nuestro trabajo con éxito.

A nuestros profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes desempeñaron un papel crucial en nuestra formación al brindarnos valiosos consejos y enseñanzas que potenciaron nuestras habilidades.

Y, por último, a nuestros padres, parejas, hijos, amigos, compañeros y a todas las personas que, de alguna forma, aportaron al avance y culminación de este proyecto, facilitándonos el cierre exitoso de esta significativa etapa en nuestra vida universitaria.

## ÍNDICE

PRESENTACION.....	i
RESUMEN .....	ii
ABSTRACT.....	iii
INTRODUCCION .....	iv
DEDICATORIA I .....	v
DEDICATORIA II.....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE TÉRMINOS Y SÍMBOLOS .....	xv
LISTA DE FIGURAS .....	xvi
LISTA DE TABLAS.....	xviii

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1. Problema general. ....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. Objetivos.....	2

1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos. ....	2
1.4. Justificación .....	2
1.4.1. Tecnológica .....	2
1.4.2. Socioeconómica.....	3
1.4.3. Ambiental.....	3
1.5. Limitaciones de estudio.....	3

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Estado del antecedentes.....	5
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	5
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	5
2.1.3 Antecedentes locales .....	6
2.2. La hidrometalurgia del oro .....	8
2.3. Métodos de extracción por lixiviación .....	8
2.3.1. Lixiviación “in – situ”.....	9
2.3.2. Lixiviación en botaderos.....	11
2.3.3. Lixiviación en pilas.....	11
2.4. Lixiviación dinámica.....	14
2.4.1. Concepto .....	14

2.4.2 Lixiviación por agitación .....	15
2.5. Cianuración del oro. ....	16
2.6. Variables en el proceso de cianuración .....	17
2.6.1. Mineralogía .....	17
2.6.2. Granulometría del mineral .....	18
2.6.3. Tiempo de lixiviación .....	18
2.6.4. Concentración de Cianuro.....	19
2.6.5. pH de pulpa .....	20
2.4.6. Otras variables relevantes.....	21
2.7. Química de la cianuración .....	21
2.8. Mecanismo de cianuración .....	23
2.8.1. Teorías de la Cianuración del Oro .....	24
2.9. Termodinámica de la cianuración .....	27
2.10. Cinética de la Cianuración de Oro .....	30
2.10.1 Uso de Oxígeno puro en la Cianuración .....	33
2.10.2. Efecto de la Temperatura en la Velocidad de Cianuración.....	34
2.7. Efectos aceleradores y retardadores .....	36
2.7.1 Pérdida de oxígeno en la pulpa.....	36
2.7.2. Pérdida de cianuro en la pulpa.....	37
2.11. Regeneración de cianuro.....	38

2.12. Destrucción de Cianuro .....	38
------------------------------------	----

### CAPITULO III

#### HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis .....	40
3.1.1. Hipótesis general .....	40
3.1.2. Hipótesis específicas .....	40
3.2. Variables .....	40
3.2.1. Variables dependientes .....	40
3.2.2. Variables independientes .....	40
3.2.3. Variables intervinientes.....	41
3.3. Indicadores.....	41

### CAPÍTULO IV

#### METODOLOGÍA

4.1. Ubicación, acceso y geología del yacimiento.....	42
4.1.1. Ubicación .....	42
4.1.2. Acceso.....	42
4.1.3. Geología del yacimiento .....	43
4.2. Tipo de investigación .....	44
4.3. Diseño de investigación.....	44
4.4. Universo y muestra.....	45

4.4.1. Universo .....	45
4.4.2 Población.....	45
4.4.3 Muestra.....	45
4.5. Métodos y dispositivos para la obtención de datos .....	45
4.5.1. Instrumento de recolección de datos .....	45
4.6. Procesamiento y Análisis de Datos .....	46

## CAPÍTULO V

### TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1. Introducción.....	47
5.1.1 Protocolo escrito de trabajo seguro.....	48
5.2. Mineral muestra representativa.....	53
5.3. Preparación mecánica.....	53
5.3.1 Chancado.....	54
5.3.2 Molienda .....	55
5.4 Cuarteo y muestreo en laboratorio. ....	55
5.5. Cálculos y resultados de etapa de preparación mecánica.....	57
5.5.1 Evaluación granulométrico del mineral.....	57
5.5.2 Cinética de molienda (Tiempo de molienda).....	59
5.6. Preparación de pulpa. ....	61
5.6.1. Cálculo de gravedad específica .....	61

5.6.2 Capacidad del reactor y preparación de pulpa.....	64
5.7. Cinética de lixiviación por agitación.....	66
5.7.1. Evaluación de variables operativas en el proceso de cianuración. ....	66
5.7.1.1. Determinación del cianuro libre. ....	66
5.7.1.2. pH.....	67
5.7.2 Pruebas de cinética de cianuración. ....	68
5.8. Ensayo de cianuración para el desarrollo del diseño experimental.....	72

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. introducción. ....	98
6.2. Diseño experimental en la investigación.....	98
6.2.1. El diseño experimental y sus ventajas ....	98
6.3. Diseño experimental con dos o más factores.....	99
6.3.1. Diseño factorial $2^k$ . ....	99
6.4. Diseño factorial $2^k$ con replica en el punto central del esquema. ....	101
6.4.1. Selección de variables.....	102
6.4.2. Cálculo de efectos. ....	104
6.4.3. Análisis de varianza. ....	109
6.4.4. Modelo Matemático.....	112
6.4.5. Análisis de residuos. ....	113

6.4.6. Decodificación del modelo a escala natural.....	115
6.5. Discusión de resultados .....	121
CONCLUSIONES .....	122
RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFIA.....	124
ANEXOS .....	126

**LISTA DE TÉRMINOS Y SÍMBOLOS**

pH	: Potencial de Hidrogeniones
hr	: Hora
TM	: Tonelada Métrica
%	: Porcentaje
g/mol	: Gramos por mol
g/cm <sup>3</sup>	: gramos por centímetro cúbico
g/ L	: Gramos por litro
mg/L	: miligramos por litro
g/TM	: Gramos por tonelada métrica
oz/TC	: onzas por tonelada corta
E	: Potencial de reducción
m	: metro
cm	: centímetro
µm	: micrones
ppm	: Partes por millón
g	: Gramos
G.E	: Gravedad Específica
Kg	: Kilogramo
L	: Litro
ml	: Mililitro
PLS	: Pregnant leaching solution (solución Rica)
CN	: Cianuro
NaCN	: Cianuro de sodio
Oz	: Onzas
cm <sup>3</sup>	: centímetro cúbico

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Lixiviación in situ.....	10
Figura 2	Lixiviación en botaderos.....	13
Figura 3	Lixiviación en pilas .....	13
Figura 4	Reactor agitado de lixiviación y agitadores de hélice y paleta plana.....	15
Figura 5	Curva de porcentaje de extracción en relación al tiempo .....	19
Figura 6	Disolución del oro con cianuro mediante un mecanismo electroquímico.....	24
Figura 7	Diagrama Eh Vs pH en el sistema Au-Zn-CN-1-H <sub>2</sub> O(25°C) .....	29
Figura 8	Influencia de temperatura en velocidad de disolución del oro .....	35
Figura 9	Ruta de acceso Abancay - cochasayhuas.....	43
Figura 10	Diagrama de flujo del procedimiento de estudio experimental.....	47
Figura 11	Toma de muestra del stock.....	53
Figura 12	Diagrama de flujo para preparación mecánica de las muestras.....	54
Figura 13	Subdivisión de muestras por método de cono y cuarteo.....	55
Figura 14	Subdivisión de muestra en muestreador de rifles .....	56
Figura 15	Fotos de trabajos de cuarteo en laboratorio.....	56
Figura 16	Representación gráfica del análisis granulométrico .....	59
Figura 17	Relación entre el tiempo de molienda y el % de material pasante .....	60
Figura 18	Procedimiento para hallar gravedad específica .....	62
Figura 19	Diagrama de flujo de las pruebas de cianuración .....	67
Figura 20	Diagrama de flujo del procedimiento para la prueba de cinética de lixiviación .....	68
Figura 21	Cinética de lixiviación .....	70
Figura 22	Visualización tridimensional de un diseño factorial 23 .....	101

Figura 23	Vista tridimensional de un diseño factorial $2^3$ con replica en el punto central.....	102
Figura 24	Representación espacial según datos de las pruebas.....	104
Figura 25	Efecto de variables individuales .....	108
Figura 26	Efecto de interacción de variables .....	108
Figura 27	Diagrama de Pareto.....	109
Figura 28	Gráfica de superficie de respuesta para la ecuación 5.21.....	119
Figura 29	Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.22. ....	119
Figura 30	Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.21. ....	120
Figura 31	Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.22. ....	120

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Valores estimados de coeficientes de difusión .....	33
Tabla 2	Influencia del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro .....	34
Tabla 3	Distribución granulométrica en peso-chancadora de rodillos de laboratorio .....	58
Tabla 4	Datos de % pasante -200M para una muestra de 100 gramos de mineral seco .....	60
Tabla 5	Datos para obtener gravedad específica .....	63
Tabla 6	Cálculo de pulpa con 30% de sólidos.....	65
Tabla 7	Calculo para la alimentación al agitador .....	69
Tabla 8	Cinética de lixiviación de oro .....	70
Tabla 9	Diseño experimental para el desarrollo de las pruebas .....	71
Tabla 10	Variables para realizar las pruebas de cianuración por agitación con NaCN.....	72
Tabla 11	Variables para las pruebas centrales.....	72
Tabla 12	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 01.....	75
Tabla 13	Control del proceso-prueba 01 .....	75
Tabla 14	Resultados del proceso-prueba 01 (contenido metálico en anexo 02) .....	76
Tabla 15	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 02.....	77
Tabla 16	Control del proceso-prueba 02 .....	77
Tabla 17	Resultados del proceso-prueba 02 (contenido metálico en anexo 02) .....	78
Tabla 18	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 03.....	79
Tabla 19	Control del proceso-prueba 03 .....	79
Tabla 20	Resultados del proceso-prueba 03 (contenido metálico en anexo 02) .....	80
Tabla 21	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 04.....	81
Tabla 22	Control del proceso--prueba 04.....	81

Tabla 23	Resultados del proceso-prueba 04 (contenido metálico en anexo 02) .....	82
Tabla 24	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 05.....	83
Tabla 25	Control del proceso-prueba 05 .....	83
Tabla 26	Resultados del proceso-prueba 05 (contenido metálico en anexo 02) .....	84
Tabla 27	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 06.....	85
Tabla 28	Control del proceso-prueba 06.....	85
Tabla 29	Resultados del proceso-prueba 06 (contenido metálico en anexo 02) .....	86
Tabla 30	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 07.....	87
Tabla 31	Control del proceso-prueba 07 .....	87
Tabla 32	Resultados del proceso-prueba 07 (contenido metálico en anexo 02) .....	88
Tabla 33	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 08.....	89
Tabla 34	Control del proceso-prueba 08 .....	89
Tabla 35	Resultados del proceso-prueba 08 (contenido metálico en anexo 02) .....	90
Tabla 36	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 09.....	91
Tabla 37	Control del proceso-prueba 09 .....	91
Tabla 38	Resultados del proceso-prueba 09 (contenido metálico en anexo 02) .....	92
Tabla 39	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 10.....	93
Tabla 40	Control del proceso-prueba 10 .....	93
Tabla 41	Resultados del proceso-prueba 10 (contenido metálico en anexo 02) .....	94
Tabla 42	Cálculo para alimentación al agitador-prueba 11.....	95
Tabla 43	Control del proceso-prueba 11 .....	95
Tabla 44	Resultados del proceso-prueba 11 (contenido metálico en anexo 02) .....	96
Tabla 45	Cuadro comparativo de extracción de oro con cianuro y mercurio .....	97

Tabla 46	Niveles de las variables .....	102
Tabla 47	Replicas centrales ( $y^0$ ) .....	103
Tabla 48	Variables en escala natural y codificada con réplicas en el centro .....	103
Tabla 49	Matriz de diseño factorial y respuestas experimentales .....	105
Tabla 50	Cálculo de efectos .....	107
Tabla 51	Análisis de varianza.....	111
Tabla 52	Análisis de residuales .....	114
Tabla 53	Valores para la decodificación del modelo.....	116
Tabla 54	Dando valores a $Z_2$ en la ecuación 5.22.....	117
Tabla 55	Dando valores a $Z_3$ en la ecuación 5.22.....	118

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1 Planteamiento del problema.

Apurímac es una región en la cual existen muchos grupos mineros artesanos, de estas empresas, algunas operan de manera informal y emplean mercurio para la recuperación de oro, de lo que resulta nuestro problema central de esta investigación, siendo la baja extracción de oro y la falta de manejo de variables del personal que opera la planta dando como resultado pérdidas económicas e impactos ambientales negativos.

La minera artesanal de San Lucas, situado en la provincia de Grau, en el departamento de Apurímac, es especialmente rico en oro, cobre y plata. Está actualmente en operación con una ley de cabeza de 0.598 onz/tc en Oro y con 2.85 onz/tc de plata. Sin embargo, los análisis de los relaves muestran una pérdida significativa de oro, evidenciada tanto en los análisis por plateo como en los análisis químicos obteniendo una ley de relave 0.383 onz/tc. de oro.

Actualmente, el proceso de extracción de oro en la minera San Lucas, utiliza un molino de bolas con una reducción de tamaño del mineral deficiente, un porcentaje de sólidos no determinado, y recupera el oro mediante el uso de mercurio líquido en el mismo molino.

Se ha identificado la posibilidad de mejorar el porcentaje de extracción al sustituir el mercurio por el proceso de cianuración por agitación, teniendo como variables de proceso a la concentración de cianuro de sodio, porcentaje de sólidos y el control del pH de pulpa, con las cuales se realizan una serie de ensayos de laboratorio y su análisis mediante un diseño factorial  $2^k$  con réplicas en el punto central. El objetivo es implementar un procedimiento técnico más eficiente para la obtención de oro en el yacimiento San Lucas.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general.**

¿Cómo extraer oro en la minera artesanal San Lucas usando el proceso de cianuración por agitación?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

- ¿Cuál será la dosificación ideal de cianuro de sodio para una extracción óptima de oro?
- ¿A qué porcentaje de sólidos se tendrá una extracción óptima de oro?
- ¿Cuál será el pH ideal en la extracción del oro?

## **1.3. Objetivos.**

### **1.3.1. Objetivo general.**

- Extraer a % óptimos el oro de la minera artesanal San Lucas mediante el proceso de cianuración por agitación.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Determinar la dosificación adecuada de cianuro de sodio.
- Determinar el porcentaje de sólidos óptima para una buena extracción de oro.
- Determinar el pH adecuado de pulpa para una extracción óptima de oro.

## **1.4. Justificación**

### **1.4.1. Tecnológica**

Este estudio es fundamental para fomentar el crecimiento de la industria metalúrgica en la región Apurímac y complementa los estudios previos, que servirán como base para futuras

investigaciones sobre la instalación de plantas metalúrgicas. Nuestro objetivo es contribuir al avance a través de la implementación de tecnologías adecuadas para la extracción de mineral de oro.

#### **1.4.2. Socioeconómica**

Este trabajo se justifica por el potencial de extraer oro a porcentajes económicamente rentables, lo que podría impulsar significativamente el crecimiento económico. La extracción de oro en este yacimiento no solo crearía más empleos para los trabajadores, sino que también contribuiría al aumento del Producto Bruto Interno (PBI) nacional.

#### **1.4.3. Ambiental**

Nuestra investigación también aborda aspectos ambientales, enfocándose en la reducción del impacto ecológico. La tecnología de lixiviación por agitación de minerales de oro, que proponemos, es un proceso que se ajustará a las normas ISO 14000 para gestión ambiental y a las normas ISO 45001 para la salud ocupacional. El cumplimiento de estas normas asegura que las actividades industriales se desarrollen bajo altos estándares de calidad ambiental.

Además, nos preocupa el manejo adecuado de los relaves. Si no se tratan correctamente, estos pueden causar contaminación ambiental al mezclarse con otros materiales y reactivos contaminantes con el tiempo. Por lo tanto, es fundamental adoptar prácticas de gestión de relaves que eviten estos problemas.

#### **1.5. Limitaciones de estudio**

Este trabajo se llevará a cabo en el yacimiento de oro de San Lucas, situado en el departamento Apurímac, provincia Grau y distrito El Progreso. Entre las restricciones de este proyecto de investigación se encuentran las deficientes condiciones de las vías de acceso que conducen a la

zona minera, que complican la adquisición de reactivos, suministros y alojamiento. Asimismo, la carencia de recursos económicos limita la posibilidad de llevar a cabo pruebas in situ. Por otra parte, la limitada disponibilidad de internet y telefonía en la región obstaculiza el desarrollo efectivo de la investigación.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. Estado de antecedentes

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales

- ✓ **(Poblete Palma R.A,2019)** en la tesis titulada: “lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto”. Realizado en la Universidad Técnica Federico Santa María en Santiago, Chile, este estudio tenía como objetivo implementar la lixiviación por cianuración en columnas a nivel de planta piloto en la Minera Pullalli para extraer oro del mineral. La investigación concluyó que la extracción de oro esperada es un valor menor en comparación con la extracción obtenida de cabeza/solución. Es probable que el valor real se encuentre entre estos dos valores, en lugar de ubicarse dentro del intervalo entre la extracción esperada y la extracción de cabeza/ripió. Esta discrepancia se debe a que el análisis de oro a través del ensayo a fuego muestra un menor margen de error al aplicarse a minerales de oro, en comparación con los rípios de lixiviación

##### 2.1.2 Antecedentes nacionales

- ✓ **(Mendo Escalante & Farfan Chilicaus, 2016)** en la tesis titulada: “Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación. Cachachi – Cajamarca”. El estudio se realizó en la Universidad Privada del Norte, con el objetivo de optimizar la recuperación de oro en un

proceso de lixiviación por agitación (cianuración en botella). Para lograr esto, se evaluaron los parámetros de concentración de cianuro y granulometría, utilizando un mineral oxidado de la zona del distrito de Cachachi, Cajabamba, Cajamarca. La investigación determinó que la lixiviación por agitación logró una recuperación promedio de oro del 78.68%, con una recuperación máxima alcanzando el 92.37%. Además, se concluyó que tanto la concentración de cianuro como la granulometría, así como la interacción entre ambas variables, tienen un impacto altamente significativo en la eficiencia de recuperación de oro.

- ✓ **(Isidro Perca J, 2018)** en la tesis titulada “Pruebas de cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos en la empresa Minera J.J. Inversiones Minera SAC en Abancay” Apurímac – Perú. El estudio se realizó en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. El objetivo de esta tesis es analizar minerales mixtos auríferos a través de pruebas de cianuración en botellas y columnas. Además, se llevaron a cabo ensayos para evaluar el consumo de cianuro y la cinética en el proceso de lixiviación en columnas, incluyendo análisis y caracterización de los minerales auríferos de la región minera en cuestión. Los resultados logrados a lo largo de la investigación demostraron que se puede alcanzar una disolución de oro de hasta el 90% en los minerales de la zona, gracias a las condiciones optimizadas establecidas para las pruebas metalúrgicas, que permitieron un control efectivo del proceso

### 2.1.3 Antecedentes locales

- ✓ **(Chávez C. y Menejes D. 2013)** En la tesis titulada “Evaluación de variables del proceso de cianuración en columna de minerales auríferos de Mollepiña - provincia de Grau – Apurímac” (Chávez C. y Menejes D., 2013), realizada en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se

llevó a cabo un estudio sobre minerales auríferos de baja ley provenientes del yacimiento Ccoriminas, ubicado en la Comunidad de Nueva Esperanza Mollepiña. Estos minerales presentan leyes promedio de entre 6 y 10 g/TM de Au. El objetivo principal del estudio fue evaluar las variables del proceso de cianuración en columna para poder escalar las pruebas a nivel piloto. Se realizaron ensayos metalúrgicos en el laboratorio, empleando tanto cianuración en botella como en columna. Las pruebas en botella se llevaron a cabo en el Laboratorio Químico-Metalúrgico de la Unidad Minera Santa Rosa de la Empresa Minera Phoenix S.A.C., mostrando un consumo de cal de 1.5 kg/TM de mineral y un consumo de NaCN de 1.62 kg/TM de mineral, alcanzando una extracción máxima de 97.44% Au y 49.37% Ag. Por otro lado, las pruebas de cianuración en columna se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hidrometalurgia, aplicando un diseño factorial  $2^3$  con dos niveles y tres variables (tamaño de partícula, altura de llenado y tiempo de cianuración). Se realizaron 11 pruebas en columna (8 combinaciones y 3 pruebas centrales. La Columna C-5 se destacó al lograr la mayor extracción, con un 82.17% de Au y un 62.95% de Ag, utilizando un tamaño de partícula de  $\frac{1}{4}$ ", una altura de llenado de 0.8 m y un tiempo de riego de 25 días.

- ✓ **(Gomez, J., 2012)** Tesis titulada: "Evaluación del Proceso de Lixiviación por Agitación de Minerales de Au-Ag en la Compañía minera Ares Castilla-Arequipa. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco". Perú. El propósito de este estudio fue evaluar las variables operativas y establecer los parámetros necesarios para alcanzar una extracción óptima de oro y plata en el proceso de lixiviación por agitación en la Compañía Minera Ares. El método empleado se basó en los resultados obtenidos de las pruebas llevadas a cabo en el laboratorio. Las conclusiones extraídas de las pruebas experimentales preliminares permitieron establecer los parámetros operativos para esta investigación.

Estos parámetros incluyeron un tiempo de molienda de 27 minutos y 51 segundos, un tamaño de partícula de 74% - 200 mallas, y un tiempo de lixiviación de 72 horas, según lo determinado por las pruebas de cinética.

## **2.2. La hidrometalurgia del oro**

La palabra "hidrometalurgia" se refiere al arte y la ciencia de extraer metales de los minerales a través de un medio acuoso.

La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva que se dedica a la obtención de metales y compuestos desde minerales o fuentes secundarias, utilizando reactivos en soluciones acuosas u orgánicas, y generalmente se realiza a temperaturas un poco bajas. Los primeros procesos modernos de hidrometalurgia abarcan la cianuración de minerales de plata y oro, los cuales impulsaron el desarrollo de muchos equipos esenciales en la hidrometalurgia contemporánea, como agitadores, espesadores, filtros y bombas de lodo (Chavez Flores, 2014).

## **2.3. Métodos de extracción por lixiviación**

Los diversos métodos de extracción por lixiviación están diseñados para lograr el objetivo principal de cualquier proyecto metalúrgico: maximizar el beneficio económico minimizando costos. Cada método busca equilibrar de manera óptima los reactivos empleados y las utilidades obtenidos al procesar dichos reactivos (Vargas Gallardo, 1995)

Este equilibrio requiere de varios procesos unitarios, que son mayormente físicas y, en otras ocasiones fisicoquímicas (cuando se realiza concentración por flotación o un pretratamiento químico). Los trabajos incluyen:

- Explotación minera y traslado de mineral valioso.
- Procesos como trituración, separación en seco, molienda y clasificación en húmedo.

Procesos de concentración que aprovechan características particulares del mineral valioso en comparación con la ganga, como la gravedad específica, la susceptibilidad eléctrica y magnética, así como factores relacionados, como la química de superficie en la concentración por flotación (Vargas Gallardo, 1995)

Esta serie de operaciones se lleva a cabo comúnmente en la lixiviación de concentrados, aunque en muchos casos, se realiza directamente a los minerales naturales, constituyendo el primer proceso químico al que se somete el mineral. Para optimizar estos procesos químicos, se deben considerar factores como los métodos de lixiviación a utilizar, concentración de los reactivos, y variables como la presión y la temperatura. Sin embargo, el factor más importante para el éxito de la lixiviación es el tiempo que durará el proceso.

(Tecsup, 2009)

### **2.3.1. Lixiviación “in – situ”**

La lixiviación "in situ" es una de las técnicas poco conocidas en la extracción de minerales y elementos metálicos directamente de los yacimientos minerales. Esta técnica consiste en aplicar reactivos acuosos en los depósitos de minerales (figura 1).

Numerosos minerales pueden ser recuperados mediante estos métodos: disolución que aprovecha la solubilidad en agua y reactivo de minerales valiosos, y lixiviación en el sitio utilizando soluciones químicas similares a las de la lixiviación en botaderos. La lixiviación in situ es especialmente útil en yacimientos donde los métodos tradicionales de minería mecanizada no son viables por la baja ley del mineral, la profundidad, o la dispersión, y que poseen una alta permeabilidad natural o que ha sido generada artificialmente a través de técnicas como la hidro fracturación.

Cuando la mena es fisurada y permanece en su lugar, o permite la percolación de la solución

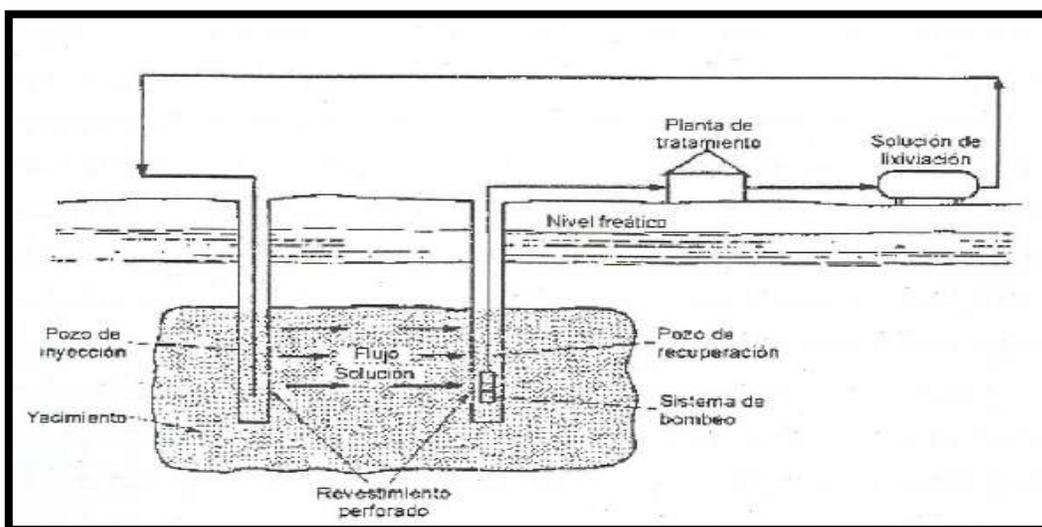
lixiviante sin necesidad de explosivos, se puede realizar la lixiviación in situ directamente. Para los cuerpos mineralizados expuestos a la superficie, se puede aplicar la solución lixivante sobre la mena y recolectar la solución rica en pozos de recuperación después de que haya percolado. En el caso de cuerpos mineralizados enterrados, la solución lixivante debe ser inyectada en la formación geológica a través de pozos de inyección y luego recuperada en pozos adyacentes, donde la solución rica se transporta a la planta de procesamiento.

Esta técnica presenta un gran potencial a futuro debido a las recientes restricciones ambientales, ya que no contamina ni perturba el aire, tiene un bajo costo operativo y con menor inversión en infraestructura y equipos. Entre sus limitaciones se encuentra la baja recuperación y la contaminación de acuíferos subterráneos. Al encontrarse mayor cantidad de yacimientos con baja ley, con variedad de especies mineralógicas y a mayor profundidad, esta técnica se vuelve cada vez más relevante frente a la explotación convencional.

(Tecsup, 2009)

### Figura 1

*Lixiviación in situ.*



Nota: <https://webs.ucm.es/info/metal/transpare/Ballester/Premat12.pdf>

### **2.3.2. Lixiviación en botaderos**

La lixiviación en botaderos se utiliza en minerales de baja ley, los cuales no son aptos para el procesamiento en planta, pero se han llevado a la superficie para la extracción de metales valiosos. También se utiliza para tratar las colas (relaves) de procesos de extracción. El material se apila en capas de 5 a 10 metros de altura, utilizando bulldozers o camiones. Después de la lixiviación, la pila se desgarrá con un bulldozer y después se añade otra capa nueva de mineral. La solución lixivante se aplica sobre la superficie utilizando goteros en movimiento o aspersores, según factores como altitud y la disponibilidad de agua (figura 2).

Para la lixiviación se debe preparar el terreno, para recolectar las soluciones con mínimas pérdidas, para ello, se utiliza membranas plásticas, similares a los materiales que se usan para eliminación de residuos sólidos. El proceso de lixiviación en botaderos puede prolongarse por más de un año y la extracción suele ser del 40 al 60%, que se puede compensar con bajos costos de operación.

(Vargas Gallardo, 1995)

### **2.3.3. Lixiviación en pilas**

La lixiviación en pilas tiene bastante similitud a la lixiviación en botaderos, aunque la diferencia radica en que se trata minerales de alta ley, a menudo, se origina como colas de procesos de concentración. La preparación de la membrana impermeable, las pilas y la solución lixivante, son de manera análoga a la lixiviación en botaderos. En este método, es fundamental prevenir la inundación del lecho, ya que las partículas de arcilla o minerales de pequeño tamaño pueden crear un sello. Para evitar la inundación, la mezcla se procesa en un tambor aglomerador, que es un cilindro metálico recubierto de neopreno. Este dispositivo ayuda a formar aglomerados o mezclas curadas que combinan mineral, agente mineral y agua. Este proceso ayuda a mantener una

lixiviación no inundada y optimiza el proceso.

El tiempo requerido para la lixiviación en pilas puede ser de varios meses, dependiendo del tipo de mineral, la ley del elemento de interés y el tamaño de las partículas. Las tasas de extracción reportadas oscilan entre el 70 y el 85%, comparables a las obtenidas mediante percolación.

La lixiviación en pilas consiste en procesar menas que han sido extraídas, trituradas y llevadas a plataformas impermeables, donde se someten a riego que facilita percolar la solución lixivante a través de la pila (figura 3). La decisión de optar por este método en lugar de otros depende del tonelaje y ley del mineral a tratar, así como de su capacidad de permeabilidad, que es crucial para la percolación y extracción económica del oro. Una permeabilidad insuficiente puede hacer que la lixiviación en pilas no sea viable, a pesar de su menor costo en comparación con otros procesos.

Este método se utiliza comercialmente en todo el mundo para tratar minerales y concentrados. Aunque muchas plantas utilizan varios tanques con agitación para la lixiviación con cianuro, la lixiviación en pilas está ganando popularidad, especialmente para minerales de baja ley, debido a su eficiencia metalúrgica y ventajas económicas. Generalmente, proporciona una mayor recuperación de oro en comparación.

La solución lixivante enriquecida se recoge en un tanque de almacenamiento y posteriormente se envía a la planta de recuperación de oro. Este proceso puede incluir el uso de columnas de carbón activado, sistema Merrill Crowe o celdas electrolíticas. Por otro lado, el efluente estéril se almacena en un tanque separado para su tratamiento o disposición final.

(Tecsop, 2009)

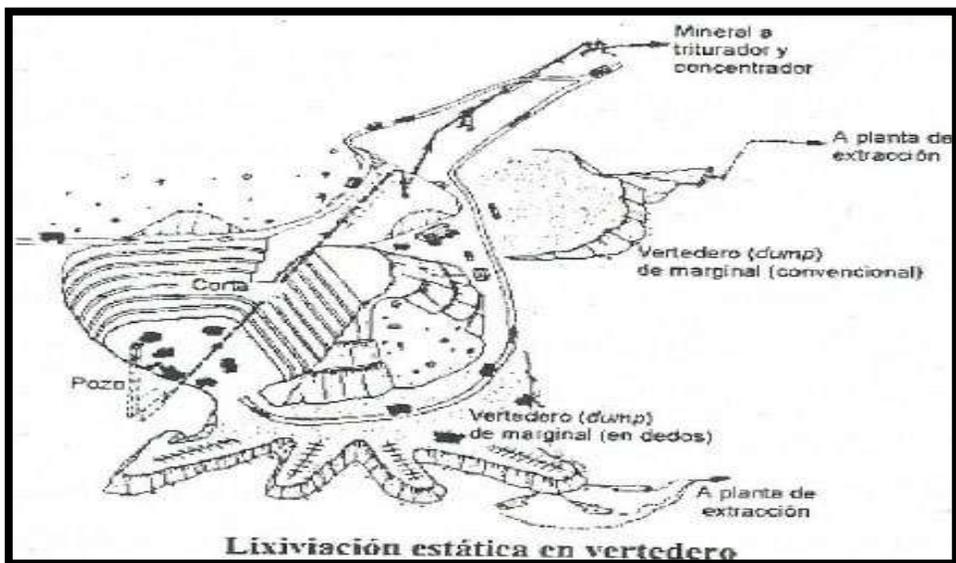
La manera como se presenta el oro y su asociación con la ganga determina si una mena aurífera es o no apta para su procesamiento por el método de lixiviación en pilas o montones.

En el proceso de cianuración en pilas, la química y el mecanismo de disolución del oro son

idénticos a los de la cianuración por agitación. En la primera, el oxígeno es fundamental para la disolución del oro, ya que se introduce en la solución de cianuro mientras se aplica sobre la mena apilada (Tecsap, 2009).

**Figura 2**

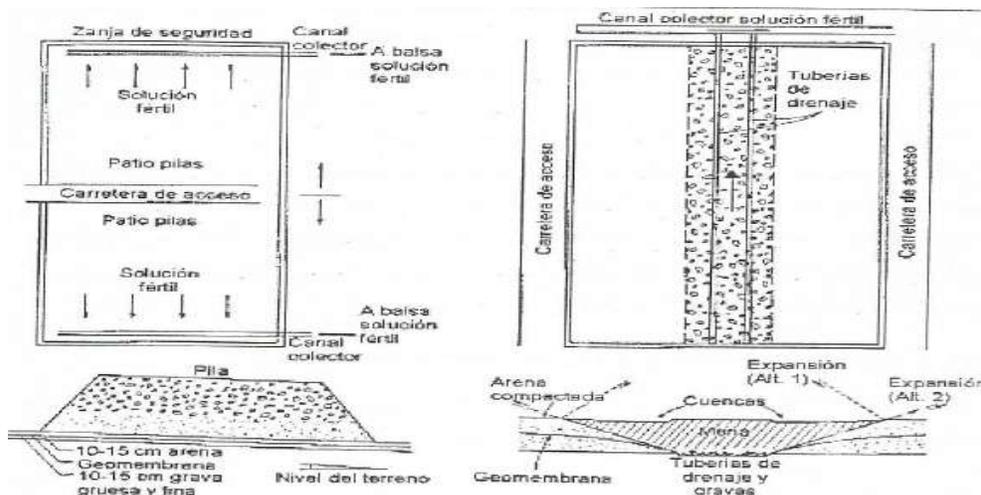
*Lixiviación en Botaderos*



Nota: <https://webs.ucm.es/info/metal/transpare/Ballester/Premart12.pdf>

**Figura 3**

*Lixiviación en pilas*



Nota: <https://webs.ucm.es/info/metal/transpare/Ballester/Premart12.pdf>

## **2.4. Lixiviación dinámica**

### **2.4.1. Concepto**

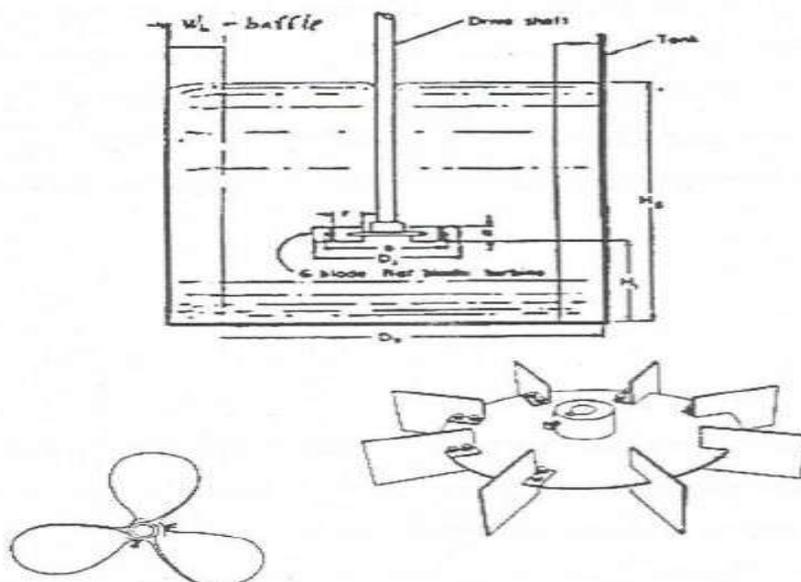
Según Gaviria, Restrepo y Bustamante (2007) explican que la lixiviación por agitación ha sido una técnica de uso durante aproximadamente 200 años. Llevándose a cabo este método por lo general en tanques de acero, que permite obtener en tiempos más cortos, extracciones más altas. Es especialmente eficaz para minerales con leyes elevadas y tamaños de partículas menores a 150  $\mu\text{m}$ , con algunas operaciones que procesan minerales con tamaños de hasta 45  $\mu\text{m}$  para liberar y exponer los valores a la solución lixivante. Este tipo de lixiviación puede realizarse de manera continua e intermitente, en paralelo o contracorriente, y se clasifica en:

En el caso de la agitación mecánica, el proceso se efectúa en tanques cilíndricos donde el diseño del agitador varía según la granulometría del mineral a tratar y la viscosidad de la pulpa (figura 4 agitador de hélice y paleta plana). La combinación de inyección de aire y agitación mecánica ha demostrado ser altamente eficiente en la extracción de metales valiosos. Los minerales procesados con este método deben tener un alto tenor y una granulometría fina (por ejemplo, malla -200 para minerales auríferos). Aunque este método requiere una inversión significativa, la inversión se recupera rápidamente debido a la eficiencia del proceso, que tiene una duración de entre 8 y 72 horas. En la extracción se puede llegar hasta un 95%, con una concentración del agente lixivante de moderada a alta en la solución.

Tras la lixiviación, es necesario llevar a cabo una separación sólido/líquido. Efectuando esta separación con un lavado en contracorriente, esto con el fin de eliminar los sólidos agotados y previene su presencia en la solución rica. Para ello, se instalan espesadores en la planta, y en algunos casos, se utiliza un filtro rotatorio para la separación.

**Figura 4**

*Reactor agitado de lixiviación y agitadores de hélice y paleta plana*



Nota: <https://webs.ucm.es/info/metal/transpare/Ballester/Premat12.pdf>

### 2.4.2 Lixiviación por agitación

Esta técnica de lixiviación es utilizado principalmente para minerales con leyes elevadas, especialmente cuando la etapa de chancado produce un alto contenido de partículas finas, o cuando el mineral de interés está diseminado y requiere molienda para liberar y exponer los valores a la solución lixivante. Este proceso también se emplea en la lixiviación de calcinas de tostación y concentrados.

En la lixiviación por agitación, se emplea agitación o burbujeo mecánico, con el fin de que la pulpa, se mantengan en suspensión y garantice una disolución completa del metal. Este método permite el tiempo de contacto entre los sólidos y la solución lixivante, sea unas pocas horas, a diferencia de la lixiviación en pilas, que puede extenderse por meses. Existen impulsores instalados dentro del tanque llamados agitadores mecánicos, mientras que los tanques que utilizan aire suelen

ser del tipo “Pachuca”.

(Gaviria, Restrepo y Bustamante, 2007)

#### **2.4.2.1. Ventajas**

- Proceso rápido (dura unas cuantas horas)
- Alta eficiencia en la extracción del elemento deseado
- Facilita la automatización por ser un proceso continuo.
- Eficaz para tratar menas con materiales finos.

#### **2.4.2.2. Desventajas**

- Mayor costo tanto en inversión como en operación.
- Requiere etapas adicionales de chancado, molienda y la etapa de separación sólido/líquido (como espesamiento y filtrado)

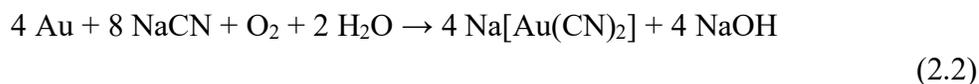
### **2.5. Cianuración del oro.**

Según Misari (1994), indica que la cianuración del oro, es una técnica metalúrgica utilizada para extraer oro de minerales de baja ley. Este proceso convierte el oro, en complejos aniónicos solubles en agua, conocidos como aurocianida, mediante un procedimiento de lixiviación. Es el método más comúnmente empleado para la extracción de oro.

Se tiene la siguiente reacción química básica para la disolución del oro en cianuro:



Según la ecuación de Elsner, la reacción completa con cianuro de sodio es:



## 2.6. Variables en el proceso de cianuración

Gaviria, Restrepo y Bustamante (2007), Define las variables claves del proceso:

- Mineralogía
- Granulometría del mineral
- Tiempo de lixiviación.
- Concentración de cianuro.
- pH de pulpa
- Otras variables relevantes.

### 2.6.1. Mineralogía

Viene a ser las características físicas, químicas y cristalinas de los minerales. En otras palabras, se refiere al conjunto de propiedades que permiten identificar y clasificar un mineral, así como su formación y comportamiento bajo diferentes condiciones.

**Composición química:** La fórmula química del mineral, que muestra los elementos químicos presentes y sus proporciones.

**Estructura cristalina:** La forma en la que los átomos o iones están dispuestos en el interior del mineral. Esta estructura determina las propiedades físicas del mineral, como su dureza y su capacidad para formar cristales.

**Propiedades físicas:**

- Color: La apariencia visual del mineral, aunque puede variar según las impurezas.
- Dureza: Se mide con la escala de Mohs, que va del 1 (más blando) al 10 (más duro).
- Forma y hábito cristalino: El tipo de cristal y su geometría.
- Brillo: Cómo refleja la luz. Puede ser metálico, vítreo, sedoso, etc.

- Exfoliación: La tendencia del mineral a romperse de manera plana o en capas.

**Origen y formación:** Los minerales se forman por procesos geológicos específicos, como la cristalización de magma, la precipitación de agua, o la alteración de otros minerales.

**Propiedades químicas:**

- Reactividad química: Algunos minerales pueden reaccionar con ácidos o con otras sustancias químicas.

**Clasificación:** Los minerales se agrupan en diferentes clases según su composición química, como los silicatos, carbonatos, óxidos, sulfuros, entre otros.

### **2.6.2. Granulometría del mineral**

El tamaño del mineral debe ser reducida de manera la solución lixiviante entre en acción al menos con una parte de la superficie del metal valioso. Esta granulometría depende de las características mineralógicas. Es importante evitar tanto un exceso de partículas gruesas (mayores de 2 mm), que pueden causar dificultades durante la agitación como embarcamiento o incremento en la potencia del agitador, al igual que un exceso de partículas finas (menos del 40% menores a 75 micrones), pueden complicar la separación sólido-líquido en la etapa siguiente. Para minimizar el consumo energético y los costos de decantación y filtración, la agitación debe llevarse a cabo con el tamaño de partícula más grande posible dentro de lo que permita el proceso.

(Gaviria, Restrepo y Bustamante, 2007)

### **2.6.3. Tiempo de lixiviación**

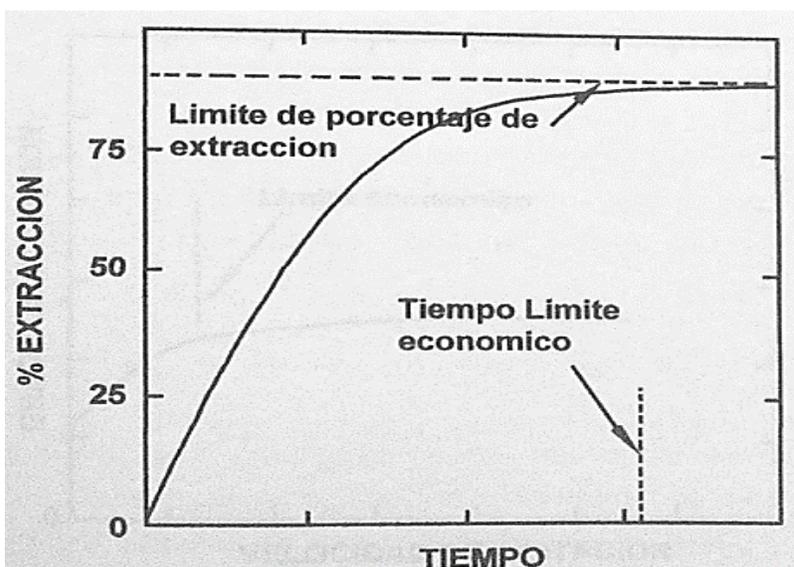
Morris (1954) que el tiempo requerido para la cianuración de minerales de oro suele ser menor que el necesario para los minerales de plata. Sin embargo, este tiempo necesario para los minerales de plata puede reducirse a través de una aireación constante, una molienda fina del mineral o el

uso de soluciones mucho más concentradas de cianuro. La eficiencia económica del proceso de lixiviación depende del grado de disolución del metal valioso. No obstante, el tiempo necesario para alcanzar una extracción aceptable es importante, ya que determina la velocidad de disolución.

La Figura 5, muestra la curva de porcentaje de extracción en relación al tiempo. Inicialmente, la extracción es rápida, pero luego disminuye al máximo alcanzable para un determinado tamaño de partícula. Dicha curva se obtiene a partir de la realizar pruebas de lixiviación en laboratorio.

**Figura 5**

*Curva de porcentaje de extracción en relación al tiempo*



Nota: (Morris, 1954).

La eficiencia económica de la lixiviación está determinada por el porcentaje de extracción o grado de disolución del metal valioso. No obstante, el factor más crucial es el tiempo requerido para lograr una extracción óptima.

#### **2.6.4. Concentración de Cianuro**

Según Misari (1994), bajo presión atmosférica, la eficiencia de la cianuración no está

directamente afectada por la concentración de cianuro. A presión atmosférica y a temperatura ambiente, el agua puede disolver aproximadamente 8.2 mg/l de oxígeno, equivalente a  $0.26 \times 10^{-3}$  moles/l. Por ende, una concentración mínima requerida de cianuro de sodio deberá ser al menos 0.51 g/l, calculada como  $4 \times 0.26 \times 10^{-3} \times 49$ . No influyen en la velocidad de disolución del oro las concentraciones de cianuro de sodio superiores a 0.5 g/l, ya que en condiciones atmosféricas la disolución está limitada por la concentración constante de oxígeno presente en la solución (p. 36-37).

### **2.6.5. pH de pulpa**

Vilca Taype (2013) describe las funciones desempeñadas por el hidróxido de calcio en el proceso de cianuración como sigue:

- Evitar la disminución de cianuro provocada por la reacción con el dióxido de carbono presente en el aire.
- Prevenir la reducción de cianuro debido a la formación de ácido cianhídrico.
- Eliminar los bicarbonatos presentes en el agua antes de su utilización en el proceso de cianuración.
- Contrarrestar compuestos ácidos, tales como sales ferricas, sales ferrosas y sulfato de magnesio, en el agua antes de añadirla al circuito de cianuración.
- Contrarrestar los elementos ácidos del mineral, como la pirita.
- Ayudar a que las partículas finas se depositen, lo que facilita su separación de la solución cianurada rica en oro.
- Aumentar la extracción en el caso de menas que contienen telurios, plata roja, las cuales en condiciones de mayor alcalinidad se descomponen más rápidamente.

En la práctica, se utiliza cal o soda cáustica, siendo la cal preferida debido a su bajo costo. La

cantidad de cal que se agrega, medida en kilogramos de óxido de calcio por tonelada de mineral, se denomina "alcalinidad protectora". Si bien un exceso de cal puede resguardar al cianuro de sodio de la hidrólisis, también puede disminuir la velocidad de disolución del oro, especialmente en menas que contienen sulfuros.

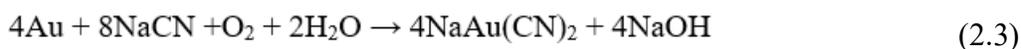
#### 2.4.6. Otras variables relevantes

- Es importante maximizar el porcentaje de sólidos en la pulpa para aumentar la concentración del ion metálico en la solución de lixiviación. Esto ayuda a reducir los costos de inversión al disminuir la capacidad volumétrica requerida y a optimizar tanto el tamaño como los costos de los equipos de espesamiento y filtración. Normalmente, el porcentaje de sólidos varía entre el 20% y el 50%.
- Se debe tener una velocidad de agitación suficientemente alta, que permita mantener los sólidos en suspensión y evitar que se depositen. Al tener una agitación más intensa se mejora la cinética de la reacción y facilita la disolución de gases en la solución, aunque esto conlleva un mayor consumo energético.

(Diez Canseco, 1989)

#### 2.7. Química de la cianuración

La recuperación de oro desde sus minerales se lleva a cabo a través de un proceso de lixiviación utilizando cianuro, que forma compuestos estables. Para este proceso es necesario un agente oxidante, descrito por la ecuación de Elsner:



Habashi (1956) examinó los estudios relacionados con los mecanismos de cianuración y presentó la siguiente ecuación para el proceso de disolución:



Esta ecuación ilustra un proceso de corrosión en el que el oxígeno actúa como aceptador de electrones en una región catódica de la superficie metálica, mientras que el metal libera electrones en una zona anódica y se transforma en un complejo de cianuro.

Recientemente, se ha constatado que la velocidad de reacción depende de la cantidad de oxígeno presente. Por esta razón, se incorpora oxígeno o aire enriquecido en el proceso, a menudo utilizando peróxido de hidrógeno. No obstante, se puede reducir la velocidad de cianuración al tener un exceso de este reactivo, ya que el cianuro tendera a oxidarse.

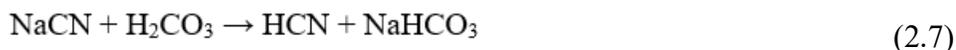
(Vargas Gallardo, 1995)

Durante el proceso de lixiviación, es fundamental que el oro tenga contacto directo con la solución de cianuro para que pueda disolverse. Si este contacto no se logra de manera natural, se puede mejorar mediante la molienda fina del mineral. Cuando el oro se encuentra finamente distribuido dentro de matrices de sulfuros o ganga oxidada, el mineral se clasifica como "refractario". En tales casos, es necesario recurrir a procesos adicionales, como la oxidación acuosa a alta temperatura, la tostación o la oxidación biológica, para facilitar la interacción entre el cianuro y el oro.

Las soluciones de cianuro empleadas en la lixiviación de oro suelen prepararse utilizando cianuro de potasio o sodio de calidad comercial. El pH del proceso, determina a estabilidad de estas soluciones, ya que un pH bajo favorece la pérdida de cianuro debido a la formación de ácido cianhídrico:



Un ejemplo importante de esta reacción se da cuando el ion hidrógeno se forma por la absorción de  $\text{CO}_2$  del ambiente en la solución:



Para evitar que el cianuro se pierda en la solución y controlar las emisiones de ácido cianhídrico en el entorno laboral, se agrega cal, que reacciona con los iones hidrógeno. Además, la cal también facilita la sedimentación de las partículas del mineral al final del proceso de lixiviación. Se generan diversas reacciones secundarias durante la cianuración del oro. Los componentes del mineral que intervienen en estas reacciones y consumen cianuro se denominan cianicidas.

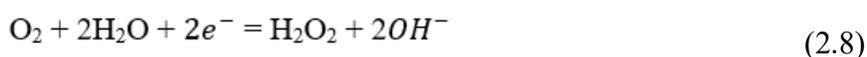
(Vargas Gallardo, 1995)

## 2.8. Mecanismo de cianuración

La lixiviación del oro puede realizarse a través de diferentes mecanismos químicos, electroquímicos y físicos. En el caso de la cianuración, el proceso de disolución está determinado por principios electroquímicos asociados con la corrosión.

Thompson (1947) demostró este fenómeno utilizando pequeñas esferas de oro en una solución de cianuro sodificado. Al hacer circular KCN libre de aire, se notó una ligera corrosión en el lado contrario al flujo del corriente pasado tres días, y una reducción a la mitad de la partícula de oro tras otros tres días.

La figura 6 ilustra el proceso electroquímico involucrado en la disolución de partículas de oro, con un diámetro de 120  $\mu\text{m}$ , en una solución de KCN en presencia de oxígeno ( $\text{O}_2$ ). Las flechas presentes en la imagen indican el flujo del oxígeno. Durante este proceso, en la región catódica se reduce el oxígeno en la superficie metálica, y en la región anódica se produce simultáneamente la oxidación del oro, de acuerdo con las estas reacciones:



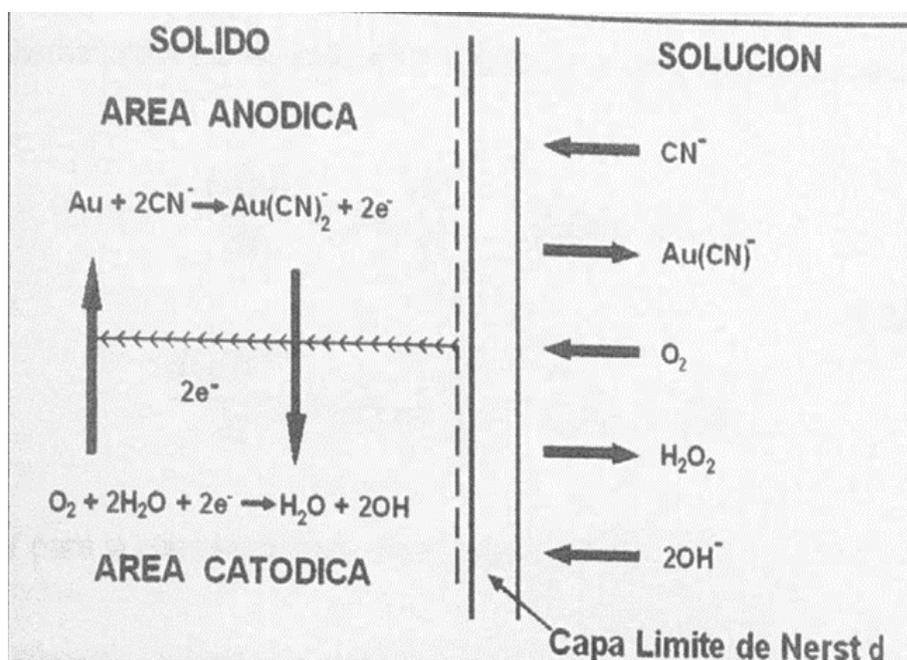


Según experimentos realizados por estudiosos, reveló que, durante el proceso de cianuración, entre la fase líquida (que incluye oxígeno disuelto y cianuro) y la fase sólida (oro), existe un intercambio de electrones. El grosor de la capa límite de Nernst, que se encuentra entre ambas fases, varía en función del método de lixiviación empleado y de la velocidad de disolución del oro.

(Misari, 1994)

### Figura 6

*Disolución del oro con cianuro mediante un mecanismo electroquímico*



Nota: (Misari, 1994)

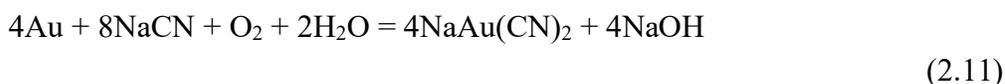
#### 2.8.1. Teorías de la Cianuración del Oro

Se han propuesto diversas teorías que explican el mecanismo de disolución del oro y la plata en una solución acuosa de cianuro. A continuación, se presentan un resumen de estas teorías, basado

en el trabajo de Habashi (1997).

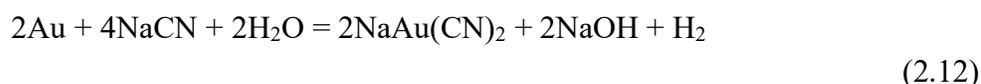
**a. Teoría del oxígeno.**

Elsner identificó en 1846 que el oxígeno desempeña un papel fundamental en la disolución del oro en una solución de cianuro. La ecuación que esta teoría representa es:



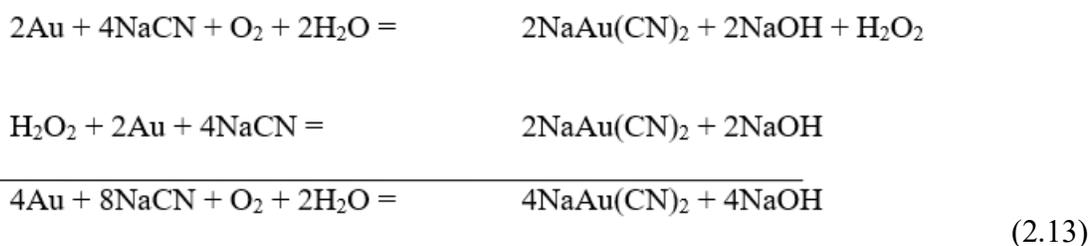
**b. Teoría del hidrógeno**

L. Janin en sus trabajos de 1888 y 1892, propuso que durante el proceso de cianuración del oro se libera gas hidrógeno. La ecuación que describe este proceso es:



**c. Teoría del Peróxido de Hidrógeno**

G. Bodländer, en 1896, sugirió que la disolución del oro en cianuro se lleva a cabo en dos etapas, como se detalla en las siguientes ecuaciones:



El peróxido de hidrógeno es formado como un producto intermedio durante el proceso. Bodländer demostró experimentalmente que según su ecuación se genera aproximadamente el 70% de la cantidad teórica de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Los experimentos revelaron que la disolución de oro y plata en una solución de  $\text{NaCN}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , en ausencia de oxígeno, es un proceso lento. Por consiguiente, la segunda reacción propuesta por Bodländer es:



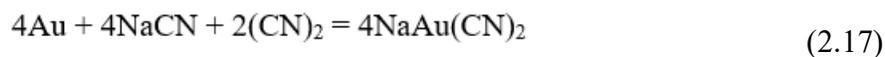
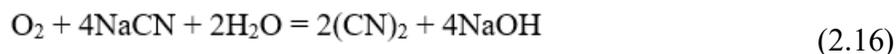
El cual representa una etapa de la reducción,  $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^-$

La segunda reacción de Bodländer ocurre solo en menor medida. Además, la presencia de grandes cantidades de peróxido de hidrógeno puede inhibir la disolución del oro, ya que el  $\text{H}_2\text{O}_2$  puede oxidar el ion cianuro a ion cianato, el cual no tiene efecto disolvente sobre el metal:



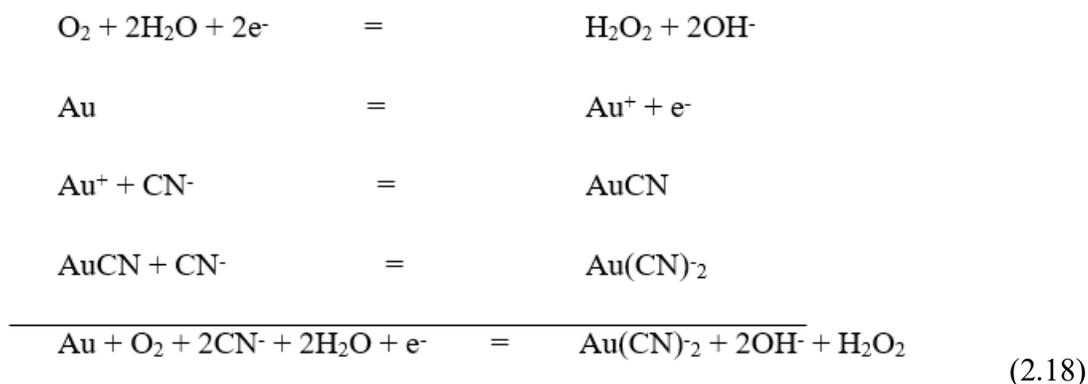
#### d. Formación del Cianógeno.

S. B. Christy en 1891, propuso que el oxígeno es fundamental para la formación de cianógeno, considerado el reactivo activo en la disolución del oro. Las ecuaciones que describen este proceso son:



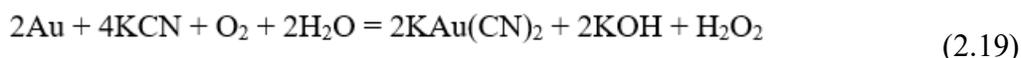
#### e. Teoría de la Corrosión

B. Boonstra, en 1943, mostró que el proceso de disolver el oro en una solución de cianuro, se asemeja al proceso de corrosión de un metal, en el que el oxígeno disuelto forma peróxido de hidrógeno y el ion hidroxilo. Por ende, la ecuación de Bodländer debe dividirse en los siguientes pasos:



La teoría del hidrógeno propuesta por Janin en 1888 es la única de las formulaciones que no reconoce la necesidad de oxígeno en el proceso de cianuración de oro y plata, un hecho que ya había sido demostrado experimentalmente desde el siglo XIX por Faraday y otros investigadores. En contraste, fundamentada en las ecuaciones de Elsner y Bodländer, la evaluación termodinámica de la teoría del oxígeno, revela una constante de equilibrio alta. Esto sugiere que la reacción persistirá hasta que se consuma todo el cianuro o se disuelva por completo el oro.

Habashi (1997), analizando la teoría de cianuración, respalda la primera ecuación de Bodlander, como la descripción principal del proceso de disolución del oro en cianuro.



Además, enfatiza que el proceso es lento, según lo comprobado en los experimentos sobre la cinética de la segunda ecuación de Bodländer.

(Misari, 1994).

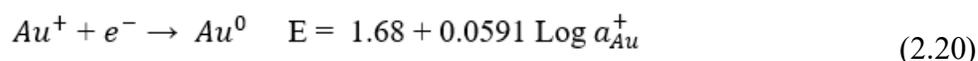
## 2.9. Termodinámica de la cianuración

Es fundamental analizar los principales propiedades termodinámicas que intervienen en la lixiviación del oro, para comprender los mecanismos fisicoquímicos, prestando especial atención a sus estados estables y metaestables. Estos estados suelen representarse mediante los diagramas de Pourbaix, los cuales muestran la relación entre el potencial de oxidación-reducción (Eh) del metal y el pH en el que se trabaja (ver figura 7).

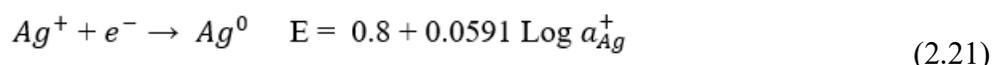
En los diagramas de Pourbaix se revelan compuestos como  $\text{Au}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AuO}_2$ ,  $\text{HAuO}_3^{2-}$  y el ion  $\text{Au}^{3+}$  necesitan potenciales Redox elevados, mayores al potencial de descomposición del oxígeno, para formarse. Esto sugiere que la lixiviación del oro en estado metálico es complicada debido a la gran estabilidad que presenta el oro en su forma metálica.

Desde un punto de vista termodinámico, el proceso de cianuración del oro puede interpretarse mediante un diagrama de potencial en función del pH, que se elabora a partir de las siguientes ecuaciones:

Para el oro:



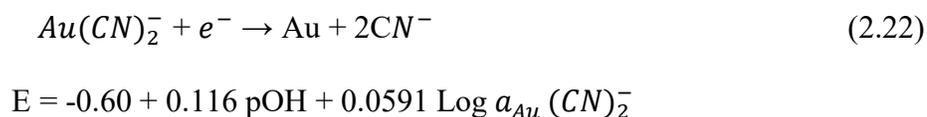
Para la plata:



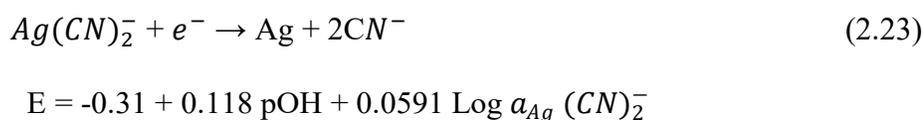
En esta ecuación, E representa el potencial químico, mientras que  $a_{Au}$  es la actividades químicas del oro y  $a_{Ag}$  es la actividades químicas de la plata.

Las ecuaciones que describe la disolución del oro y la plata son las siguientes:

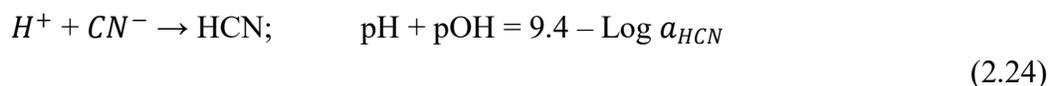
Para el oro:



Para la plata:



Cuando el pH desciende a 9.4, se produce una pérdida considerable de cianuro, ya que se forma el compuesto HCN, conforme a la siguiente fórmula:



Para hallar el contenido total de cianuro (A) en la práctica se define mediante la ecuación:

$$A = a_{HCN} + a_{CN}$$

Entonces la ecuación (2.35) se convierte en:

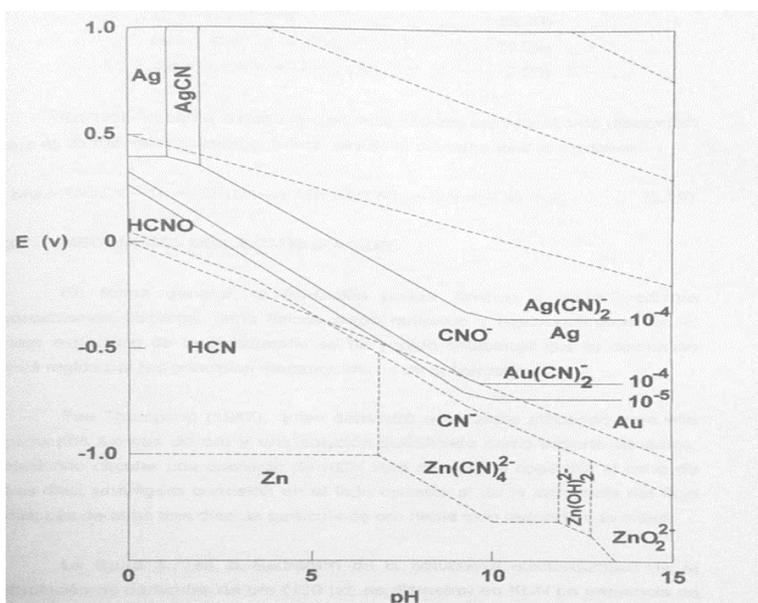
$$\text{pH} + \text{pOH} = 9.4 - \text{Log A} + \text{Log}(1 + 10^{\text{pH}-9.4}) \quad (2.25)$$

Al combinar las ecuaciones (2.36), (2.33) y (2.34), se puede representar mediante un diagrama de Eh frente al pH, el equilibrio de disolución del oro y la plata. La figura 7 se elaboró con  $A = 0.001 \text{ M}$ , lo que equivale aproximadamente a una concentración de 0.05% de NaCN.

Se encuentra una estabilidad de las actividades de  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  y  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  a concentraciones del orden de  $10^{-4}$ , lo que equivale aproximadamente a concentraciones de oro de  $10 \text{ gr/m}^3$  y de plata de  $20 \text{ gr/m}^3$ .

### Figura 7

*Diagrama Eh Vs pH en el sistema Au-Zn-CN<sup>-1</sup>-H<sub>2</sub>O(25°C)*



Nota: (Misari, 1994)

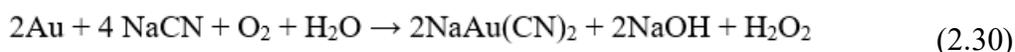
Según la figura 7, se puede notar que, dentro de una solución de cianuro, en condiciones de pH bajo, el oro y la plata son bastante nobles y en pH altos son menos nobles. En comparación, la plata es significativamente más inerte que el oro al estar en una solución de cianuro. Aunque por lo general a un pH de 9.4 se tiene una disolución óptima del oro y la plata, en la práctica se prefiere

un pH más alto, alrededor de 10.5, para minimizar la pérdida de HCN.

Las ecuaciones que describen las reacciones relevantes son:



En 1966, Habashi proporcionó evidencia cinética sobre el proceso de disolución del oro, lo que confirmó su naturaleza electroquímica mediante la siguiente ecuación:



## 2.10. Cinética de la Cianuración de Oro

Según Misari (1994), durante la cianuración, el tiempo necesario para lograr una recuperación óptima de oro, impacta directamente en el tamaño y costo de los tanques de lixiviación. En la práctica, el tiempo de contacto en las plantas de procesamiento de oro varía entre 10 y 72 horas.

Existe una reacción heterogénea que tiene lugar en la interfase entre el sólido y el líquido al disolver el oro en una solución de cianuro alcalina. Las velocidades de transferencia de masa de los reactivos desde el líquido hacia la interfase, y de los productos desde la interfase de vuelta al líquido, pueden afectar considerablemente la cinética global del proceso de cianuración. Por lo tanto, la velocidad de disolución depende de la velocidad de transferencia de masa en ambas fases y la reacción química en la interfase. Asimismo, la velocidad de disolución se ve influenciada por el área de la interfase de reacción, la cual se reduce progresivamente a medida que avanza el proceso.

Estudios experimentales indican que la difusión del oxígeno disuelto y los iones de cianuro a

través de la capa límite en la interfase sólido-líquido rigen la disolución del oro. La velocidad de disolución se incrementa al aumentar la concentración de oxígeno y mejorar la intensidad de la agitación. No obstante, si estos factores se incrementan en exceso, el oro puede volverse pasivo, lo que provoca una disminución en su velocidad de disolución, estabilizándose en un nivel más bajo.

(Misari, 1994)

Se ha determinado que la velocidad a la que se transfiere la masa del oxígeno en los tanques de Pachuca, está dominada principalmente por la velocidad superficial del gas, la cual se define como el flujo de aire por unidad de área del tanque. Esta transferencia de masa disminuye cuando aumenta la densidad de la pulpa o cuando el tamaño promedio de las partículas se reduce.

Diversos estudios han señalado que la cinética del proceso de cianuración de oro y plata está limitada por la difusión. A concentraciones elevadas de oxígeno, la velocidad de reacción está controlada por la difusión de los iones de cianuro a través de la capa límite líquida. En cambio, cuando las concentraciones de cianuro son altas, la velocidad se ve regulada por la difusión del oxígeno a través de esa misma capa (Misari, 1994)

Cuando la presión parcial de oxígeno se mantiene constante, la velocidad de disolución aumenta a medida que se incrementa la concentración de cianuro, hasta que alcanza un valor constante. Esto sugiere que la velocidad de disolución varía de manera lineal y es proporcional a la presión parcial de oxígeno, lo que indica un cambio en el mecanismo de control, pasando de estar limitado por la difusión de iones de cianuro a estar regulado por la difusión del oxígeno (Misari, 1994)

A bajas concentraciones de cianuro, la presión de oxígeno no tiene un efecto significativo en la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, a concentraciones elevadas de cianuro, cuando la reacción ya no está limitada por el cianuro, la velocidad de disolución depende directamente de la

presión de oxígeno. Habashi formuló una ecuación que describe la velocidad de cianuración:

$$Velocidad = \frac{2A \cdot D_{CN^-} \cdot [CN^-] \cdot [O_2]}{\delta \{D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2]\}} \text{ equiv-g/cm}^2\text{seg} \quad (2.31)$$

Donde:

A = Área de la superficie de la partícula de oro en  $\text{cm}^2$

$[CN^-], [O_2]$  = Concentraciones (en moles/ml) de cianuro y oxígeno disuelto, respectivamente,

$D_{CN^-}$  =  $1.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ : coeficiente de difusión del ion cianuro

$D_{O_2}$  =  $2.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ : coeficiente de difusión del oxígeno disuelto

$\delta$  = Espesor de la capa límite, entre 2 y  $9 \times 10^{-3} \text{ cm}$ , que depende de la intensidad y método de agitación

La ecuación de velocidad puede derivarse para cuando:

$$D_{CN^-} \cdot [CN^-]_b = 4D_{O_2} \cdot [O_2]_b \text{ o } \frac{[CN^-]_b}{[O_2]_b} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} \quad (2.32)$$

La velocidad de cianuración es entonces:

$$Velocidad = \frac{\sqrt{D_{O_2} \cdot D_{CN^-}}}{2} \cdot A \cdot [O]_b^{1/2} \cdot [CN^-]_b^{1/2} \quad (2.33)$$

De esta manera, la velocidad de disolución está influenciada por la relación de concentraciones de cianuro y oxígeno. Se ha establecido que la relación promedio de concentración es de 1.5, y se ha observado que se llega a la velocidad limitante al llegar a una proporción de cianuro a oxígeno en la solución igual a seis:

$$\frac{[CN^-]_b}{[O_2]_b} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 6$$

**Tabla 1**

*Valores estimados de coeficientes de difusión.*

Temp. °C	KNC %	DKNC cm <sup>2</sup> /s	Cm <sup>2</sup> /s	Investigador
18	-	1.72 x 10 <sup>-5</sup>	2.54 x 10 <sup>-5</sup>	White, 1994
25	0.03	2.01 x 10 <sup>-5</sup>	3.54 x 10 <sup>-5</sup>	Kameda, 1949b
27	0.0175	1.75 x 10 <sup>-5</sup>	2.20 x 10 <sup>-5</sup>	Kudryk y Kellogg, 1954
Promedio	-	-	-	1.5

Nota: (Misari, 1994)

Al utilizar soluciones con exceso de cianuro en relación con el oxígeno disuelto puede resultar en un desperdicio innecesario de cianuro. Por el contrario, si se logra saturar la solución con oxígeno en un entorno con deficiencia de cianuro, la velocidad de la cianuración se verá afectada negativamente. Para optimizar la velocidad de cianuración y, en consecuencia, mejorar la productividad de la planta, es esencial mantener una relación molar óptima entre cianuro y oxígeno disuelto, que idealmente debería ser alrededor de seis. En los tanques de lixiviación, Los analizadores de cianuro que se utilizan en línea, son herramientas valiosas para monitorizar y ajustar la concentración de cianuro, permitiendo una aireación intensiva que asegura la máxima cantidad de oxígeno disuelto bajo las condiciones operativas específicas (Misari, 1994)

### **2.10.1 Uso de Oxígeno puro en la Cianuración**

Según Misari (1994), cualquier agente oxidante como el oxígeno, es fundamental para disolver el oro y la plata en los procesos de cianuración bajo condiciones normales. Históricamente, se han empleado variedad de agentes oxidantes, como por ejemplo el peróxido de sodio, el bromo, el permanganato de potasio y el cloro, obteniendo resultados aceptables en el proceso de disolución del oro. Sin embargo, debido a su alto costo y las dificultades asociadas con su manejo, estos agentes han sido reemplazados en la actualidad. Investigaciones realizadas por Barsky, Swaison y

Hedley indican que en una solución de cianuro, la tasa de disolución del oro, está estrictamente relacionada con la cantidad de oxígeno introducidos en la solución (ver tabla 2).

**Tabla 2**

*Influencia del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro*

OXIGENO	VELOCIDAD DE DISOLUCION
(%)	(mg/cm <sup>2</sup> /h)
0	0.04
9.6	1.03
20.9	2.36
60.1	7.62
99.5	12.62

Nota: (Misari, 1994)

### **2.10.2. Efecto de la Temperatura en la Velocidad de Cianuración**

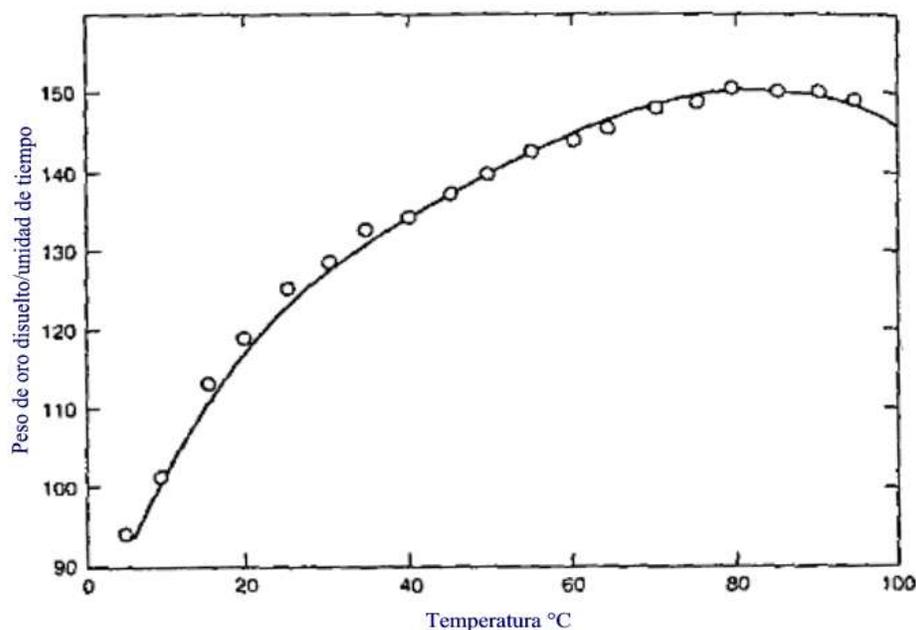
El calentamiento de la solución de cianuro que contiene oro influye en la velocidad de disolución de dos maneras: en primer lugar, aumenta la actividad de la solución, lo que acelera el proceso de disolución; en segundo lugar, reduce la solubilidad del oxígeno, debido a al incrementar la temperatura, la solubilidad de los gases disminuye.

La Fig. 8 muestra cómo a una temperatura variante y una solución de 0.25% de KCN, varía la solubilidad del oro. Se observa que la velocidad de disolución alcanza su punto máximo alrededor de 85°C, a pesar de que el contenido de oxígeno en la solución a esta temperatura es menos de la mitad del que se encuentra a 25°C. A 100°C, la velocidad de disolución del oro es solo ligeramente inferior al máximo, aunque a esta temperatura la solución carece de oxígeno disuelto. Este

fenómeno se atribuye a la menor capacidad de un electrodo para retener o absorber hidrógeno en soluciones calentadas en comparación con las frías.

### Figura 8

*Influencia de temperatura en velocidad de disolución del oro*



Nota: (Misari, 1994)

Así, la fuerza electromotriz contraria máxima (EMF) generada por la polarización disminuye a medida que la temperatura de la solución aumenta. En última instancia, la EMF generada por el oro en disolución pierde su capacidad para mantener el equilibrio de polarización, lo que permite que la disolución del oro ocurra sin la presencia de oxígeno. Por lo tanto, la polarización se puede evitar a través de dos mecanismos: primero, con la presencia de oxígeno, que oxida el hidrógeno en la superficie del oro y facilita la disolución a temperaturas más bajas; y segundo, el aumento de temperatura, que elimina el hidrógeno de la superficie del oro, permitiendo que la disolución avance sin requerir oxígeno.

(Misari, 1994).

## 2.7. Efectos aceleradores y retardadores

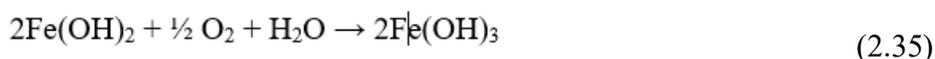
Haden fue el primer investigador en examinar cómo ciertos elementos pueden acelerar a que el oro se disuelva en soluciones de cianuro. Otros estudios realizados más adelante, dieron a conocer que sales de mercurio y plomo en pequeñas cantidades, pueden acelerar el proceso de lixiviación. Investigaciones adicionales encontraron que las sales de talio y bismuto tienen un efecto similar. Este fenómeno puede explicarse por la modificación de la capa límite de Nernst, que se vuelve más delgada, lo que acelera la difusión y, por ende, la disolución. Sin embargo, un aumento en la cantidad de plomo puede ralentizar el proceso. Otros cationes como  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  también pueden tener efectos retardadores.

El efecto de ralentización podría deberse a una o más de las siguientes causas, que se detallan a continuación.

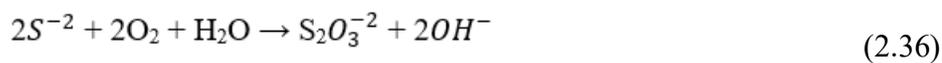
(Habashi, 1997)

### 2.7.1 Pérdida de oxígeno en la pulpa

La disponibilidad de oxígeno es esencial para facilitar la disolución, ya que su escasez puede ralentizar significativamente el proceso. Un caso ilustrativo es la pirrotita, que se descompone de manera rápida, produciendo hidróxidos ferrosos que luego se oxidan al entrar en contacto con el oxígeno:



El azufre también sufre oxidación, dando lugar a la formación de tiosulfuros:

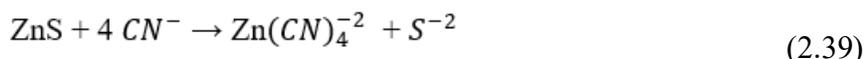




### 2.7.2. Pérdida de cianuro en la pulpa

El cianuro libre puede ser consumido por varios factores, entre ellos:

- 1) La generación de complejos cianurados desde iones solubles:

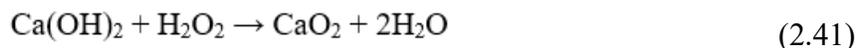


- 2) La formación de tiocianatos a partir de los iones de azufre liberados por los sulfuros solubles.



- 3) La creación de finas capas sobre la superficie del metal que impiden su disolución debido a:

- La formación de sulfuro de oro insoluble sobre la superficie de las partículas de oro al estar presente los sulfuros.
- El desarrollo de capas delgadas que dificultan la disolución, como el sulfuro de oro insoluble en ambientes con sulfuros, la deposición de peróxidos y la formación de óxido de calcio, derivado de la descomposición del hidróxido de calcio cuando el pH supera 11.3, de acuerdo con la siguiente reacción:



- La formación de óxidos insolubles, como el oro, en presencia de ozono, el cual también actúa sobre el cianuro de potasio, oxidándolo:



- La formación de  $Pb(CN)_2$ , llamados cianuros insolubles, como resultante de la

reacción del cianuro libre con el plomo.

(Habashi, 1997)

### 2.11. Regeneración de cianuro

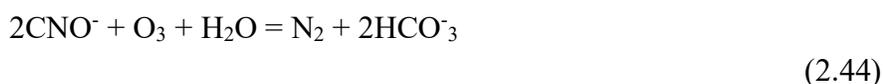
El consumo de cianuro se debe principalmente a la formación de cianuro o compuestos complejos de cianógeno con metales comunes. Las soluciones de cianuro que contienen estos compuestos complejos son menos eficientes como disolventes del oro. Por ejemplo, se genera iones de cianuro complejos solubles al precipitar el oro de la solución de cianuro utilizando zinc.

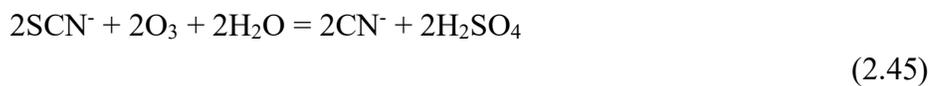
El método habitual para regenerar cianuro consiste en acidificar las soluciones con ácido sulfúrico, SO<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>. La solución acidificada se traslada a un tanque cerrado para realizar una intensa aireación, lo que permite que el cianuro de hidrógeno sea transportado por el aire hacia varias columnas de absorción. Durante este proceso, la acidificación provoca la formación de precipitados coloidales de complejos de cianuro con metales comunes, los cuales pueden interferir con las operaciones de aireación y absorción ya que son difíciles de eliminar.

(Misari, 1994).

### 2.12. Destrucción de Cianuro

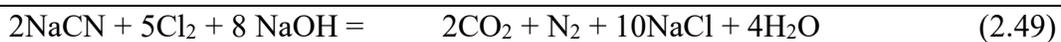
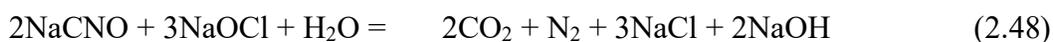
Misari (1994) señala que el cianuro se descompone biológicamente en amoníaco y dióxido de carbono. Además, el cianuro, el tiocianato y el cianato pueden ser eliminados mediante ozono, según las reacciones siguientes:





La biodegradación del cianuro se acelera con la exposición a la luz solar, mientras que se ralentiza en temperaturas bajas durante el invierno. Se puede oxidar el cianuro complejo usando luz ultravioleta con ciertos iones metálicos (como Au o Ag, Ni, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>).

El cianuro libre puede ser destruido mediante cloro, con las siguientes reacciones:



## CAPITULO III

### HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

- Aplicando el proceso de cianuración por agitación en la minera San Lucas, se tiene una óptima extracción de oro.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas.

- A una dosificación ideal de cianuro de sodio se tiene un buen porcentaje de extracción de oro.
- A una cantidad óptima de porcentaje de sólidos en la pulpa, se llega a una buena extracción de oro.
- A un pH adecuado en la pulpa se logra un buen % de extracción de oro.

#### 3.2. Variables

##### 3.2.1. Variables dependientes

- Extracción de oro

##### 3.2.2. Variables independientes

- Concentración de cianuro de sodio.
- Porcentaje de sólidos.
- pH de pulpa.

### **3.2.3. Variables intervinientes**

- Temperatura ambiente

### **3.3. Indicadores**

- Porcentaje
- Gramos por tonelada métrica
- Pulgadas
- Días
- pH metro

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍA

#### 4.1. Ubicación, acceso y geología del yacimiento.

##### 4.1.1. Ubicación

La minera está ubicada en la región de Apurímac, Provincia de Grau, distrito de Progreso y anexo de San Fernando (Ver ANEXO 01). Esta zona tiene un gran potencial minero siendo así muy rica en cuanto al contenido de Oro y Plata, los cuales son extraídos desde tiempos coloniales.

La propiedad de Cochasayhuas, con una extensión de 5,836 hectáreas, se encuentra al oeste de los proyectos mineros Las Bambas (Xstrata) y Haquira (First Quantum). En esta área se ubica la mina San Fernando, que operó de manera ininterrumpida desde 1912 hasta 1952. La producción de la mina se concentró en un sistema de vetas conocido como la veta de Cochasayhuas. Además de este sistema, la propiedad alberga dos sistemas adicionales de vetas principales llamadas “**San Lucas**”.

- Población estimada al 30 de junio del 2017: 3325 habitantes.
- Su superficie es de 5,836 hectáreas.
- Longitud: 72° 27' (Oeste)
- Latitud: 14° 5' (Sur)
- Altitud promedio de: 4456 msnm.

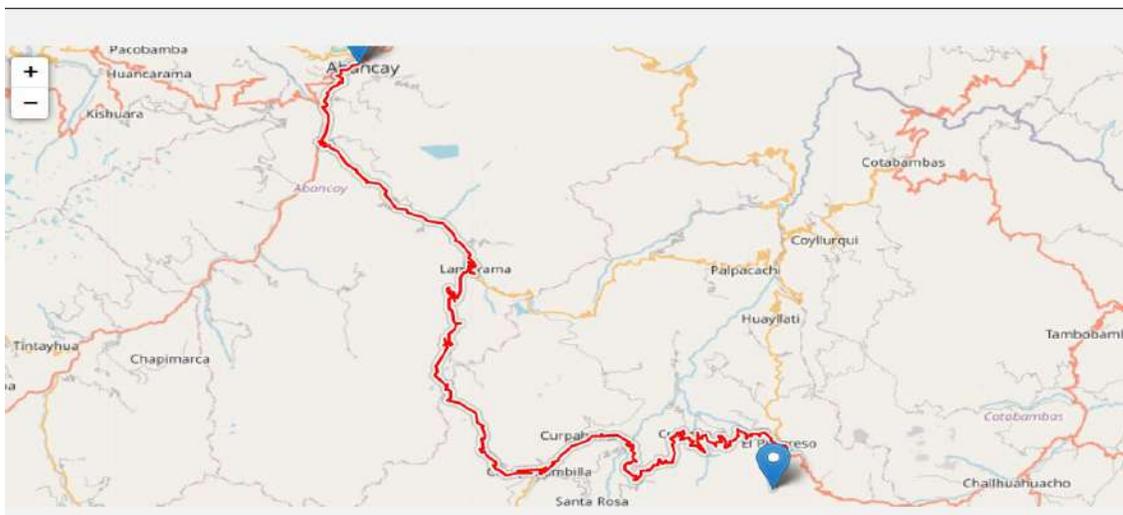
##### 4.1.2. Acceso

El acceso al yacimiento de Cochasayhuas se realiza por vía terrestre, cubriendo una distancia de 195.89 kilómetros (121.45 millas) desde Abancay, con un tiempo estimado de viaje de aproximadamente 6 horas. La carretera está pavimentada desde Abancay hasta el distrito de

Progreso; desde allí, el trayecto continúa por una carretera de trocha hasta el yacimiento. El recorrido pasa por los distritos de Abancay, Lambrama, Chuquibambilla, Progreso y San Fernando (figura 9), conectando con los principales centros mineros de la región

### Figura 9

#### *Ruta de acceso Abancay - Cochasayhuas*



Nota: <https://www.google.com/maps/dir/Abancay,+Apu%C3%ADmac/Cochasayhuas>

#### 4.1.3. Geología del yacimiento

El depósito de Cochasayhuas es un yacimiento epithermal de baja sulfuración, donde el cuarzo está asociado con minerales como calcopirita, bornita, galena, argentita, esfalerita y rodocrosita. Este depósito presenta dos fases de mineralización: la primera está relacionada con el oro, y la segunda con plata, cobre, zinc y plomo.

En el área de explotación, la veta de Cochasayhuas se orienta en dirección N 15-20 E con una inclinación de 50-60 grados hacia el sur. Tiene un ancho que varía entre 1 y 1.5 metros, llegando a ensancharse hasta 10 metros en algunos puntos. Su extensión conocida es de 3 kilómetros, alcanzando incluso fuera de la propiedad. Por otro lado, la veta de San Fernando, que se encuentra dentro de la propiedad, se extiende a lo largo de 3.5 kilómetros y se orienta en dirección N 20-35



#### **4.4. Universo y muestra**

##### **4.4.1. Universo**

El yacimiento mineralógico está ubicado en el departamento de Apurímac, en la provincia de Grau y el distrito de Progreso. 2<sup>3</sup>

##### **4.4.2 Población**

La población de nuestra investigación estará compuesta por los minerales de oro del yacimiento Cochasayhuas - San Lucas, situado en la provincia Grau.

##### **4.4.3 Muestra**

La muestra es 50 kg de mineral.

#### **4.5. Métodos y dispositivos para la obtención de datos**

Se emplearán estrategias de investigación basadas en la observación, revisión documental y clasificación de fuentes teóricas primarias y secundarias extraídas de páginas web. Este enfoque permitirá procesar la información documental con el objetivo de caracterizar en detalle los aspectos físicos, químicos, metalúrgicos y ambientales del tema en estudio.

##### **4.5.1. Instrumento de recolección de datos**

- Reconocimiento de la zona de trabajo y evaluación de su influencia.
- Trabajo y observación en el campo.
- Registro de datos en el cuaderno de campo.
- Recopilación de información adicional.

Se consultaron las siguientes fuentes:

**a. Fuentes primarias**

- Recolección de libros y textos especializados
- Consulta de páginas web relevantes.
- Revisión de artículos de investigación científica.

**b. Fuentes secundarias**

- Información sobre el procesamiento de oro en la minera San Lucas

**4.6. Procesamiento y Análisis de Datos**

Para la evaluación de datos en nuestro estudio, utilizaremos los siguientes métodos y herramientas:

- Diseño factorial  $2^3$  con tres replicas centrales
- Análisis de datos mediante el software Minitab
- Elaboración de tablas
- Creación de gráficos y figuras usando Microsoft Excel.

## CAPÍTULO V

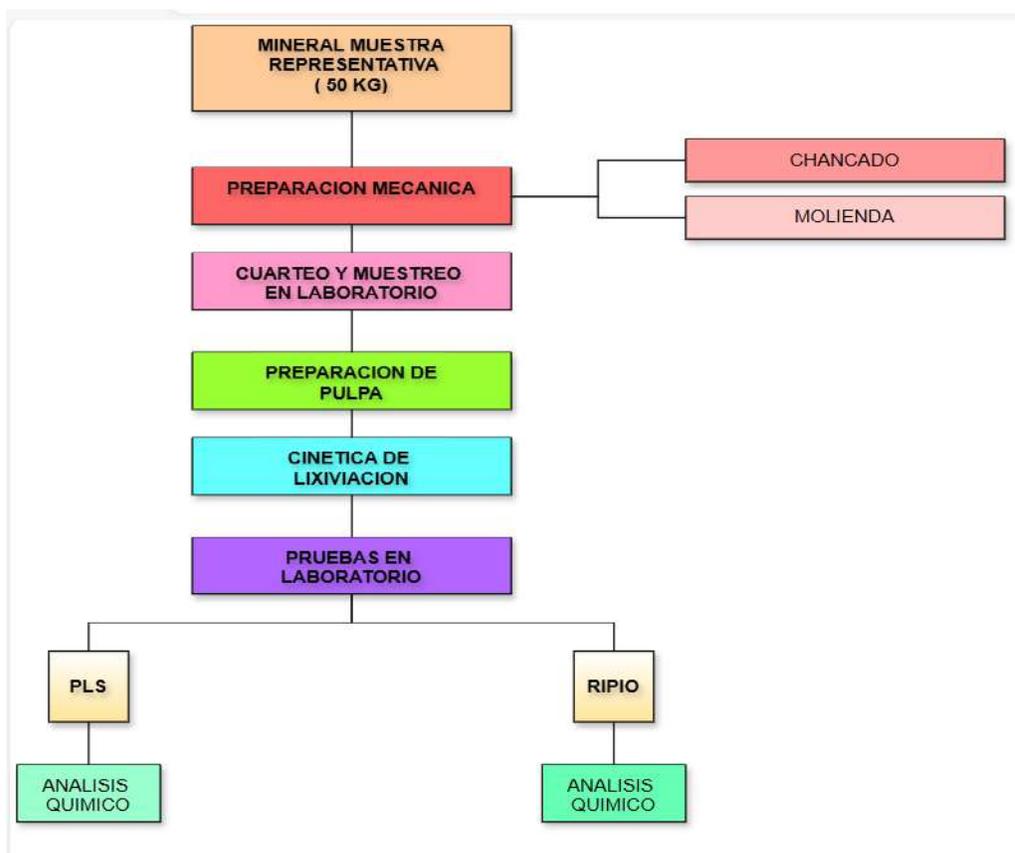
### TRABAJO EXPERIMENTAL

#### 5.1. Introducción.

Para Para llevar a cabo este trabajo, se realizaron varios ensayos experimentales con el objetivo en identificar y establecer cada una de las variables que influirán en la etapa de cianuración. Esta investigación está enfocada principalmente en la determinación de las variables operativas clave, aplicando la metodología de diseño experimental conocida como diseño con dos o más factores  $2^k$ . El procedimiento experimental de esta investigación se presenta en la figura 10.

**Figura 10**

*Diagrama de flujo del procedimiento de estudio experimental*



NOTA: Elaboración propia

### 5.1.1 Protocolo escrito de trabajo seguro

<b>Grupo de trabajo</b>	<b>Cantidad</b>
Tesistas	02
Encargado de laboratorio	01

#### 5.1.1.1 Dispositivos de protección personal

- 2.1. Respirador de media cara para gases y polvo
- 2.2. Guantes de látex y neopreno
- 2.3. Tapones de oído u orejeras
- 2.4. Lentes de seguridad
- 2.5. Casco de protección
- 2.6. Zapatos de seguridad
- 2.7. Tyvek
- 2.8. Botas de jebe cuando habrá contacto con pulpa.

#### 5.1.1.2 Equipos / herramientas / materiales.

##### **Equipos**

- Trituradora de quijadas
- Chancadora cónica
- Molino de bond.
- Balanza marcy
- Conjunto de Tamices rotativos
- Balanza de precisión
- PHmetro

- Rotador de botellas

### **Herramientas**

- Espátulas
- Brochas
- Cuarteadores
- Pizeta
- Probeta
- Bureta
- Vasos de precipitación
- Fiola
- Soporte universal

### **Materiales**

- Tablero
- Calculadora
- Cronometro
- Botella de vidrio

#### **5.1.1.3 Procedimiento técnico.**

1. Fraccionar y homogenizar el mineral.
2. Elegir una muestra representativa y preparar el mineral mecánicamente según las mallas especificadas: diez, cien y doscientos.

3. Realizar el pesaje de 1 kg en recurso mineral y 100 gramos de mineral de forma individual embolsado.
4. Disponer 100 g de mineral en un vaso de precipitación de 400 ml y agregar 200 ml de agua. Determinar la acidez del mineral y ajustar la medida del pH a 10.5-11 utilizando cal o soda cáustica.
5. Colocar el mineral de 1 kg en una botella de plástico o vidrio y añadir agua potable según el porcentaje de sólidos que se va a trabajar.
6. Añadir la cantidad de cal establecida en la etapa cuatro para lograr un grado alcalino en la pulpa (pH igual a 11) en la muestra (1 kg.)
7. Incorporar X g de NaCN de acuerdo con la [NaCN] a utilizar.
8. Ubicar la botella al dispositivo de agitación rotatorio.
9. Luego de 1 hora, extraiga la botella.
10. Verter 50 ml de la pulpa cianurada en un frasco de precipitación de 250 ml y devolver la botella al equipo de agitación.
11. Registrar el pH.
12. Separar la pulpa hasta conseguir 10 ml en solución filtrada.
13. Verter la solución filtrada en un matraz de 250 ml y agregar 3 gotas de indicador KI al (cinco por ciento).
14. Realizar la titulación con  $\text{AgNO}_3$  para alcanzar un tono amarillento.
15. Registrar el volumen usado.
16. Medir 10 ml de la solución separada restante (guardar en recipientes de plástico codificar N° botella y hora), para su posterior análisis por Au, Ag y Cu.

17. Con el volumen consumido de  $\text{AgNO}_3$ , determine el volumen de  $\text{NaCN}$  necesario para su posterior reposición
18. Restituir el volumen de  $\text{NaCN}$  (equivalente en g de cianuro de sodio), el sobrante del vaso, asegurándose de lavar el lodo del papel filtro y colocándolo dentro de la botella, así como en el dispositivo de agitación de botellas.
19. Volver a realizar los pasos 12 a 18 cada hora, o según criterio en base al consumo que presente el mineral, registrando el volumen utilizado de  $\text{AgNO}_3$  y el volumen añadido de  $\text{NaCN}$  en la botella.
20. Este procedimiento se dará por 72 horas, hasta obtener la última solución rica (10 ml).
21. Al término de la prueba, verter la pulpa contenida en la botella en un recipiente.
22. Agregar floculante y dejar reposar con previa agitación durante 15 minutos, se formará un precipitado (sólidos).
23. Retirar el precipitado (sólido) de la solución cianurada (solución enriquecida).
24. Verter los sólidos dentro de la botella de prueba.
25. Elaborar una solución de cal (2 L) y verterla en la botella para su lavado

#### **5.1.1.4 Ingreso al laboratorio:**

- Los tesisistas al momento del ingreso al laboratorio metalúrgico deberán registrar su ingreso y salida
- Al ingreso los tesisistas deberán contar con equipos de protección personal
- El tesisista que no reciba el entrenamiento y/o inducción de ingreso al laboratorio metalúrgico, No podrá ingresar al interior del cerco perimétrico.

#### **5.1.1.5 Riesgos**

- Caídas al mismo nivel y desnivel.
- Exposición a bajas y altas temperaturas
- Descargas eléctricas, inundaciones, superficies resbalosas.
- Tiempo de exposición a ruido.
- Contacto de la piel o los ojos con sustancias químicas nocivas
- Exposición a la inhalación de vapores tóxicos y a ingesta
- Contacto con equipos en movimiento.

#### **5.1.1.6 Medidas de control**

- Aplicación de Orden y limpieza, Uso de 3 puntos de apoyo para transitar.
- Uso de EPPs específicos lentes de seguridad y guantes neopreno.
- Uso de respirador de media cara con cartuchos para gases (6002/6003).
- Tener disponibilidad de los Lavaojos.
- Aplicación del estándar de “Gestión de Materiales Peligrosos”.
- Verificar buen estado de PHmetro

#### **5.1.1.7 Restricciones**

- Los tesistas tienen que contar con capacidades de uso de materiales peligrosos - reactivos
- Solo los tesistas podrán participar en la ejecución de la tarea.
- Por ningún motivo ingerir alimentos durante la práctica en el laboratorio antes de retirarse del laboratorio, lávese las manos con jabón y agua.

## 5.2. Mineral muestra representativa

Para conseguir una muestra representativa del mineral y llevar a cabo las pruebas necesarias, se tomó una muestra de 50 kilos (figura 11) de las canchas de mineral por medio de cuarteos sucesivos. Este procedimiento aseguró una cantidad adecuada y representativa de muestra para las pruebas mencionadas. Posteriormente, la muestra fue transportada desde la minera artesanal San Lucas hasta los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

### Figura 11

*Toma de muestra del stock*



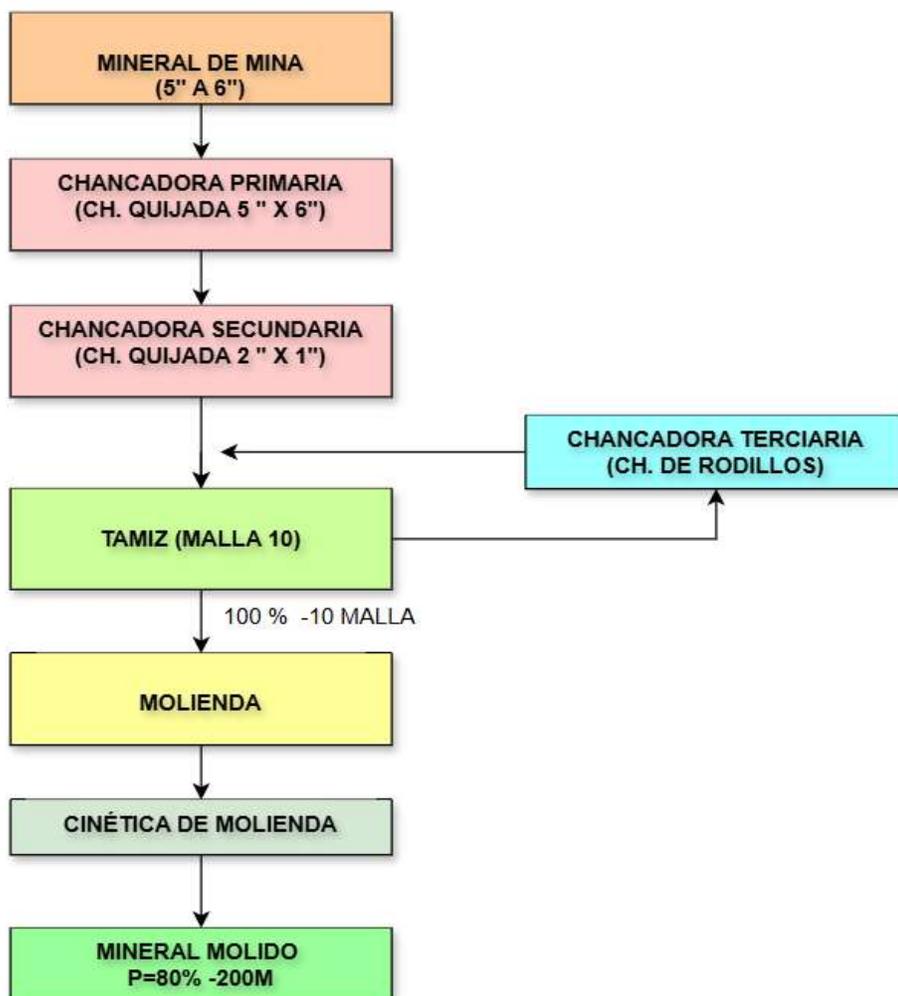
Nota: Elaboración propia

## 5.3. Preparación mecánica

En esta etapa se emplean equipos de laboratorio metalúrgico, tales como chancadoras de quijada, chancadora de rodillos y molino de bolas.

**Figura 12**

*Diagrama de flujo para preparación mecánica de las muestras*



Nota: Elaboración propia

### 5.3.1 Chancado

1.- Se realizó el chancado de todo el mineral traído, pasando por dos chancadoras de quijetas (chancadora primaria y secundaria), obteniendo tamaños de partícula que varían entre  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ ", con una duración de una hora.

2.- Se siguió con la fragmentación del mineral en la trituradora de rodillos (como chancadora terciaria) en un tiempo de 0.30 horas. Llegando a un producto de malla 100% - 10 mallas.

### 5.3.2 Molienda

1.- Se realizó el cuarteo del mineral chancado, de los cuales 12.5 Kg fue enviada a la etapa de molienda

2.- Se volvió a realizar el cuarteo para sacar muestras de 1 Kg, para realizar la molienda a diferentes tiempos y encontrar el P80 a -200M.

3.- Después de completar la molienda, se realizó un nuevo cuarteo utilizando la técnica de cuarteo tipo pastel para la obtención de una muestra de 100 gramos y llevar al tamizador, esto para cada tiempo de molienda.

(Ver APENDICE 03,04,05,06)

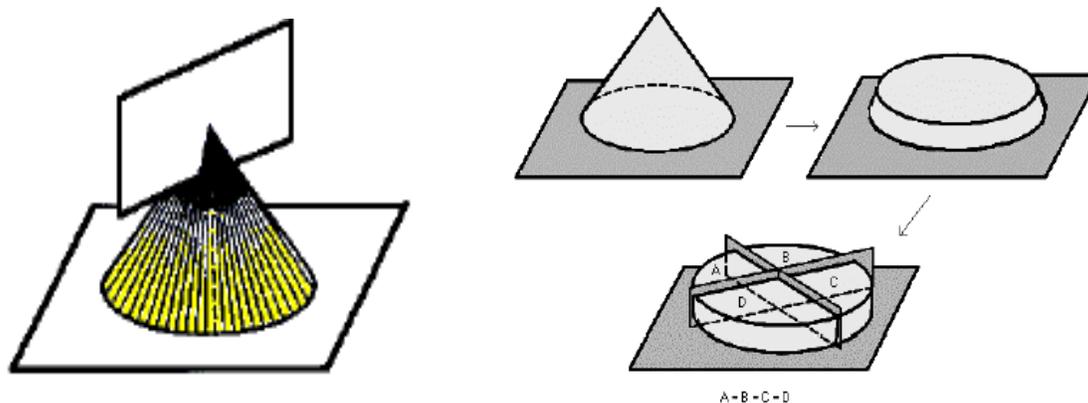
4.- Se tuvo los datos de los diferentes tiempos de molienda y se realizó los cálculos para encontrar el P80 a -200M.

### 5.4 Cuarteo y muestreo en laboratorio.

Para esta etapa, se utiliza métodos de muestreo por cono y cuarteo para etapa de chancada y molienda y el uso de muestreador rifles para etapa de preparación de pulpa.

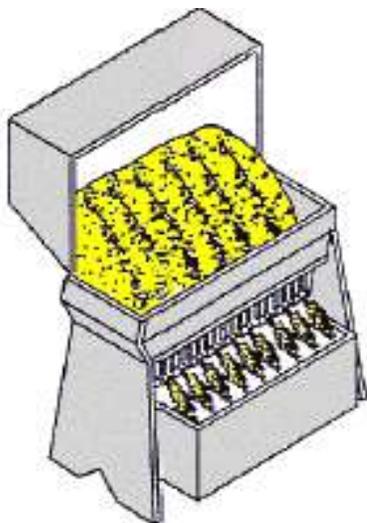
**Figura 13**

*Subdivisión de muestras por método de cono y cuarteo*



**Figura 14**

*Subdivisión de muestra en muestreador de rifles*

**Figura 15**

*Fotos de trabajos de cuarteo en laboratorio*



Nota: Elaboración propia

## 5.5. Cálculos y resultados de etapa de preparación mecánica

### 5.5.1 Evaluación granulométrico del mineral

Se realizó chancado en la trituradora de rodillos para realizar el análisis granulométrico y determinar el tamaño promedio de las partículas que se alimentarán al molino.

Materiales y equipos:

- Chancadora de quijada (1740 RPM, 60 Hz, 1Hp)
- Chancadora de rodillos (5 hp, 220 v, trifásico)
- Muestra de mineral 700 gr.
- Tamiz de la serie ASTM.
- Mallas (28, 35, 48,65, 100, 150, -150)
- Balanza de precisión electrónica.

Procedimiento:

- Muestra de mineral 700 gr.
- Tamizar en el juego de mallas A.S.T.M.
- Medir el peso del mineral que queda en cada malla con la balanza de precisión
- Realizar los cálculos

Se tiene las siguientes fórmulas para completar la tabla 4 de distribución granulométrica de la etapa de chancado

$$F(x_i) = \frac{w_i}{w} \times 100 \quad (4.1)$$

El valor del porcentaje acumulado. Retenido  $G(x_i)$  se obtiene de la siguiente manera.

$$G(x_i) = F(x_i) + F(x_i) + F(x_i) \dots + F(x_i) \quad (4.2)$$

Es una sumatoria sucesiva hasta obtener 100%.

El valor de %AC. Pasante  $F(x_i)$  se obtiene:

$$G(x_i) + F(x_i) = 100 \quad (4.3)$$

$$F(x_i) = 100 - G(x_i) \quad (4.4)$$

**Tabla 3**

*Distribución granulométrica en peso-chancadora de rodillos de laboratorio*

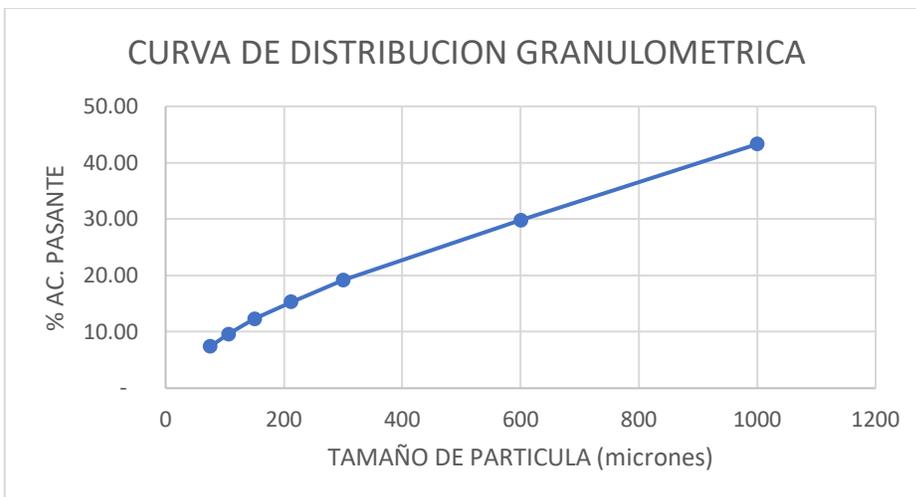
CHANCADORA DE RODILLOS					
Nº DE MALLA	Abertura micrones (um)	Peso (g)	% parcial	% Ac. Retenido	% Ac. Pasante
16	1000	396.90	56.70	56.7	43.3
28	600	94.60	13.51	70.21	29.79
48	300	74.50	10.64	80.86	19.14
70	212	27.10	3.87	84.73	15.27
100	150	21.00	3.00	87.73	12.27
150	106	18.80	2.69	90.41	9.59
200	75	15.60	2.23	92.64	7.36
-200	-75	51.50	7.36	100	-
TOTAL		700.00	100.00		

NOTA: Elaboración propia

Según la tabla 3 de la distribución granulométrica se grafica el % Acumulado Pasante vs Tamaño de partícula en la figura 16.

**Figura 16**

*Representación gráfica del análisis granulométrico*



NOTA: Elaboración propia

### **5.5.2 Cinética de molienda (Tiempo de molienda)**

#### **Materiales y equipos**

- ROTAP N°3 (Tamiz de la serie A.S.T.M.)
- Malla 16, 28,48,70,100,150,200
- Balanza electrónica Santoius (precisión: 0.1 g, a 610 g)
- Molino de bolas de laboratorio (60 HZ, 1750 RPM, 220 V. 15.8 A) de laboratorio (13"x8")
- Reloj o celular para controlar el tiempo
- 1000 g de mineral de cabeza para la molienda

#### **Procedimiento**

- Pesar 1000 g de mineral para la molienda a diferentes tiempos.
- Se realizó el tamizado a mallas: 16, 28, 48, 70, 100, 150 y 200 en cada intervalo de molienda. Para cada intervalo, se tomó una muestra de 100 g. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

**Tabla 4**

*Datos de % pasante -200M para una muestra de 100 gramos de mineral seco*

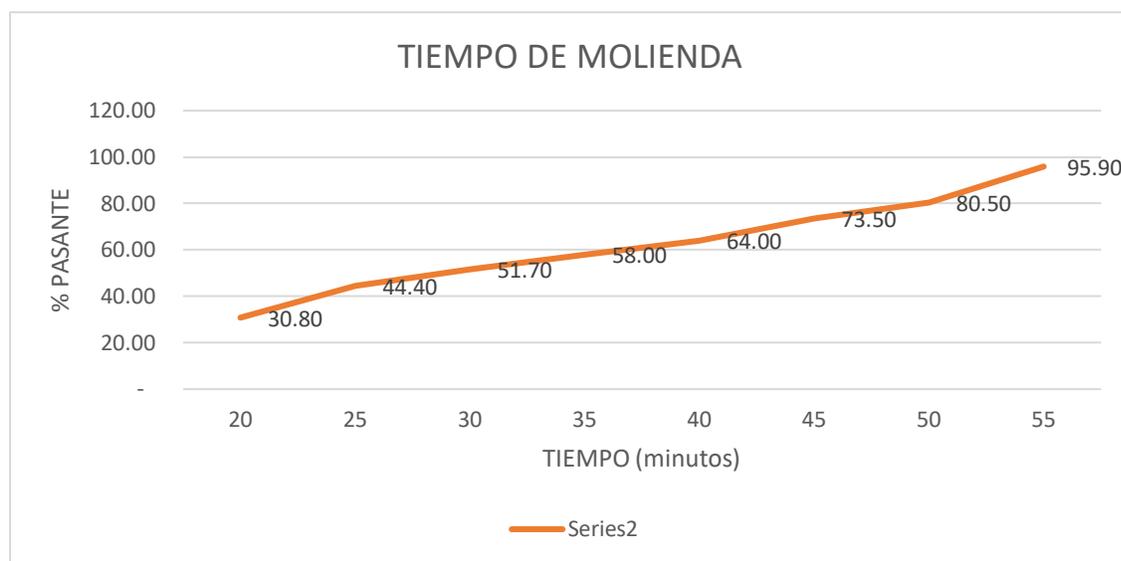
Tiempo (minutos)	Peso Pasante (g)	Porcentaje Pasante -200M (%)
20	30.8	30.8
25	44.4	44.4
30	51.7	51.7
35	58	58
40	64	64
45	73.5	73.5
50	80.5	80.5
55	95.9	95.9

Nota: Elaboración propia

A partir de los cálculos de la Tabla 4, se construye el gráfico del porcentaje pasante en función del tiempo que dura la molienda.

**Figura 17**

*Relación entre el tiempo de molienda y el % de material pasante*



Nota: Elaboración propia

Según la gráfica de la figura 17, se estima que el tiempo óptimo de molienda para lograr un P80 (80% pasante) es de 50 min.

## **5.6. Preparación de pulpa.**

Teniendo las muestras representativas de la etapa de molienda, se procede a la preparación de pulpa de mineral para llevar a cabo pruebas en laboratorio de cianuración por agitación. Para lo cual se realizan cálculos de capacidad del reactor (botella) y gravedad específica del mineral.

### **5.6.1. Cálculo de gravedad específica**

El cálculo de la gravedad específica del mineral hizo posible determinar la densidad de la pulpa, lo cual permitió obtener el peso de la muestra, su volumen y el volumen de la solución lixivante para la realización de prueba en botellas (ver figura 18). Utilizamos el principio de Arquímedes mediante el método de desplazamiento de volumen. Se seleccionó una muestra representativa y, utilizando una probeta, se procedió a calcular su gravedad específica.

### **Materiales y equipos**

- Balanza electrónica Santorius (precisión  $d=0.1g$ , máximos=610g)
- Mineral 60 g
- Agua destilada
- Pulverizador
- Bandeja
- Pizeta
- Fiola de 200 ml

### **Procedimiento**

- Se realizó el pulverizado de 60 gramos de muestra representativa por un periodo de 2

minutos

- A continuación, se pesó la fiola vacía y se registró el peso. Se llenó la misma fiola con agua, y luego se volvió a pesar.
- Se pesó 30 gramos de muestra y se agregó a la fiola.
- Después, se añadió agua a la fiola y se agitó para mezclar bien la solución. Luego, se completó con agua hasta alcanzar la medida deseada.
- Finalmente, se pesó la solución para realizar los cálculos necesarios.

### Figura 18

*Procedimiento para hallar gravedad específica*



Nota: Elaboración propia

### Cálculo de gravedad específica del mineral

Se tiene la siguiente ecuación para el cálculo de la G.E con el uso de la fiola.

$$G.E = \frac{W_{min}}{W_{min} + W_1 - W_2} \quad (4.6)$$

Donde:

$W_{\min}$  = peso del mineral

$W_1$  = peso de fiola con agua

$W_2$  = peso de fiola más agua y mineral

Se repitió el procedimiento cuatro veces y los resultados obtenidos, se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Datos para obtener gravedad específica*

PRUEBAS N°	PESO DEL MINERAL (g)	PESO DE FIOLA + AGUA (g)	PESO DE FIOLA+AGUA+MINERAL (g)	GRAVEDAD ESPECIFICA
1	30	278.42	297.31	2.7
2	30	278.45	297.3	2.69
3	30	278.43	297.32	2.7
4	30	278.4	297.33	2.71

NOTA: Elaboración propia

A partir de estos resultados, se calcula la gravedad específica promedio y su desviación estándar.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1} \quad (4.7)$$

En donde:

- $\hat{\sigma}^2$  = Desviación estándar.
- $\sum x$  = 10.8
- $\sum x^2$  = 29.16
- $(\sum x)^2$  = 116.64
- $\bar{X}$  = 2,70.
- $\hat{\sigma}$  = 0,0082

Se calcula el intervalo de confianza de la siguiente manera: Donde t-student (t para 95% de confianza es 2,57)

$$\text{Limite} = \pm L = \frac{t\partial}{\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

$$\pm L = \frac{2,57 \times 0,0082}{\sqrt{4}}$$

$$\pm L = 0,011$$

Entonces la gravedad específica será:

$$\text{G.E.} = 2,70 \pm 0,011 \text{ g/cc}$$

### 5.6.2 Capacidad del reactor y preparación de pulpa

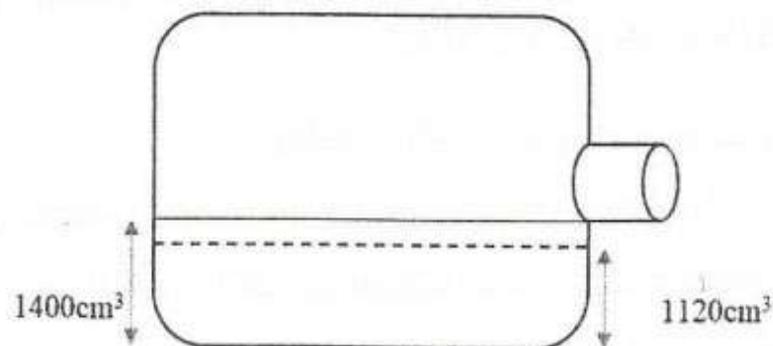
Se realizo la medida del reactor con el siguiente procedimiento:

- Se lleno con agua el reactor y después con la ayuda de una probeta se realizó la medida del volumen de agua que ingreso al reactor.
- Para la alimentación al reactor con la pulpa, se debe trabajar con 80% de su capacidad para evitar derrames de pulpa al momento de realizar la agitación.
- Se tiene los siguientes cálculos:

$$1400 \text{ cm}^3 \rightarrow 100\%$$

$$X \rightarrow 80\%$$

$$X = \frac{1400 \text{ cm}^3 \times 80\%}{100\%} = 1120 \text{ cm}^3$$



**Tabla 6**

*Cálculo de pulpa con 30% de solidos*

Producto	Para 1000 cm3 de Pulpa		Para 1120 cm3 de Pulpa	
	Gr (%)	Peso (g)	Peso (g)	volumen (cm3)
Mineral	30	369.86	414.25	153.42
Agua	70	863.01	966.58	966.58
Pulpa	100	1232.88	1380.82	1120

Nota: Elaboración propia

- Densidad de pulpa = 1,232.88 g/cm<sup>3</sup>
- % de solidos = 30

De acuerdo con la tabla 6, se necesita:

- Mineral = 414.25
- Volumen de agua = 966.58

Para alimentar al reactor con un volumen de 1120 cm<sup>3</sup> de pulpa (mineral + agua)

## **5.7. Cinética de lixiviación por agitación.**

### **5.7.1. Evaluación de variables operativas en el proceso de cianuración.**

Durante el proceso de cianuración existen variables que controlar, como: la cantidad de cianuro a utilizar y el ph del proceso, para lo cual se muestra a continuación el procedimiento a realizar.

#### **5.7.1.1. Determinación del cianuro libre.**

Se describe el procedimiento para determinar la concentración de NaCN en soluciones empleadas en el procesamiento de minerales auríferos mediante cianuración. El procedimiento consiste en titular el cianuro empleando una solución estándar de nitrato de plata, con indicador de yoduro de potasio. Al adicionar el yoduro de potasio, se facilita la observación del punto final de la titulación mediante la formación de un precipitado de yoduro de plata, que aparece cuando todo el cianuro ha reaccionado.

##### **➤ Materiales:**

- Frasco dosificador
- Recipiente de vidrio pyrex de 100ml
- Cilindro graduado de 10 ml
- Bureta de 10 ml
- Matraz de fondo cónico
- Embudo con canal vástago prolongado.

##### **➤ Reactivos:**

- Solución de yoduro de potasio al 5%
- Solución de nitrato de plata a 6,5 g/l
- Agua purificada

- Papel filtrante

➤ **Procedimiento**

Se toman 10 ml de la solución filtrada, se añaden tres gotas de yoduro de potasio, asegurando una mezcla homogénea. Posteriormente, se lleva a cabo una titulación utilizando una solución estándar de nitrato de plata hasta llegar al punto final, que se reconoce cuando la solución presenta un color amarillo pálido con un matiz opalescente.

### 5.7.1.2. pH.

Es fundamental realizar el trabajo en un entorno controlado (pH básico) para evitar la conversión de  $\text{CN}^-$  a HCN (gas), que es altamente tóxico. En las pruebas de cianuración el pH se sitúa en un rango entre 10 y 11. Para asegurar que se mantenga este rango, se monitorea el pH durante el proceso de cianuración, utilizando papel indicador o un medidor de pH digital para llevar a cabo las mediciones.

El diseño experimental aplicado para la prueba de cianuración se presenta en el siguiente diagrama de flujo.

**Figura 19**

*Diagrama de flujo de las pruebas de cianuración*



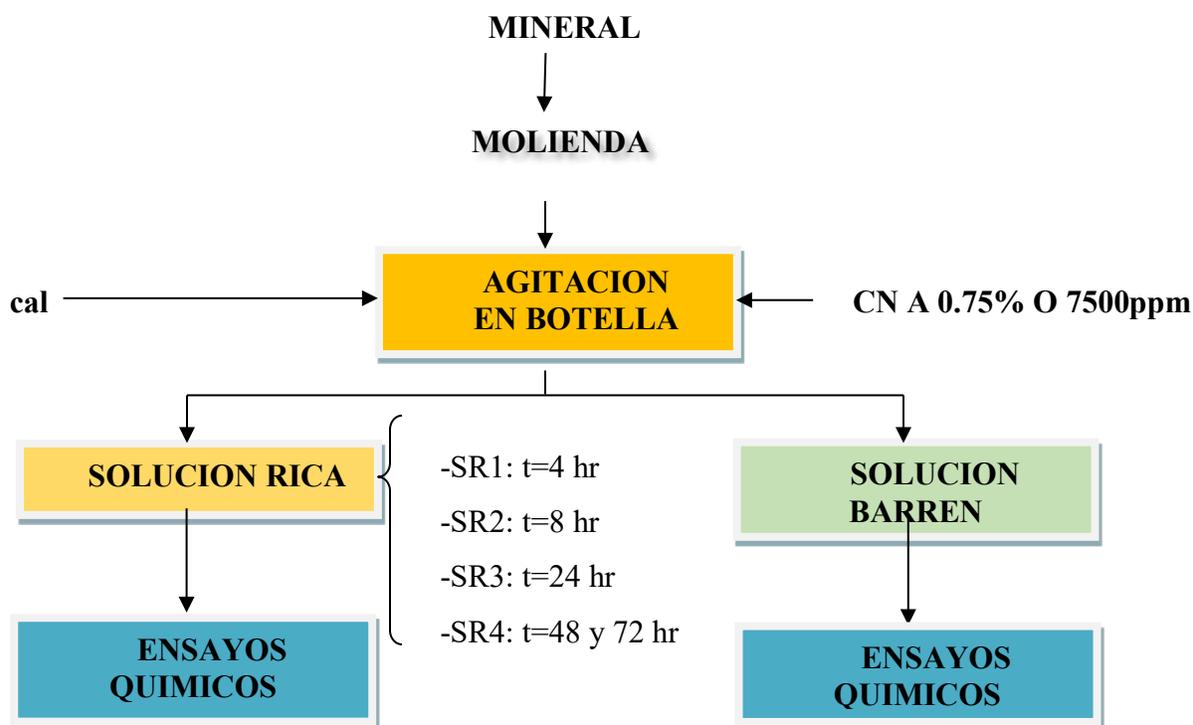
Nota: Elaboración propia

### 5.7.2 Pruebas de cinética de cianuración.

Dado que este procedimiento es esencial para el avance del trabajo de investigación, se realizó una prueba de cianuración que generó cinco muestras de solución enriquecida. Para ello, las muestras se distribuirán en distintos recipientes en los siguientes intervalos de tiempo: 4 horas, 8 horas, 24 horas, 48 horas y 72 horas. Esto permitirá establecer la ecuación cinética del mineral en análisis y determinar el tiempo adecuado para la extracción de especies minerales valiosas. El procedimiento de esta prueba se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 20.

**Figura 20**

*Diagrama de flujo del procedimiento para la prueba de cinética de lixiviación*



NOTA: Elaboración propia

#### Condiciones para la prueba de lixiviación por agitación

- Peso del mineral (g) : 414.25
- Concentración de cianuro de sodio : 0.75 g/l

- % solido : 30
- % liquido : 70
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1,120
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 966.58
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10.5
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,232.88
- Granulometría : -200 Malla al 80 % Pasante

**Tabla 7**

*Calculo para la alimentación al agitador*

Para 1120 cm <sup>3</sup> de Pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	414.25	30	153.42
Agua	966.58	70	966.58
Pulpa	1,380.82	100	1,120.00

NOTA: Elaboración propia

En la tabla 7, se presentan la cantidad de mineral y la cantidad de agua que se agrega para alimentar al reactor formando una pulpa de 1,120 cm<sup>3</sup>.

La tabla 8. Muestra el control del proceso de lixiviación para calcular la cinética del proceso.

a) Cálculo del contenido metálico

Contenido metálico = Peso producto \* ley de cabeza

$$\text{Contenido metálico} = 414.25 \text{ g} * 20.5 \frac{\text{g}}{\text{TM}} * \frac{1\text{TM}}{1000000 \text{ g}} * \frac{1000\text{mg}}{1\text{g}}$$

$$\text{Contenido metálico} = 8.492$$

b) Cálculo para el % de extracción del oro

$$\% \text{ extracción de oro} = \frac{\text{contenido metalico en PLS}}{\text{contenido metalico}} * 100\%$$

$$\% \text{ extracción de oro} = \frac{8.125}{8.492} * 100\%$$

% extracción de oro = 95.68%.

**Tabla 8**

*Cinética de lixiviación de oro*

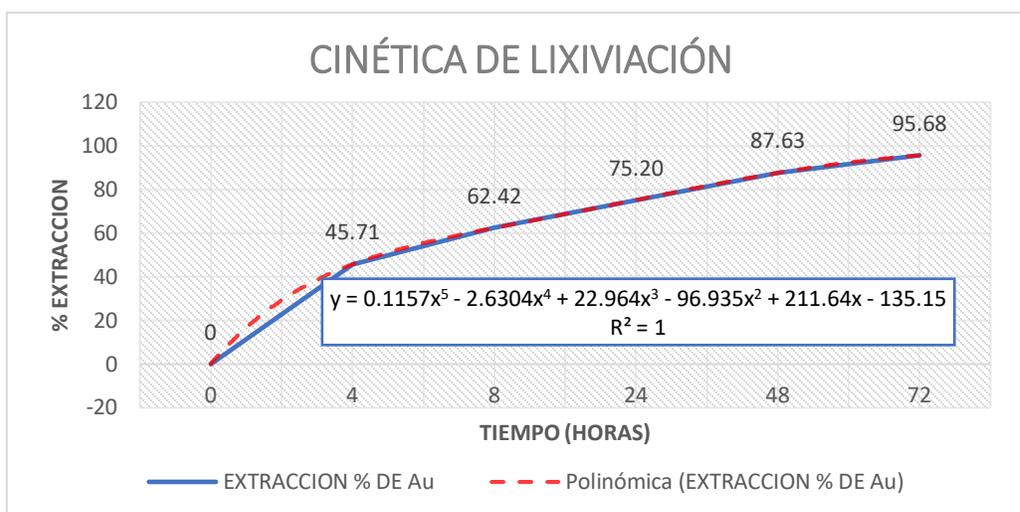
CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DEL ORO			
Nº Pruebas	Tiempo (horas)	Au g/m <sup>3</sup>	% Extracción
1	0	0	0
2	4	3.88	45.71
3	8	5.3	62.42
4	24	6.39	75.2
5	48	7.44	87.63
6	72	8.125	95.68

NOTA: Elaboración propia

La tabla 8, detalla la extracción de oro a diferentes tiempos.

**Figura 21**

*Cinética de lixiviación*



NOTA: Elaboración propia

La figura 21 indica que la disolución del oro es lenta durante las primeras horas y posteriormente se acelera. Según los resultados obtenidos en el proceso de lixiviación, se puede observar que la extracción del oro logra una recuperación del 95.68 % en 72 horas.

A continuación, se procede a identificar variables que más efecto tienen en el proceso de cianuración de oro mediante agitación.

**Tabla 9**

*Diseño experimental para el desarrollo de las pruebas*

N° PRUEBAS	% de solidos	Concentración NaCN	pH
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

NOTA: Elaboración propia

**Tabla 10***Variables para realizar las pruebas de cianuración por agitación con NaCN*

N° Pruebas	VARIABLES PARA LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN					
	% Solidos		Concentración de NaCN (g/l)		pH de pulpa	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
1	25		0.5		10	
2		35	0.5		10	
3	25			1.0	10	
4		35		1.0	10	
5	25		0.5			11
6		35	0.5			11
7	25			1.0		11
8		35		1.0		11

**Tabla 11***Variables para las pruebas centrales*

N° Pruebas	VARIABLES DE PRUEBAS CENTRALES		
	% Solidos	Concentración de NaCN (g/l)	pH de pulpa
9	30	0.75	10.5
10	30	0.75	10.5
11	30	0.75	10.5

NOTA: Elaboración propia

**5.8. Ensayo de cianuración para el desarrollo del diseño experimental.**

Las pruebas iniciales de cianuración ayudaron a identificar las variables clave del proceso. A partir de las condiciones establecidas en estas pruebas, se avanzó en el desarrollo de experimentos para el diseño experimental. Aunque el proceso de cianuración se ve influenciado por numerosas

variables, este estudio se centró en tres principales: el porcentaje de sólidos, la concentración de cianuro y el pH.

Se considera que estas tres variables son cruciales para la recuperación del metal valioso y tienen un impacto significativo. Para verificar su relevancia, se llevaron a cabo ocho pruebas experimentales con tres réplicas centrales. Además, se anticipa que habrá una interacción significativa entre estas variables, es decir, que los cambios en una variable afectarán a las demás, y estos efectos combinados influirán en la recuperación del mineral valioso.

### **Descripción del proceso de lixiviación por agitación con cianuro**

1. Se realizó el pesado de 414.25 g de mineral (80.50 % -200 malla)
2. Se agregó agua (966.58 ml para completar a 1120 ml) al reactor
3. Se le agregó mineral molido en un porcentaje de 30% de sólidos
4. Se procede a medir el pH de la pulpa inicial (7.5)
5. De acuerdo a la medida del pH, se adiciona cal (5.20 g) para alcanzar un pH de 10 y 11.
6. Se agrega la cantidad de NaCN (0.5 g) para mantener la concentración de cianuro (0.5%), manteniendo constante la concentración durante el tiempo de lixiviación.
7. Se realizó un monitoreo periódico de la concentración de cianuro y del pH en los intervalos de tiempo establecidos (1, 2, 4, 8, 24, 48 y 72 horas), ajustando la cantidad de cianuro y cal necesarios para mantener la concentración inicial constante.
8. Para los controles periódicos, se tomaron muestras (volumen de solución) de 10 cm<sup>3</sup> para los cálculos de concentración y consumo de NaCN y cal
9. Las muestras se titulan utilizando una solución genérica de nitrato de plata (Ag NO<sub>3</sub>) con yoduro de potasio (KI) como indicador.

(Ver APENDICE 07)

### **Cantidades de cianuro para cada prueba**

- Peso de cianuro para una concentración de 0.5 g/l = 0.50 g
- Peso de cianuro para una concentración de 1.00 g/l = 1.00 g
- Peso de cianuro para una concentración de 0.75 g/l = 0.75 g

### **Cantidad total de cal para un pH=11**

- pH del mineral = 7.5
- peso de cal para alcanzar un pH 11 = 5.20 g

### **Primer tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 01

#### **PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION**

- Peso del mineral : 332.31 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.5
- % Sólidos : 25
- % Líquidos : 75
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 996.92
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,186.81
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 12***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 01*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	332.31	25	123.08
Agua	996.92	75	996.92
Pulpa	1,329.23	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

En la tabla 12, se muestra las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 13***Control del proceso-prueba 01*

PRUEBA N° 01						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10	5.20	5.20	0.5	0.50	0.50
1	10	0.22	5.42	0.5	0.35	0.85
2	10	0.29	5.71	0.5	0.33	1.18
4	10	0.23	5.94	0.5	0.35	1.53
8	10	0.29	6.23	0.5	0.30	1.83
24	10	0.37	6.60	0.5	0.30	2.13
48	10	0.43	7.03	0.5	0.30	2.43
72	10	--		0.5	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 13 indica que, para la Prueba N° 01, se requiere un total acumulado de 7.03 gramos de cal para mantener el pH constante en 10 durante el proceso de lixiviación. Además, se añade una cantidad de 2.43 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se

mantenga en un 0.5% durante todo el proceso de lixiviación, que tiene una duración de 72 horas.

**Tabla 14**

*Resultados del proceso-prueba 01 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 01						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	332.31		20.5		6.812	100
PLS		996.92		5.70	5.682	83.41
RELAVE	332.31		3.41		1.133	16.59

Nota: Elaboración propia

### **Segundo tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 02

#### PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 502.80 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.5
- % Sólidos : 35
- % Líquidos : 65
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 933.78
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,282.66
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 15***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 02*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	502.8	35	186.22
Agua	933.78	65	933.78
Pulpa	1,436.58	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 15, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 16***Control del proceso-prueba 02*

Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10	5.20	5.20	0.5	0.50	0.50
1	10	0.35	5.55	0.5	0.33	0.83
2	10	0.29	5.84	0.5	0.35	1.18
4	10	0.3	6.14	0.5	0.35	1.53
8	10	0.29	6.43	0.5	0.32	1.85
24	10	0.36	6.79	0.5	0.30	2.15
48	10	0.31	7.10	0.5	0.30	2.45
72	10	--		0.5	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 16 revela que, para la Prueba N° 02, se requiere un total acumulado de 7.10 gramos de cal para mantener el pH constante en 10 a lo largo del proceso de lixiviación. Además, se añade 2.45 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se mantenga en un 0.5% durante todo el proceso de lixiviación de 72 horas.

**Tabla 17***Resultados del proceso-prueba 02 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 02						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	502.8		20.5		10.307	100
PLS		933.78		9.59	8.955	86.88
RELAVE	502.8		2.69		1.353	13.12

Nota: Elaboración propia

**Tercer tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 03

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 332.31 g
- Concentrado de cianuro (%) : 1.0
- % Sólidos : 25
- % Líquidos : 75
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 996.92
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,186.81
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 18***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 03*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	332.31	25	123.08
Agua	996.92	75	996.92
Pulpa	1,329.23	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 18, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 19***Control del proceso-prueba 03*

PRUEBA N° 03						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10	5.20	5.20	1.0	1.0	1.0
1	10	0.29	5.49	1.0	0.48	1.48
2	10	0.29	5.78	1.0	0.55	2.03
4	10	0.29	6.07	1.0	0.46	2.49
8	10	0.33	6.40	1.0	0.54	3.03
24	10	0.33	6.73	1.0	0.49	3.52
48	10	0.34	7.07	1.0	0.49	4.01
72	10	--		1.0	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 19 muestra que, para la Prueba N° 03, se necesita un total acumulado de 7.07 gramos de cal para preservar el pH en 10 durante el proceso de lixiviación. Además, se adicionan 4.01 gramos de cianuro para garantizar que la concentración del reactivo se mantenga en 1.00% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 20***Resultados del proceso-prueba 03 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 03						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	332.31		20.5		6.812	100
PLS		996.92		6.02	6.001	88.09
RELAVE	332.31		2.45		0.814	11.91

Nota: Elaboración propia

**Cuarto tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 4

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 502.80 g
- Concentrado de cianuro (%) : 1.0
- % Sólidos : 35
- % Líquidos : 65
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 933.78
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,282.66
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 21***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 04*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	502.8	35	186.22
Agua	933.78	65	933.78
Pulpa	1,436.58	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 21, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 22***Control del proceso--prueba 04*

PRUEBA N° 04						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10	5.20	5.20	1.0	1.0	1.0
1	10	0.27	5.47	1.0	0.50	1.50
2	10	0.35	5.82	1.0	0.55	2.05
4	10	0.29	6.11	1.0	0.58	2.63
8	10	0.29	6.40	1.0	0.54	3.17
24	10	0.36	6.76	1.0	0.49	3.66
48	10	0.36	7.12	1.0	0.49	4.15
72	10	--		1.0	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 22 indica que, en la Prueba N° 04, se requiere un total acumulado de 7.12 gramos de cal para mantener el pH constante en 10 durante el proceso de lixiviación. Asimismo, se adicionan 4.15 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se mantenga en 1.00% a

lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 23**

*Resultados del proceso-prueba 04 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 04						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	502.8		20.5		10.307	100
PLS		933.78		10.17	9.497	92.14
RELAVE	502.8		1.62		0.815	7.86

Nota: Elaboración propia

### Quinto tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación

PRUEBA N° 05

#### PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 332.31 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.5
- % Sólidos : 25
- % Líquidos : 75
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 996.92
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,186.81
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 11
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 24***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 05*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	332.31	25	123.08
Agua	996.92	75	996.92
Pulpa	1,329.23	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 24, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 25***Control del proceso-prueba 05*

PRUEBA N° 05						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	11	5.20	5.20	0.5	0.50	0.50
1	11	0.43	5.63	0.5	0.35	0.85
2	11	0.42	6.05	0.5	0.33	1.18
4	11	0.41	6.46	0.5	0.38	1.56
8	11	0.4	6.86	0.5	0.35	1.91
24	11	0.42	7.28	0.5	0.30	2.21
48	11	0.42	7.70	0.5	0.30	2.51
72	11	--		0.5	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 25 muestra que, para la Prueba N° 05, se requiere un total acumulado de 7.70 gramos de cal para preservar el pH constante en 11 durante el proceso de lixiviación. Además, se añade 2.51 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se mantenga en un 0.5% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 26***Resultados del proceso-prueba 05 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 05						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	332.31		20.5		6.812	100
PLS		996.92		6.10	6.081	89.27
RELAVE	332.31		2.22		0.738	10.73

Nota: Elaboración propia

**Sexto tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

## PRUEBA N° 06

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 502.80 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.5
- % Sólidos : 35
- % Líquidos : 65
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 933.78
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,282.66
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 11
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 27***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 06*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	502.8	35	186.22
Agua	933.78	65	933.78
Pulpa	1,436.58	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 27, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 28***Control del proceso-prueba 06*

PRUEBA N° 06						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	11	5.20	5.20	0.5	0.50	0.5
1	11	0.42	5.62	0.5	0.35	0.85
2	11	0.42	6.04	0.5	0.33	1.18
4	11	0.43	6.47	0.5	0.35	1.53
8	11	0.40	6.87	0.5	0.35	1.88
24	11	0.45	7.32	0.5	0.32	2.20
48	11	0.43	7.75	0.5	0.32	2.52
72	11	--		0.5	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 28 indica que, para la Prueba N° 06, se requiere un total acumulado de 7.75 gramos de cal para preservar el pH en 11 durante el proceso de lixiviación. Además, se añaden 2.52 gramos de cianuro para garantizar que la concentración del reactivo se mantenga en un 0.5% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 29***Resultados del proceso-prueba 06 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 06						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	502.8		20.5		10.307	100
PLS		933.78		10.09	9.422	91.41
RELAVE	502.8		1.77		0.89	8.59

Nota: Elaboración propia

**Séptimo tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 07

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 332.31 g
- Concentrado de cianuro (%) : 1.0
- % Sólidos : 25
- % Líquidos : 75
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 996.92
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,186.81
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 11
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 30***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 07*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	332.31	25	123.08
Agua	996.92	75	996.92
Pulpa	1,329.23	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 30, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 31***Control del proceso-prueba 07*

PRUEBA N° 07						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	11	5.20	5.20	1.0	1.0	1.0
1	11	0.43	5.63	1.0	0.55	1.55
2	11	0.41	6.04	1.0	0.55	2.10
4	11	0.43	6.47	1.0	0.53	2.63
8	11	0.40	6.87	1.0	0.54	3.17
24	11	0.40	7.27	1.0	0.50	3.67
48	11	0.45	7.72	1.0	0.50	4.17
72	11	--		1.0	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 31 revela que, para la Prueba N° 07, se requiere un acumulado de 7.72 gramos de cal para preservar el pH en 11 durante el proceso de lixiviación. Además, se incorporan 4.17 gramos de cianuro para mantener la concentración del reactivo constante en 1.0% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 32***Resultados del proceso-prueba 07 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 07						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	332.31		20.5		6.812	100
PLS		996.92		6.33	6.311	92.65
RELAVE	332.31		1.50		0.498	7.35

Nota: Elaboración propia

**Octavo tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

## PRUEBA N° 08

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 502.80 g
- Concentrado de cianuro (%) : 1.0
- % Solidos : 35
- % Líquidos : 65
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 933.78
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,282.66
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 11
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 33***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 08*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	502.8	35	186.22
Agua	933.78	65	933.78
Pulpa	1,436.58	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 33, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 34***Control del proceso-prueba 08*

PRUEBA N° 08						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	11	5.20	5.20	1.0	1.0	1.0
1	11	0.45	5.65	1.0	0.55	1.55
2	11	0.41	6.06	1.0	0.53	2.08
4	11	0.41	6.47	1.0	0.58	2.66
8	11	0.40	6.87	1.0	0.54	3.20
24	11	0.43	7.30	1.0	0.5	3.70
48	11	0.48	7.78	1.0	0.5	4.20
72	11	--		1.0	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 34 muestra que, para la Prueba N° 08, se requiere un total acumulado de 7.78 gramos de cal para preservar el pH en 11 durante el proceso de lixiviación. Además, se añade 4.20 gramos de cianuro para garantizar que la concentración del reactivo se mantenga constante en 1.0% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 35***Resultados del proceso-prueba 08 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 08						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	502.8		20.5		10.307	100
PLS		933.78		10.39	9.702	94.13
RELAVE	502.8		1.21		0.608	5.87

Nota: Elaboración propia

**Replica noveno tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 09

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 414.25 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.75
- % Sólidos : 30
- % Líquidos : 70
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 966.58
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,232.88
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10.5
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 36***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 09*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	414.25	30	153.42
Agua	966.58	70	966.58
Pulpa	1380.82	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 36, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 37***Control del proceso-prueba 09*

PRUEBA N° 09						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10.5	5.20	5.20	0.75	0.75	0.75
1	10.5	0.40	5.60	0.75	0.40	1.15
2	10.5	0.34	5.94	0.75	0.42	1.57
4	10.5	0.35	6.29	0.75	0.43	2.0
8	10.5	0.34	6.63	0.75	0.40	2.4
24	10.5	0.38	7.01	0.75	0.40	2.8
48	10.5	0.44	7.45	0.75	0.40	3.2
72	10.5	--		0.75	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 37 indica que, para la Prueba N° 09, se requiere un total acumulado de 7.45 gramos de cal para preservar el pH en 10.5 durante el proceso de lixiviación. Además, se añaden 3.20 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se mantenga constante en 0.75% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 38***Resultados del proceso-prueba 09 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 09						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	414.25		20.5		8.492	100
PLS		966.58		8.28	8.003	94.24
RELAVE	414.25		1.19		0.493	5.76

Nota: Elaboración propia

**Replica decimo tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 10

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 414.25 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.75
- % Solidos : 30
- % Líquidos : 70
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 966.58
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,232.88
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10.5
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 39***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 10*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	414.25	30	153.42
Agua	966.58	70	966.58
Pulpa	1380.82	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 39, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 40***Control del proceso-prueba 10*

PRUEBA N° 10						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10.5	5.20	5.20	0.75	0.75	0.75
1	10.5	0.41	5.61	0.75	0.41	1.16
2	10.5	0.34	5.95	0.75	0.41	1.57
4	10.5	0.35	6.30	0.75	0.42	1.99
8	10.5	0.34	6.64	0.75	0.40	2.39
24	10.5	0.38	7.02	0.75	0.40	2.79
48	10.5	0.44	7.46	0.75	0.40	3.19
72	10.5	--		0.75	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 40 muestra que, para la Prueba N° 10, se requiere un total acumulado de 7.46 gramos de cal para preservar el pH constante en 10.5 durante el proceso de lixiviación. Además, se añade 3.19 gramos de cianuro para asegurar que la concentración del reactivo se mantenga en 0.75% a lo largo de las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 41***Resultados del proceso-prueba 10 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 10						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	414.25		20.5		8.492	100
PLS		966.58		8.39	8.11	95.50
RELAVE	414.25		0.93		0.385	4.50

Nota: Elaboración propia

**Replica onceavo tratamiento del proceso de lixiviación mediante agitación**

PRUEBA N° 11

## PARAMETROS PARA LA EVALUACION DE LA LIXIVIACIÓN POR AGITACION

- Peso del mineral : 414.25 g
- Concentrado de cianuro (%) : 0.75
- % Sólidos : 30
- % Líquidos : 70
- Volumen de líquido (cm<sup>3</sup>) : 966.58
- Volumen de pulpa (cm<sup>3</sup>) : 1120
- Densidad de pulpa (g/l) : 1,232.88
- Alcalinidad de la pulpa (pH) : 10.5
- Tiempo de lixiviación (hr) : 72
- Granulometría : -200 malla al 80.50 % Pasante

**Tabla 42***Cálculo para alimentación al agitador-prueba 11*

ALIMENTACION AL AGITADOR			
Para 1120 ml de pulpa en reactor (botella)			
Producto	Peso (g)	Porcentaje (%)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
Mineral	414.25	30	153.42
Agua	966.58	70	966.58
Pulpa	1380.82	100	1,120.00

Nota: Elaboración propia

Se indica las cantidades de mineral y agua que se agrega al reactor en la tabla 42, para formando una pulpa de 1120 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 43***Control del proceso-prueba 11*

PRUEBA N° 11						
Tiempo (Horas)	pH	Reposición de Cal (g)	Peso Acu. Cal (g)	Cianuro de Sodio (%)	Reposición de Cianuro (g)	Peso Acu. Cianuro (g)
0	10.5	5.20	5.20	0.75	0.75	0.75
1	10.5	0.40	5.60	0.75	0.42	1.17
2	10.5	0.34	5.94	0.75	0.41	1.58
4	10.5	0.35	6.29	0.75	0.41	1.99
8	10.5	0.34	6.63	0.75	0.41	2.40
24	10.5	0.38	7.01	0.75	0.40	2.80
48	10.5	0.44	7.45	0.75	0.40	3.20
72	10.5	--		0.75	-	

Nota: Elaboración propia

La Tabla 43 indica que, para la Prueba N° 11, se requiere un total acumulado de 7.45 gramos de cal para preservar el pH en 10.5 durante el proceso de lixiviación. Además, se deben añadir 3.20 gramos de cianuro para garantizar que la concentración del reactivo se mantenga constante en 0.75% durante las 72 horas del proceso de lixiviación.

**Tabla 44***Resultados del proceso-prueba 11 (contenido metálico en anexo 02)*

RESULTADOS DEL PROCESO -Prueba N° 11						
Producto	Peso (g)	Volumen (ml)	Ley		Cont. Metálico (mg)	Extracción (%)
			g/TM	mg/l		
CABEZA	414.25		20.5		8.492	100
PLS		966.58		8.32	8.042	94.70
RELAVE	414.25		1.09		0.452	5.30

Nota: Elaboración propia

Según Anexo N° 02, se tiene el análisis químico de la muestra del relave de la minera artesanal San Lucas, lo cual indica una ley de 0.383 oz/TC de oro, siendo una ley bastante alta que se pierde al usar mercurio.

A nivel de laboratorio, se realizan pruebas de recuperación de oro con el uso de mercurio, con la cantidad de mineral molino utilizado en cada prueba, esto con la finalidad de comparar las recuperaciones y/o extracciones que se tiene con el uso de cianuro. A continuación, se presenta la tabla 45, con un comparativo de extracción de oro por el método de lixiviación por agitación con cianuro y el método tradicional de recuperación de oro con mercurio. En donde se observa la notoria diferencia en la recuperación de oro con cianuro y mercurio en cada prueba.

**Tabla 45***Cuadro comparativo de extracción de oro con cianuro y mercurio*

PRUEBA N°	PESO (g)	EXTRACCION CON CIANURO				RECUPERACION CON MERCURIO			
		MUESTRA	Ley (mg/L) y (g/TM)	CONTENIDO METALICO	EXTRACCION (%)	MUESTRA	Ley (g/TM)	CONTENIDO METALICO	RECUPERACION (%)
1	332.31	PLS	5.70	5.682	<b>83.41</b>	Au			<b>41.21</b>
		RELAVE	3.41	1.133	16.59	RELAVE	12.07	4.009	58.79
2	502.80	PLS	9.59	8.955	<b>86.88</b>	Au			<b>48.30</b>
		RELAVE	2.69	1.353	13.12	RELAVE	10.60	5.332	51.70
3	332.31	PLS	6.02	6.001	<b>88.09</b>	Au			<b>41.79</b>
		RELAVE	2.45	0.814	11.91	RELAVE	11.93	3.965	58.21
4	502.80	PLS	10.17	9.497	<b>92.14</b>	Au			<b>47.80</b>
		RELAVE	1.62	0.815	7.86	RELAVE	10.71	5.383	52.20
5	332.31	PLS	6.10	6.081	<b>89.27</b>	Au			<b>41.50</b>
		RELAVE	2.22	0.738	10.73	RELAVE	12.00	3.986	58.50
6	502.80	PLS	10.09	9.422	<b>91.41</b>	Au			<b>48.20</b>
		RELAVE	1.77	0.89	8.59	RELAVE	10.62	5.341	51.80
7	332.31	PLS	6.33	6.311	<b>92.65</b>	Au			<b>42.10</b>
		RELAVE	1.50	0.498	7.35	RELAVE	11.86	3.941	57.90
8	502.80	PLS	10.39	9.702	<b>94.13</b>	Au			<b>47.70</b>
		RELAVE	1.21	0.608	5.87	RELAVE	10.73	5.394	52.30
9	414.25	PLS	8.28	8.003	<b>94.24</b>	Au			<b>45.50</b>
		RELAVE	1.19	0.493	5.76	RELAVE	11.18	4.632	54.50
10	414.25	PLS	8.39	8.11	<b>95.50</b>	Au			<b>44.90</b>
		RELAVE	0.93	0.385	4.5	RELAVE	11.31	4.683	55.10
11	414.25	PLS	8.32	8.042	<b>94.70</b>	Au			<b>45.20</b>
		RELAVE	1.09	0.452	5.3	RELAVE	11.25	4.659	54.80

Nota: Elaboración propia

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **6.1. introducción.**

Este capítulo explora la técnica del diseño factorial de los experimentos, lo cual resulta ser un método estadístico de uso extendido entre los investigadores. Es particularmente útil cuando se desconoce el comportamiento del sistema en estudio y no se dispone de un modelo teórico que permita hacer predicciones. En estos casos, el diseño factorial facilita la creación de un modelo matemático empírico. Al comenzar un proceso de optimización sin un conocimiento profundo del sistema, a menudo se enfrentan muchas variables potenciales. En esta etapa inicial, el objetivo es identificar las variables más influyentes, y los diseños factoriales son ideales para esta tarea.

#### **6.2. Diseño experimental en la investigación**

El diseño experimental constituye una herramienta esencial en los procesos industriales. Permite la utilización de métodos y técnicas estadísticas para recolectar, tabular, analizar e interpretar datos, lo que reduce al mínimo el riesgo de llegar a conclusiones incorrectas y resulta en el desarrollo de procesos muy eficientes (Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995).

##### **6.2.1. El diseño experimental y sus ventajas**

Presenta las siguientes ventajas más importantes:

- Ofrece la mayor cantidad de información útil sobre el experimento, permitiendo identificar las variables que más influyen en el proceso en un tiempo reducido y con alta eficiencia.
- Facilita la estructuración y la elección correcta de los datos, lo que simplifica el análisis de la información recopilada.

- Analiza y sintetiza de manera efectiva los resultados experimentales, aumentando la fiabilidad de las conclusiones.
- Puede identificar las interacciones entre las variables implicadas, permitiendo realizar predicciones sobre los resultados en áreas no abordadas por el experimento.

(Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995)

### 6.3. Diseño experimental con dos o más factores.

#### 6.3.1. Diseño factorial $2^k$ .

Ayala Mina y Pardo Mercado (1995) definen el diseño factorial como un método en el cual se analizan todas las combinaciones posibles de los niveles de cada factor en cada experimento o réplica completa. En este enfoque, los "niveles" hacen referencia a los valores distintos que pueden asumir los variables o factores. Cuando se emplean solo dos niveles, se denomina diseño factorial de dos niveles, y, en general, se usa la notación factorial  $2^k$  cuando se incorporan más niveles. De esta manera, el número total de experimentos necesarios se calcula mediante la fórmula:

$$N = 2^k$$

Donde:

K representa el número de variables;

N representa el número total de experimentos.

Para una comprensión mejor de este diseño, se definen los conceptos más importantes

- **Niveles de un factor:** Son los diversos valores que se le asigna a un factor en un experimento, indicando el nivel o la intensidad de dicho factor.
- **Combinación de tratamiento:** Es el conjunto de factores empleados en un experimento específico, o cualquier combinación particular de los niveles de los factores.

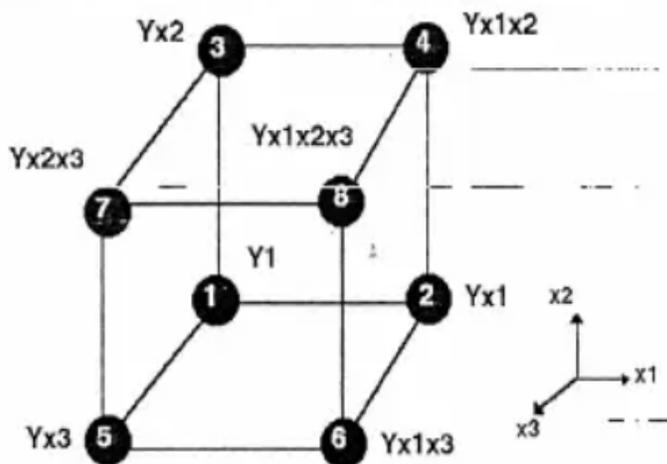
- **Respuesta:** Se refiere al resultado cuantitativo del experimento, actuando como la variable dependiente.
- **Efecto de un factor:** Es el cambio en la respuesta que ocurre cuando se modifica el nivel de un factor. En un diseño de dos niveles, el efecto se determina restando el promedio de las respuestas en el nivel bajo del promedio de las respuestas en el nivel alto.
- **Interacción:** viene a ser la variación en la respuesta de un factor al combinarse con distintos niveles de un segundo factor aplicado al mismo tiempo, mostrando el efecto adicional generado por la influencia conjunta de dos o más factores.
- **Unidad experimental:** La unidad fundamental a la que se le asigna un tratamiento o una combinación de tratamientos.
- **Error experimental:** Es la discrepancia en las respuestas o mediciones entre dos unidades experimentales similares que han sido sometidas al mismo tratamiento y combinación de tratamientos; esta variación se conoce como error experimental.

El diseño factorial  $2^k$  puede interpretarse gráficamente, con cada combinación experimental representada por un punto en un espacio de varias dimensiones, donde las coordenadas de cada punto están dadas por los valores +1 y -1. La estructura matemática de esta representación sigue un modelo lineal de la siguiente forma:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + E \quad (4.1)$$

**Figura 22**

*Visualización tridimensional de un diseño factorial  $2^3$*



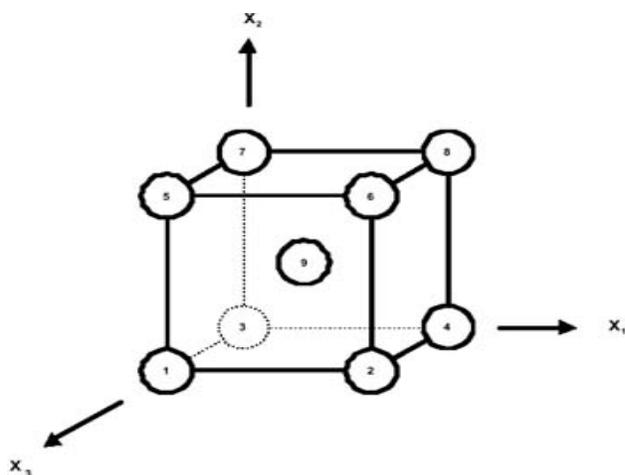
Nota: (Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995).Pg. 62

#### 6.4. Diseño factorial $2^k$ con replica en el punto central del esquema.

Ayala Mina y Pardo Mercado (1995) explican que el diseño factorial  $2^k$  presupone una relación lineal entre las variables y la respuesta, representada por un modelo matemático lineal. Si esta linealidad es correcta, el modelo debería ser capaz de predecir con precisión todos los puntos del diseño, incluyendo el punto central. No obstante, no se requiere una linealidad exacta, ya que el diseño  $2^k$  funcionará adecuadamente incluso si esta suposición se cumple solo de manera aproximada. Sin embargo, si el modelo no predice correctamente, especialmente en el punto central, puede inferirse que el modelo lineal no es suficiente para describir las respuestas en esa región experimental, lo cual sugiere la posible presencia de curvatura. Para esto, añadir una prueba en el punto central permite obtener una estimación promedio del efecto de curvatura.

**Figura 23**

*Vista tridimensional de un diseño factorial  $2^3$  con replica en el punto central.*



Nota: (Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995). Pg. 62

#### 6.4.1. Selección de variables.

Aunque el proceso de cianuración involucra múltiples variables, para los fines de este estudio se han seleccionado tres variables específicas para la evaluación experimental: el porcentaje de sólidos, la dosificación de cianuro, y el pH. Esta elección no limita la posibilidad de considerar otras variables que puedan ser relevantes; en consecuencia, las demás variables del proceso se permanecerán en forma constante a lo largo del experimento. Las variables seleccionadas, junto con sus niveles y réplicas en el punto central, se detallan en las Tablas 46 y 47.

**Tabla 46**

*Niveles de las variables*

VARIABLES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
$Z_1$ : % de sólidos (%)	25	35
$Z_2$ : Dosificación % de Cianuro	0.5	1
$Z_3$ : pH	10	11

Nota: Elaboración propia

**Tabla 47***Replicas centrales (y°)*

% de sólido (%)	Dosificación de cianuro (%)	pH
30	0.75	10.5

Nota: Elaboración propia

Se procede a planificar el diseño experimental, lo cual incluye pruebas en los puntos extremos y tres réplicas en el punto central. Este diseño define los valores de las variables tanto en su escala natural ( $Z_j$ ) como en su escala codificada ( $X_j$ ), considerando el porcentaje de extracción de oro ( $Y$ ) como la principal variable de interés (ver Tabla 48).

**Tabla 48***Variables en escala natural y codificada con réplicas en el centro*

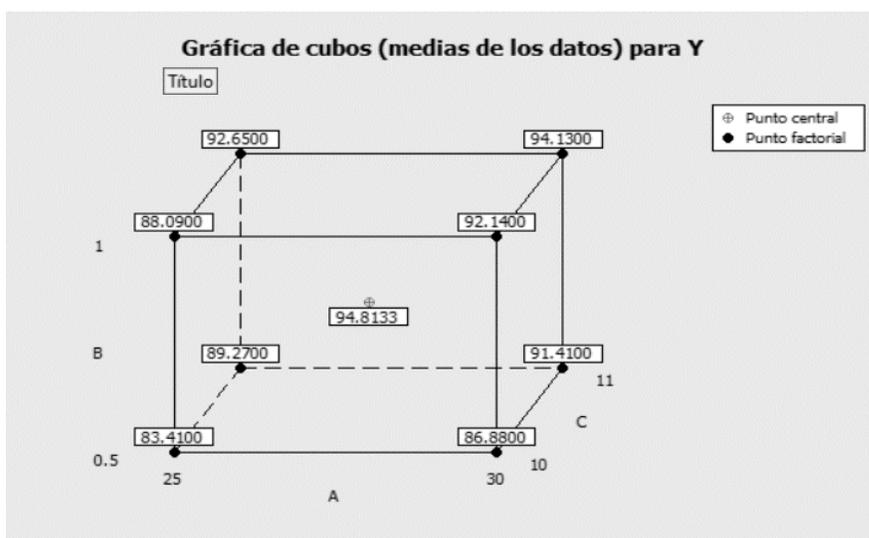
PRUEBA (N)	Z1	Z2	Z3	X1	X2	X3	RESPUESTA (Y)
1	25	0.5	10	-1	-1	-1	<b>83.41</b>
2	35	0.5	10	1	-1	-1	<b>86.88</b>
3	25	1	10	-1	1	-1	<b>88.09</b>
4	35	1	10	1	1	-1	<b>92.14</b>
5	25	0.5	11	-1	-1	1	<b>89.27</b>
6	35	0.5	11	1	-1	1	<b>91.41</b>
7	25	1	11	-1	1	1	<b>92.65</b>
8	35	1	11	1	1	1	<b>94.13</b>
9	30	0.75	10.5	0	0	0	<b>94.24</b>
9	30	0.75	10.5	0	0	0	<b>95.5</b>
9	30	0.75	10.5	0	0	0	<b>94.7</b>

Nota: Elaboración propia

A continuación, se muestra la representación espacial, que toma la forma de un cubo regular con vértices que corresponden a las ocho pruebas. Este cubo ilustra siete efectos: tres efectos principales (A, B y C), tres interacciones dobles (AB, AC y BC), y una interacción triple (ABC). Tales efectos están graficados tomando los datos de la Tabla N° 48.

**Figura 24**

*Representación espacial según datos de las pruebas.*



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

#### 6.4.2. Cálculo de efectos.

Según Ayala Mina y Pardo Mercado (1995), para medir cuantitativamente el impacto del criterio de optimización de un proceso o las variables en la respuesta, se determinan los efectos. Estos efectos se determinan restando el promedio de las respuestas en el nivel bajo del promedio de las respuestas en el nivel alto. La fórmula para calcular dicho efecto es la siguiente:

$$E x_j = \frac{(\sum Y_+) - (\sum Y_-)}{\left(\frac{N}{2}\right) * r} \quad (4.2)$$

Donde:

$\sum Y_+$  = Suma de las respuestas correspondiente al nivel alto de las variables.

$\sum Y.$  = Suma de las respuestas correspondiente al nivel bajo de las variables.

$N$  = Cantidad de pruebas experimentales.

$r$  = Cantidad de réplicas en el diseño.

Otra forma conveniente de calcular los efectos es mediante el uso de matrices, lo cual resulta práctico, especialmente al trabajar en computadoras utilizando una hoja de cálculo, y se expresa de la siguiente manera:

$$E x_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_j}{\left(\frac{N}{2}\right) * r} = \frac{[X^T] * [Y]}{\left(\frac{N}{2}\right) * r} \quad (4.3)$$

Donde:

$[X^T]$  = Representa la matriz transpuesta.

$[Y]$  = Representa a la matriz de las variables respuesta.

(Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995)(p. 66,67)

En la Tabla 49. Se muestra la matriz del diseño factorial, que contiene una única prueba en cada punto extremo del diseño.

**Tabla 49**

*Matriz de diseño factorial y respuestas experimentales*

PRUEBA (N)	Z1	Z2	Z3	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	RESPUESTA (Y)
1	25	0.5	10	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	83.41
2	35	0.5	10	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	86.88
3	25	1	10	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	88.09
4	35	1	10	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	92.14
5	25	0.5	11	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	89.27
6	35	0.5	11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	91.41
7	25	1	11	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	92.65
8	35	1	11	1	1	1	1	1	1	1	1	94.13

Nota: Elaboración propia

Promedio general (sin incluir puntos centrales)  $Y = 89,7475$

El efecto se calcula utilizando matrices (véase tabla 50).

$$\begin{array}{c}
 [X] \\
 \left| \begin{array}{cccccccc}
 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\
 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\
 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\
 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\
 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\
 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1
 \end{array} \right|
 \end{array}$$
  

$$\begin{array}{ccc}
 [X^T] & [Y] & [X^T][Y] \\
 \left| \begin{array}{cccccccc}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
 -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\
 -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\
 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\
 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\
 -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1
 \end{array} \right|
 \quad x \quad
 \left| \begin{array}{c}
 83.41 \\
 86.88 \\
 88.09 \\
 92.14 \\
 89.27 \\
 91.41 \\
 92.65 \\
 94.13
 \end{array} \right|
 =
 \left| \begin{array}{c}
 717.98 \\
 11.14 \\
 16.04 \\
 16.94 \\
 -0.08 \\
 -3.90 \\
 -3.84 \\
 -1.24
 \end{array} \right|
 \end{array}$$

**Tabla 50***Cálculo de efectos*

	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
[X <sup>T</sup> ][Y]	717.98	11.14	16.04	16.94	-0.08	-3.9	-3.84	-1.24
EFFECTOS		2.785	4.01	4.235	-0.02	-0.975	-0.96	-0.31

Nota: Elaboración propia

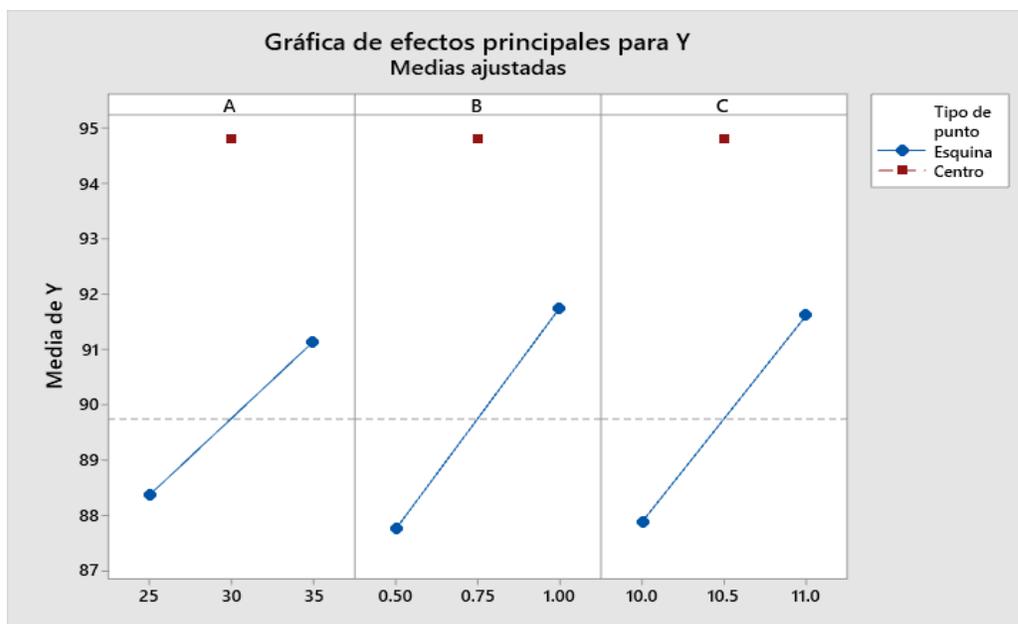
Al calcular los efectos, se observa la variación de la respuesta al modificar una variable de su nivel bajo a su nivel alto. A partir de los efectos calculados, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Un aumento en la dosificación de cianuro (% de NaCN, X<sub>2</sub>) de 0,5% a 1,0% resulta en un incremento de 4,010 en la extracción de oro (Au).
- Un aumento en el pH de 10 a 11 provoca un incremento de 4,235 en la extracción de oro (Au).
- El impacto del porcentaje de sólidos y las interacciones asociadas es limitado, lo que las hace no significativas en el proceso.

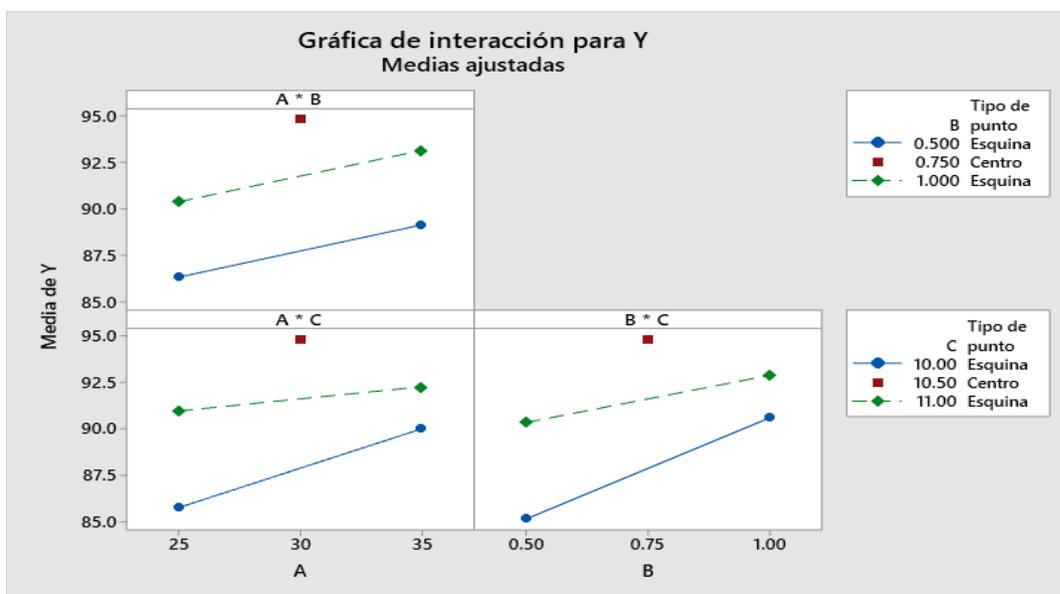
Como se observa en la Figura 25, el efecto del porcentaje de sólidos es bajo en comparación con el efecto de la concentración de cianuro y el pH del proceso.

Así mismo en la figura 26, se observa que el efecto de las interacciones: X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> y X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>, no tienen ninguna línea de intersección, por ende, no son muy significativos en el proceso.

La figura 27, diagrama de Pareto, muestra claramente que B (concentración de NaCN) y C (Ph), son los más significativos y con mayor relevancia en el proceso. Por ende, se estudian estas dos variables específicamente.

**Figura 25***Efecto de variables individuales*

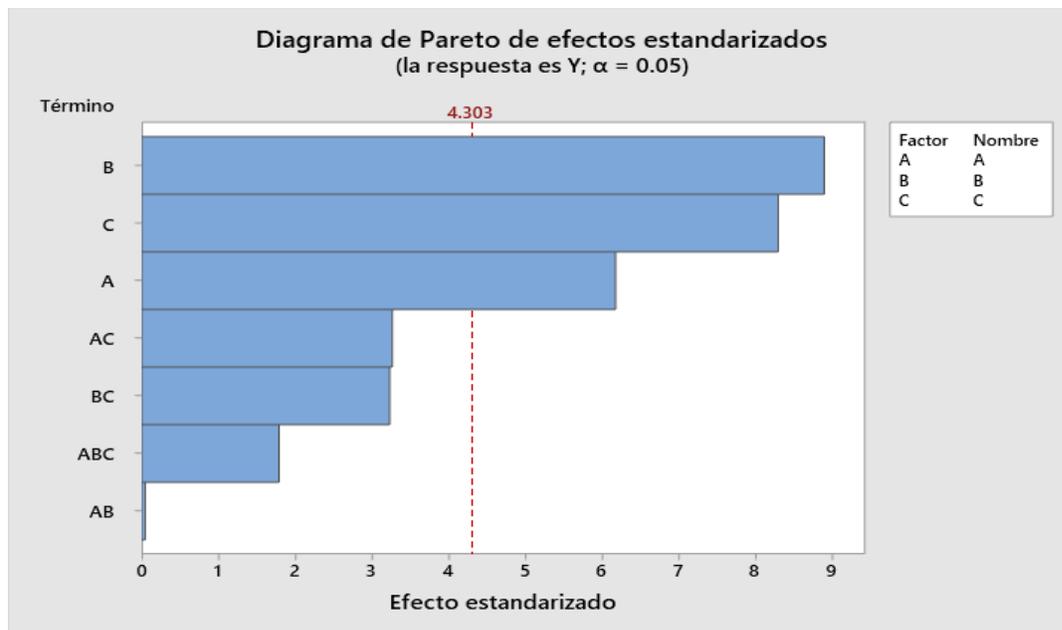
Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

**Figura 26***Efecto de interacción de variables*

Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

**Figura 27**

Diagrama de Pareto



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

**6.4.3. Análisis de varianza.**

Ayala Mina y Pardo Mercado (1995) explican que el análisis de varianza (ANOVA) es el método apropiado para evaluar la significancia de los efectos y se considera una herramienta fundamental en la inferencia estadística. En esta sección, no se profundizará en un análisis detallado del ANOVA, sino que se presentará un resumen de los conceptos clave para facilitar su uso en el análisis de datos de diseños experimentales.

Se tiene la siguiente ecuación, para el cálculo de la variabilidad total de los datos:

$$SS_{Total} = SS_{Efectos} + SS_{Error} \quad (5.1)$$

Donde:

$SS_{Total}$  = Representa la suma total de cuadrados.

$SS_{Efectos}$  = Suma de cuadrados atribuible a los tratamientos o efectos.

$SS_{Error}$  = Suma de cuadrados atribuible al error.

(p.67)

La suma de cuadrados para los efectos y las interacciones se calculan mediante:

$$SS_{Efecto} = \frac{(\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_j)^2}{Nr} = \frac{\{[X^T] * [Y]\}^2}{Nr} \quad (5.2)$$

La suma de cuadrados asociados al error se obtiene mediante:

$$SS_{Error} = \sum_{i=1}^{n^0} (Y_i^o - \bar{Y}^o)^2 \quad (5.3)$$

Donde:

$Y_i^o$  = Representa las réplicas en el punto central del diseño.

$n^0$  = Número de réplicas en el centro.

$\bar{Y}^o = \frac{\sum_{j=1}^{n^0} Y_j^o}{n^0}$  = Promedio de todas las réplicas.

La suma de cuadrados con respecto a la curvatura se determina de la siguiente manera:

$$SS_{curvatura} = \frac{Nn^0 (\bar{Y} - \bar{Y}^o)^2}{N + n^0} \quad (5.4)$$

Donde:

$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j}{N}$  = Promedio de los puntos exteriores del diseño.

A partir del cálculo de los efectos, se constató que las variables  $X_2$  y  $X_3$  (dosificación de cianuro y pH) tienen un impacto significativo en el proceso. La evaluación precisa y estadísticamente válida de la importancia de estas variables se puede realizar utilizando el teorema de Cochran, que se presenta en la ecuación siguiente:

$$F_0 = \frac{MS_{Efectos}}{MS_{Error}} \quad (5.5)$$

$$MS_{Efectos} = \frac{SS_{Efectos}}{f_1} \quad (5.6)$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{f_2} \quad (5.7)$$

Donde:

$f_1$  = Representa el grado de libertad de los efectos e interacciones, que en los diseños factoriales de dos niveles, suele ser iguales a uno

$f_2 = (n^0-1)$  = Representa los grados de libertad de la suma de cuadrados del error, que en este caso igual a dos ( $f_2 = 3-1=2$ ).

(Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995)(p. 68,69,70)

Los resultados obtenidos a partir del cálculo de las ecuaciones anteriores se presentan en la Tabla 51.

**Tabla 51**

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	141.452	17.6815	43.49	0.023
Lineal	3	83.5431	27.8477	68.5	0.014
A	1	15.5125	15.5125	38.16	0.025
B	1	32.1602	32.1602	79.11	0.012
C	1	35.8705	35.8705	88.23	0.011
Interacciones de 2 términos	3	3.7453	1.2484	3.07	0.255
A*B	1	0.0008	0.0008	0	0.969
A*C	1	1.9	1.9013	4.68	0.163
B*C	1	1.84	1.8432	4.53	0.167
Interacciones de 3 términos	1	0.1922	0.1922	0.47	0.563
A*B*C	1	0.1922	0.1922	0.47	0.563
Curvatura	1	55.9913	55.9913	137.73	0.007
Error	2	0.8131	0.4065		
Total	10	144.285			

Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Según estudios, indican que una variable o interacción se considera significativa si se satisface la siguiente condición:

$$F_0 > F(\alpha, f_1, f_2)$$

Donde:

$\alpha$  = Representa nivel de confianza o significancia (por lo general es al 0,01 ó 0,05).

Para un nivel de significancia del 95%, el valor crítico de F para uno y dos grados de libertad es:

$$F(\alpha, f_1, f_2) = F(0,05; 1; 2) = 18,50.$$

Comparando el valor crítico de F (18.50) con el valor calculado  $F_0$ , se puede deducir que las variables más importantes son:

- $X_2$  (% de NaCN) y  $X_3$  (pH), estos valores son elegidos ya que  $F_0 > F$ .
- Además, se percibe que el efecto de la curvatura es bastante significativo, lo cual sugiere que en el centro del diseño se encuentra la región óptima.

#### 6.4.4. Modelo Matemático.

Una vez que se han identificado los efectos significativos, se realiza el desarrollo de un modelo matemático, el cual tiene que representar el proceso estudiado mediante el diseño factorial de dos niveles. En este caso, solo se pueden estimar modelos matemáticos lineales de la siguiente manera:

$$\hat{Y} = \bar{Y} + \sum_{j=1}^K b_j X_j + \sum_{u,j=1}^K b_{uj} X_u X_j + \dots \quad u \neq j \quad (5.8)$$

Para la estimación de los coeficientes  $b_j$  y  $b_{uj}$  se puede calcular con el uso de matrices o a partir de los efectos, como se muestra a continuación:

$$[B] = ([X^T][X])^{-1} ([X^T][Y]) \quad (5.9)$$

$$0 \quad b_j = \frac{Ex_j}{2} \quad (5.10)$$

(Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995)(p. 70,71)

A partir de los efectos calculados (Tabla 50) y al sustituirlos en la ecuación 5.10, se obtienen los correspondientes  $b_j$  (coeficientes de regresión):

$$\bar{Y} = 89,7475$$

$$b_1 = 2.005$$

$$b_2 = 2.1175$$

Al reemplazar lo calculado en la ecuación 5.8, se tiene el modelo matemático a escala codificada:

$$\hat{Y} = 89,7475 + 2.005X_2 + 2.1175X_3 \quad (5.11)$$

O en su ecuación más extensa:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 89,7463 + 1.393X_1 + 2,005X_2 + 2.1175X_3 - 0.010X_1X_2 - 0.4875X_1X_3 \\ & - 0.480X_2X_3 - 0.155X_1X_2 X_3 \end{aligned} \quad (5.12)$$

#### 6.4.5. Análisis de residuos.

El análisis de residuos se lleva a cabo para evaluar la diferencia entre los valores que el modelo predice y los valores experimentales observados. Este análisis se basa en los residuales, calculados como:

$$\text{Residual} = Y - \hat{Y}$$

Los resultados de este análisis se resumen en la tabla 52

**Tabla 52***Análisis de residuales*

N	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y	Ŷ	Y - Ŷ	(Y - Ŷ) <sup>2</sup>
1	1	-1	-1	83.41	85.625	-2.220	4.930
2	1	-1	-1	86.88	85.625	1.260	1.590
3	1	1	-1	88.09	89.635	-1.540	2.370
4	1	1	-1	92.14	89.635	2.510	6.300
5	1	-1	1	89.27	89.860	-0.590	0.350
6	1	-1	1	91.41	89.860	1.550	2.400
7	1	1	1	92.65	93.870	-1.220	1.490
8	1	1	1	94.13	93.870	0.260	0.068
$\Sigma$							19.498

Nota: Elaboración propia

Con base en los datos presentados en la Tabla 52, se calcula la suma de cuadrados medios del residual del modelo ( $SSM_R$ ), utilizando la ecuación siguiente:

$$SSM_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} (Y - \hat{Y})^2}{N_r - I} \quad (5.13)$$

Donde:

Ŷ = Es la respuesta o valor estimado según el modelo matemático.

Y = valor observado o respuesta experimental.

N<sub>r</sub> = Cantidad total de experimentos.

I = Cantidad de parámetros del modelo matemático.

N<sub>r</sub>-I =  $f_R$  = Grados de libertad del residuo, para el presente estudio igual a cinco ( $f_R = 8 - 3 = 5$ ).

(Ayala Mina & Pardo Mercado, 1995)(pg. 71,72)

Al usar la ecuación 5.13 se halla la suma de cuadrados medios del residual del modelo ( $SSM_R$ ):

$$SSM_R = \frac{19.498}{8-3} = 3.8995$$

Para determinar de manera estadística si el modelo matemático encontrado representa de

manera ideal los datos experimentales, se lleva a cabo la prueba F:

$$F_0 = \frac{SSM_{Residual}}{MS_{Error}} \quad (5.14)$$

$$F_0 = \frac{3.8995}{0.8131} = 4.79587$$

El modelo es ideal si:

$$F_0 < F(\alpha, f_R, f_2)$$

$\alpha = 0,05$ ; para un nivel de confianza del 95%.

Para un nivel de significancia de 95%, el valor crítico de F de tabla para cinco y dos grados de libertad es:

$$F(\alpha, f_R, f_2) = F(0,05; 5; 2) = 19,30.$$

Se ha visto que el valor calculado  $F_0$  es menor que el valor crítico de F, se concluye que el modelo matemático se ajusta de forma ideal a los datos experimentales.

#### 6.4.6. Decodificación del modelo a escala natural.

En forma codificada, el modelo matemático es:

$$\hat{Y} = 89,7475 + 2.005X_2 + 2.1175X_3 \quad (5.15)$$

Para el uso de este modelo, los datos de las variables  $X_2$  y  $X_3$  se expresan como -1 y +1. Para convertir estos valores codificados en los valores reales de las variables, se debe calcular el modelo en su forma decodificada de acuerdo con:

$$\hat{Y}_D = a_0 + a_2Z_2 + a_3Z_3 \quad (5.16)$$

Donde:

$$a_0 = \bar{Y} - b_2\varepsilon_{X_2} - b_3\varepsilon_{X_3} \quad (5.17)$$

$$a_2 = \frac{b_2}{\Delta Z_{X_2}} \quad (5.18)$$

$$a_3 = \frac{b_3}{\Delta Z_{X_3}} \quad (5.19)$$

A continuación, se calcula lo siguiente:

- **Centro del diseño:**

$$Z_{X_2}^0 = \frac{0,5 + 1,00}{2} = 0,75$$

$$Z_{X_3}^0 = \frac{10 + 11}{2} = 10,50$$

- **Radio del diseño:**

$$\Delta Z_{X_2} = \frac{1,00 - 0,5}{2} = 0,25$$

$$\Delta Z_{X_3} = \frac{11 - 10}{2} = 0,50$$

- **Relación  $\varepsilon$ :**

$$\varepsilon_{X_2} = \frac{Z_{X_2}^0}{\Delta Z_{X_2}} = \frac{0,75}{0,25} = 3,00$$

$$\varepsilon_{X_3} = \frac{Z_{X_3}^0}{\Delta Z_{X_3}} = \frac{10,50}{0,50} = 21,00$$

Esto se detalla en la tabla 53

**Tabla 53**

*Valores para la decodificación del modelo*

	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Nivel Inferior (-)	0.5	10
Nivel Superior (+)	1	11
Centro del Diseño (Z <sup>o</sup> <sub>j</sub> )	0.75	10.5
Radio del Diseño(ΔZ <sub>j</sub> )	0.25	0.5
Relación (ε <sub>j</sub> )	3,00	21

Nota: Elaboración propia

Al sustituir estos datos en las ecuaciones (5.17), (5.18) y (5.19), se obtienen los coeficientes para la ecuación en escala natural:

$$a_0 = 89.7475 - 2.005(3) - 2.1175(21) = 39.265$$

$$a_1 = \frac{2.005}{0.25} = 8.02$$

$$a_2 = \frac{2.1175}{0.50} = 4.235$$

Sustituyendo estos coeficientes en la ecuación (5.16), se obtiene la ecuación definitiva decodificada en escala natural:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 8.02Z_2 + 4.235Z_3 \quad (5.20)$$

Usando la ecuación (5.20), al despejar  $Z_3$  se deriva la ecuación 5.21. Posteriormente al asignar valores a  $Z_2$  se elabora la tabla 54.

$$Z_3 = \frac{(\hat{Y}_D - 39.265) - (8.02Z_2)}{4.235} \quad (5.21)$$

Donde:

$\hat{Y}_D$  = Porcentaje de Extracción (80%, 90% y 98%)

**Tabla 54**

*Dando valores a  $Z_2$  en la ecuación 5.22*

$Z_2$ (% CIANURO)	$Z_3$ (pH)		
	$Z_{2-80}$ %Extracción.	$Z_{2-90}$ %Extracción.	$Z_{2-98}$ %Extracción.
0.10	9.43	11.79	13.68
0.20	9.24	11.60	13.49
0.30	9.05	11.41	13.30
0.40	8.86	11.22	13.11
0.50	8.67	11.03	12.92
0.60	8.48	10.84	12.73
0.70	8.29	10.65	12.54
0.80	8.10	10.46	12.35
0.90	7.91	10.28	12.16
0.95	7.82	10.18	12.07
1.00	7.72	10.09	11.98

Nota: Elaboración propia

Utilizando la ecuación (5.20), al despejando  $Z_1$  se deriva la ecuación 5.22. luego, al asignar valores a  $Z_2$  se elabora la tabla 55.

$$Z_2 = \frac{(\hat{Y}_D - 39.265) - (4.235Z_3)}{8.02} \quad (5.22)$$

Donde:

$\hat{Y}_D$  = Representa el porcentaje de Recuperación (90%, 95% y 98%)

**Tabla 55**

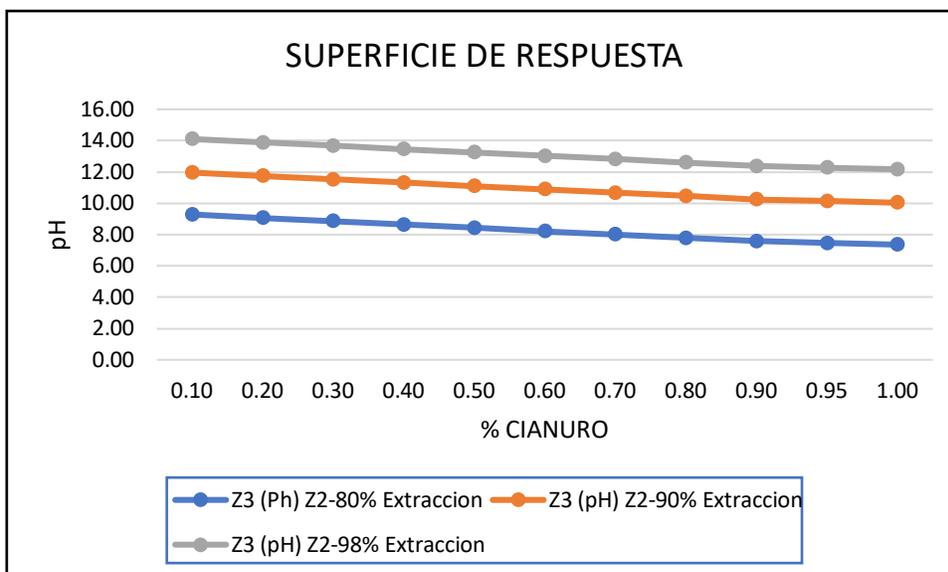
*Dando valores a  $Z_3$  en la ecuación 5.22*

$Z_3$ (pH)	$Z_2$ (% CIANURO)		
	$Z_{2-90}$ %Extracción.	$Z_{2-95}$ %Extracción.	$Z_{2-98}$ %Extracción.
10.0	1.05	1.67	2.17
10.1	0.99	1.62	2.11
10.2	0.94	1.56	2.06
10.3	0.89	1.51	2.01
10.4	0.83	1.46	1.96
10.5	0.78	1.40	1.90
10.6	0.73	1.35	1.85
10.7	0.68	1.30	1.80
10.8	0.62	1.25	1.75
10.9	0.57	1.19	1.69
11.0	0.52	1.14	1.64
11.5	0.25	0.88	1.38

Nota: Elaboración propia

**Figura 28**

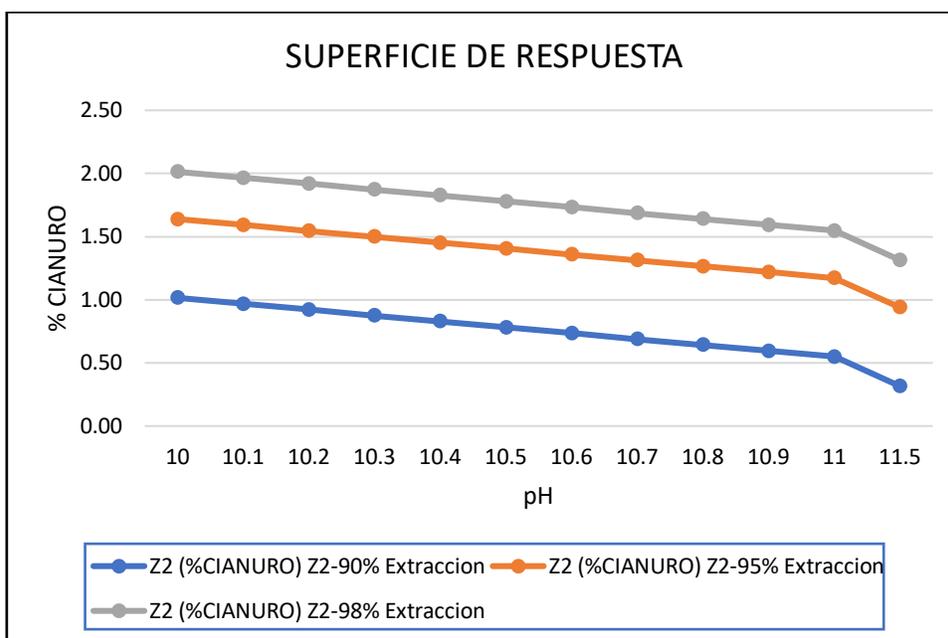
*Gráfica de superficie de respuesta para la ecuación 5.21.*



Nota: Elaboración propia

**Figura 29**

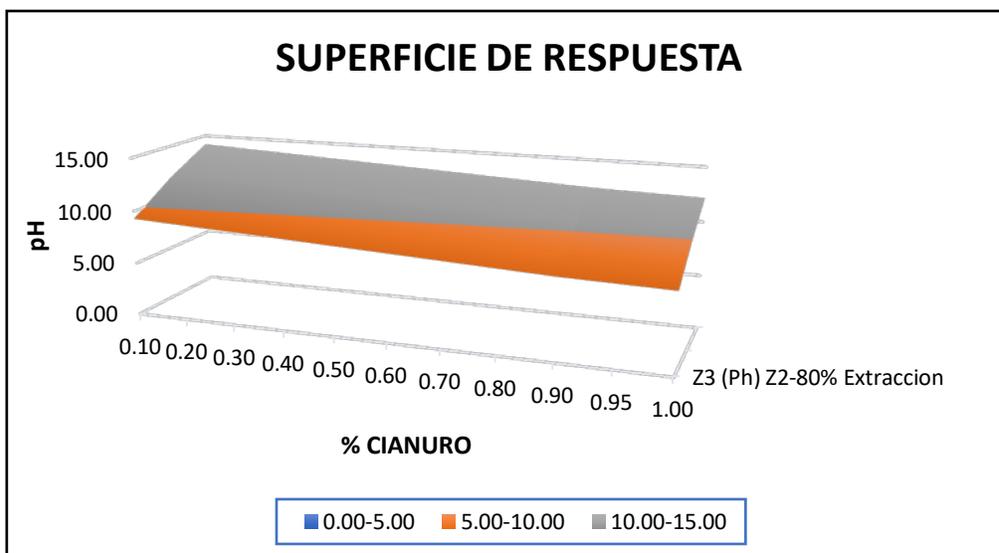
*Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.22.*



Nota: Elaboración propia

**Figura 30**

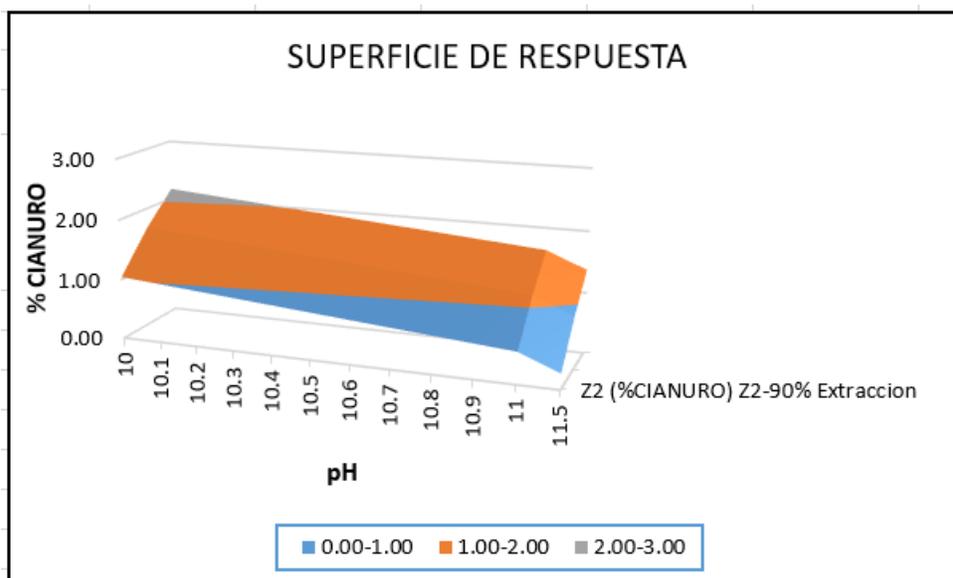
*Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.21.*



Nota: Elaboración propia

**Figura 31**

*Gráfica de la superficie de respuesta correspondiente a la ecuación 5.22.*



Nota: Elaboración propia

## 6.5. Discusión de resultados

### 1. De las generalidades

- El análisis de cabeza de mineral del yacimiento Cochasayhuas - San Lucas, al cual inicialmente se le realizó el análisis químico, resultó con una ley de 0.598 oz/TC, que sería 20 g/TM, una ley con buena cantidad de oro para su extracción.

### 2. El modelo matemático, junto con sus respectivas gráficas, nos permite inferir:

- De acuerdo con el análisis del diseño factorial y los resultados obtenidos, se pueden deducir los efectos de las variables más significativas. Las observaciones son las siguientes:
  - El efecto de la concentración de cianuro es de 4.010. Al incrementar la concentración de 0.5 a 1, se observa un incremento en el porcentaje de extracción de oro, indicando que este factor tiene una influencia considerable en el proceso.
  - El efecto del pH es 4.235 esto indica que se debe tener un estricto control entre 10 - 11 de esta variable tanto en la extracción de oro y el control de no formar ácido cianhídrico (HCN) que sería mortal para los colaboradores
- En la tabla ANOVA, se detallan los puntos de la distribución F para los porcentajes de variabilidad en la recuperación de oro, indicando que los efectos de concentración de cianuro ( $X_2$ ) y pH ( $X_3$ ) son muy distintos de cero con un nivel de confianza del 95%. Se obtuvieron los modelos matemáticos correspondientes para estos efectos.:

Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$\hat{Y} = 89,7475 + 2.005X_2 + 2.1175X_3$$

Ecuación del modelo matemático a escala natural:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 8.02Z_2 + 4.235Z_3$$

## CONCLUSIONES

- Se extrae el 95.5 % de oro, del yacimiento Cochasayhuas - minera artesanal San Lucas, aplicando el proceso de lixiviación por agitación con cianuro de sodio, encontrándose el mayor porcentaje de extracción en las pruebas centrales.
- Se determinó que para una extracción al 95.5% de oro, la dosificación adecuada de cianuro de sodio es 0.75 %, el % de solidos es 30 % y un pH de 10.5.
- Para lograr esta recuperación se trabaja con 414.24 g de mineral seco, a una densidad de pulpa de 1,232.88 g/cm<sup>3</sup>, con un consumo acumulado de cianuro de sodio de 3.19 g y consumo acumulado de 7.46 g de cal. En un proceso de lixiviación por agitación con cianuro de sodio que dura 72 horas.
- El análisis de varianza revela que tanto el pH como la concentración de CN<sup>-1</sup> tienen un impacto significativo en el proceso, es decir que ellos afectan sensiblemente a la extracción de oro haciendo el incremento de los parámetros a niveles superiores.
- El modelo encontrado en base los datos experimentales para las variables más significativas; concentración de cianuro (Z<sub>2</sub>) y pH (Z<sub>3</sub>) es el siguiente:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 8.020Z_2 + 4.235Z_3$$

y en su ecuación más extensa es:

$$\hat{Y}_D = 39.265 + 0.279Z_1 + 8.020Z_2 + 4.235Z_3 - 0.001Z_1 Z_2 - 0.007Z_1 Z_3 - 0.163Z_2 Z_3 - 0.001Z_1 Z_2 Z_3$$

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar malla valorada de la cabeza y relave de las muestras evaluadas para tener una caracterización adecuada del mineral y observar de mejor manera el grado de liberación en cada una de las mallas del rotap.
- Se recomienda tener un tiempo de molienda mayor a 50 minutos y hacer algunos cambios en el molino de bolas como la implementación de placas que tengan un ángulo de levante simulando los layners que se usan en gran minería para mejorar la moliendabilidad de los materiales a tratar.
- Se recomienda un estudio más específico con microscopia de barrido electrónico y DRX para determinar la estructura cristalina, contabilizar los elementos que están presentes en el mineral a tratar y en que mineral está incluido el oro para seguir mejorando el proceso de extracción.
- Se recomienda el estudio del proceso de recuperación por carbón activado, del oro extraído por este estudio de investigación en la minera artesanal San Lucas.

## BIBLIOGRAFIA

- ✓ Ayala Mina, J., & Pardo Mercado, R. (1995). *Optimizacion por Diseño Experimental*. Lima.
- ✓ Caceres Arenas, G. (1992). *Hidrometalurgia y electrometalurgia*. Universidad de Atacama. Chile.
- ✓ Chavez Flores, P. O. (2014). *Determinacion de la dosificacion optima de cianuro para lograr la mayor recuperacion de oro y plata en el proceso de lixiviacion intensiva de concentrados*. Universidad Nacional de San Agustin.
- ✓ Contreras Castro, D. (1967). *Experimento de minerales de oro y plata por el proceso de cianuración: Boletín N° 8-Comisión de Fomento Minero*. Mexico D.F.
- ✓ Diez Canseco. (1989). *Metalurgia del oro y de la plata (1ra ed.)*. UNI.
- ✓ Gaviria, A. C., Restrepo, O. J., & Bustamante, O. (2007). *Hidrometalurgia aplicada*. Medellin.
- ✓ Habashi, F. (1997). *Cianuración de minerales de oro y plata*.
- ✓ Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodologia de la investigacion*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- ✓ Krauskopf, K. B., & Bird, D. K. (1993). *Introduccion a la geoquimica*. McGraw-Hill.
- ✓ Mendo Escalante, D. S., & Farfan Chilicaus, G. (2016). *Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación Cachachi-Cajamarca, 2016. (Tesis de maestria)*. Universidad

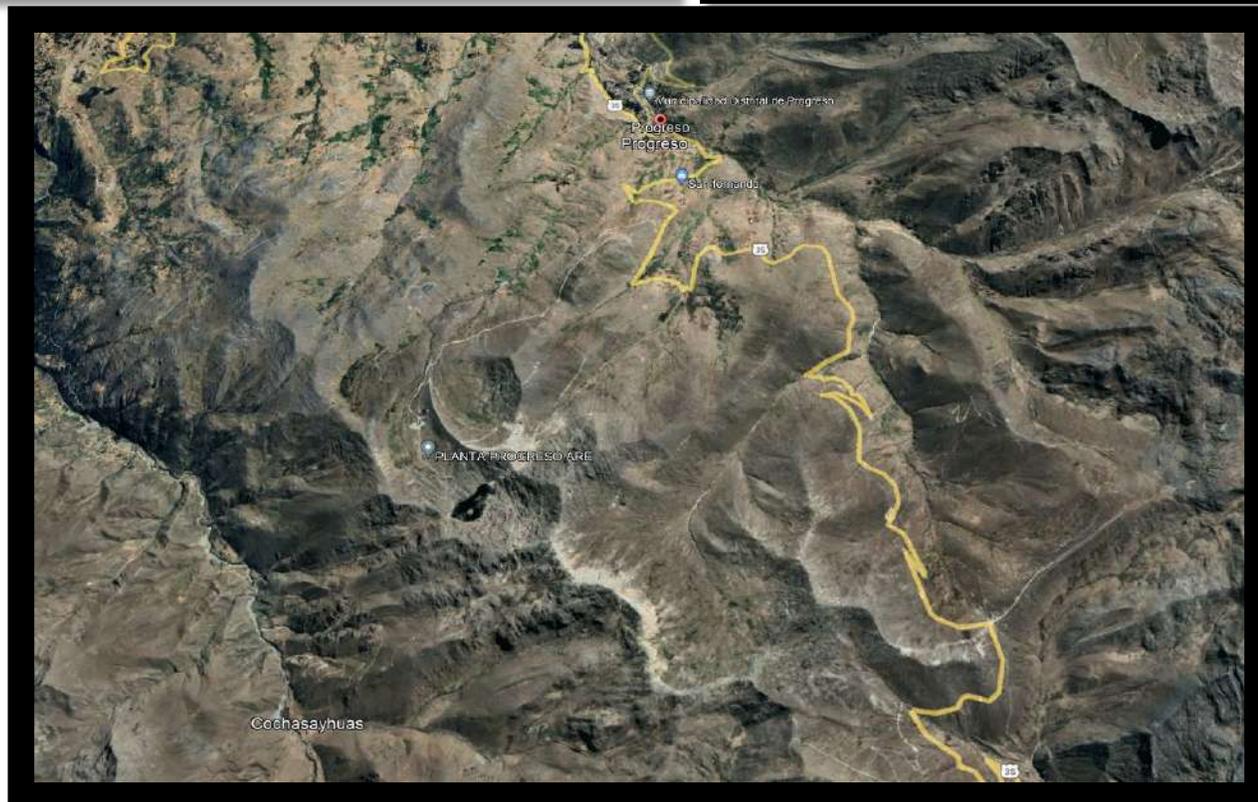
Privada del Norte.

- ✓ Misari, F. (1994). *Metalurgia del oro I y II (1ra ed.)*. CEPECT.
- ✓ Morales Mendoza, M., & Gomez Elorrieta, J. (2012). *Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales de Au-Ag en la Compañía Minera Ares Casilla-Arequipa*. . Peru.
- ✓ Morris, A. E. (1954). *Metalurgia extractiva del oro y la plata*. Omeba.
- ✓ Porras, D. (1998). *Procesamiento de minerales*. UNI.
- ✓ Tecsup. (2009). *Metalurgia extractiva del oro*.
- ✓ Vargas Gallardo, J. (1995). *Metalurgia del oro y la plata*. Editorial San Marcos.
- ✓ Vilca Taype, S. (2013). *Proceso de lixiviación dinámica de minerales auríferos de baja ley en SMRL, San Juan Cien Cabanilla-Puno*. Universidad Nacional del Antiplano.

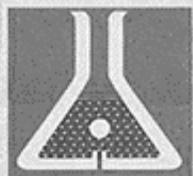
**ANEXOS**

## ANEXO N°01

## UBICACIÓN DE YACIMIENTO



## ANEXO N° 2



**LabPERU**  
E.I.R.L.

## INFORME DE ENSAYO N° MN 0106240085A

**A SOLICITUD DE  
DIRECCION DEL SOLICITANTE**

**PUMACAYO CRUZ TONNY HENRY  
CUSCO**

**POR CUENTA DE  
ASUNTO  
PRODUCTO DESCRITO COMO  
CANTIDAD DE MUESTRAS  
INSTRUCCIONES DE ENSAYO  
LUGAR Y FECHA DE RECEPCION  
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES  
RECEPCION DE LAS MUESTRAS  
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO**

**LEVA HOLGUIN DAVID  
PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO  
CONCENTRADOS  
11  
Tipo Lote  
Vista Alegre, 01/03/2024  
Bolsa Plastica Sellada  
CONCENTRADOS  
Vista Alegre - Nasca 03/03/2024**

### ENSAYO RESULTADO

Código Interno	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	Au mg/L
MN20110253	PLS 01	CUSCO	solución rica	5.70
MN20110254	PLS 02	CUSCO	solución rica	8.59
MN20110255	PLS 03	CUSCO	solución rica	6.02
MN20110256	PLS 04	CUSCO	solución rica	10.17
MN20110257	PLS 05	CUSCO	solución rica	6.10
MN20110258	PLS 06	CUSCO	solución rica	10.09
MN20110259	PLS 07	CUSCO	solución rica	6.33
MN20110260	PLS 08	CUSCO	solución rica	10.39
MN20110261	PLS 09	CUSCO	solución rica	8.28
MN20110262	PLS 10	CUSCO	solución rica	8.39
MN20110263	PLS 11	CUSCO	solución rica	8.32

**OBSERVACIONES.** Referencia : RA-01-11072-24

Emitido en Nasca, 03 de marzo del 2024



Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo amerita la(s) muestra(s) del producto serán analizadas por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según nuestros procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre  
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com



## INFORME DE ENSAYO N° MN 0106240080A

**A SOLICITUD DE  
DIRECCION DEL SOLICITANTE**

**PUMACAYO CRUZ TONNY HENRY  
CUSCO**

**POR CUENTA DE**

**LEVA HOLGUIN DAVID**

**ASUNTO  
PRODUCTO DESCRITO COMO  
CANTIDAD DE MUESTRAS  
INSTRUCCIONES DE ENSAYO  
LUGAR Y FECHA DE RECEPCION  
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES  
RECEPCION DE LAS MUESTRAS**

**PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO  
CONCENTRADOS  
11  
Tipo Lote  
Vista Alegre, 01/03/2024  
Bolsa Plastica Sellada  
CONCENTRADOS, 4.50 Kg Aproximado**

**FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO**

**Vista Alegre - Nasca 02/03/2024**

### ENSAYO RESULTADO

Código Interno	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	Au	
				g/TM	oz/TC
MN20110241	CABEZA	CUSCO	Cabeza	20.50	0.598
MN20110242	RIPIO 1	CUSCO	Ripio	3.41	0.099
MN20110243	RIPIO 2	CUSCO	Ripio	2.69	0.078
MN20110244	RIPIO 3	CUSCO	Ripio	2.45	0.071
MN20110245	RIPIO 4	CUSCO	Ripio	1.62	0.047
MN20110246	RIPIO 5	CUSCO	Ripio	2.22	0.065
MN20110247	RIPIO 6	CUSCO	Ripio	1.77	0.052
MN20110248	RIPIO 7	CUSCO	Ripio	1.5	0.044
MN20110249	RIPIO 8	CUSCO	Ripio	1.21	0.036
MN20110250	RIPIO 9	CUSCO	Ripio	1.19	0.035
MN20110251	RIPIO 10	CUSCO	Ripio	0.93	0.027
MN20110252	RIPIO 11	CUSCO	Ripio	1.09	0.032

**OBSERVACIONES.**

Referencia : RA-01-11071-24

Emitido en Nasca, 02 de marzo del 2024



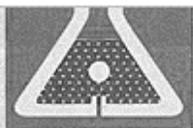
Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo requiere (s) contra (muestras) del producto serán emitidas por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según los procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Página 1 de

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre  
WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

[www.labperu.com](http://www.labperu.com) - email: [labperu@yahoo.com](mailto:labperu@yahoo.com) - [informes@labperu.com](mailto:informes@labperu.com)



**LabPERU**  
E.I.R.L.

## INFORME DE ENSAYO N° MN 0106240081A

**A SOLICITUD DE  
DIRECCION DEL SOLICITANTE**

**PUMACAYO CRUZ TONNY HENRY  
CUSCO**

**POR CUENTA DE  
ASUNTO  
PRODUCTO DESCRITO COMO  
CANTIDAD DE MUESTRAS  
INSTRUCCIONES DE ENSAYO  
LUGAR Y FECHA DE RECEPCION  
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES  
RECEPCION DE LAS MUESTRAS  
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO**

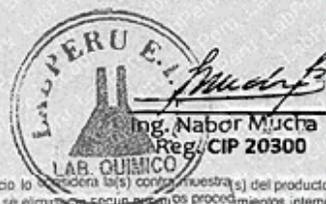
**LEVA HOLGUIN DAVID  
PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO  
CONCENTRADOS  
11  
Tipo Lote  
Vista Alegre, 02/03/2024  
Bolsa Plastica Sellada  
CONCENTRADOS, 4.50 Kg Aproximado  
Vista Alegre - Nasca 03/03/2024**

### ENSAYO RESULTADO

Código Interno	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	Au	
				g/TM	oz/TC
MN20110324	RELAVE 1	CUSCO	Relave	12.07	0.352
MN20110325	RELAVE 2	CUSCO	Relave	10.60	0.309
MN20110326	RELAVE 3	CUSCO	Relave	11.93	0.348
MN20110327	RELAVE 4	CUSCO	Relave	10.71	0.312
MN20110328	RELAVE 5	CUSCO	Relave	12.00	0.350
MN20110329	RELAVE 6	CUSCO	Relave	10.62	0.310
MN20110330	RELAVE 7	CUSCO	Relave	11.86	0.346
MN20110331	RELAVE 8	CUSCO	Relave	10.73	0.313
MN20110332	RELAVE 9	CUSCO	Relave	11.18	0.326
MN20110333	RELAVE 10	CUSCO	Relave	11.31	0.330
MN20110334	RELAVE 11	CUSCO	Relave	11.25	0.328

**OBSERVACIONES.** Referencia : RA-01-11071-24

Emitido en Nasca, 03 de marzo del 2024



Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L., y si el servicio lo requiere la(s) muestra(s) del producto serán LP-FC-08/2024 conservadas por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según los procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una declaración de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Página 1 de 3

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU

Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre

WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

**www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com**



## INFORME DE ENSAYO N° MN 050724024

**A SOLICITUD DE  
DIRECCION DEL SOLICITANTE**

**TONY PUMACAYO  
ABANCAY**

**POR CUENTA DE**

**TONY PUMACAYO**

**ASUNTO  
PRODUCTO DESCRITO COMO  
CANTIDAD DE MUESTRAS  
INSTRUCCIONES DE ENSAYO  
LUGAR Y FECHA DE RECEPCION  
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES  
RECEPCION DE LAS MUESTRAS  
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO**

**PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO  
MINERAL  
1  
Tipo Reconocimiento  
Vista Alegre, 05/07/2024  
Bolsa Plástica  
MUESTRA MOLIDA, 2.42 Kg Aproximado  
Vista Alegre - Nasca 05/07/2024**

### ENSAYO RESULTADO

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	ELEMENTOS
	SAN LUCAS
Oz/Tc	
•0.383	

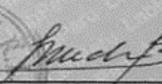
### METODOS DE ENSAYO

DETERMINACIÓN	REFERENCIA O NORMA
Oro	LP-VS-ME-01 .Rev.01 / Determinación de Oro en Minerales Ferrosos y no Ferrosos de Alta Ley por Fire Assay_Método Gravimétrico.

#### OBSERVACIONES.

- Se Recomienda Realizar Análisis por Lote.

Emitido en Nasca, 05 de Julio del 2024

  
**Ing. Nabor Mucha**  
 Reg. CIP 20300

LP-F0-08/V03 Ensayos se han realizado en el Laboratorio Químico LABPERU E.I.R.L. Y si el servicio lo considera la(s) contra muestra(s) del producto serán conservadas por un periodo de tiempo declarado y/o acordado con el cliente, luego del cual se eliminarán según nuestros procedimientos internos. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Página 3 de 4

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de LABPERU.  
 Av. Paredones N° 801, NASCA - Panamericana Sur Mz A2, Vista Alegre  
 WhatsApp: 955506006, WhatsApp: 956725178

www.labperu.com - email: labperu@yahoo.com - informes@labperu.com

## ANEXO N° 3

a	<b>Hoja de Datos de Seguridad de Materiales (MSDS)</b>	
---	----------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

<b>Cianuro de Sodio</b>		
-----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

## Sección I : Información del Producto Químico y de la Compañía

Nombre del Material	Cianuro de Sodio.
Fórmula Química	NaCN
Número CAS	143-33-9
Código UN	1689
Guía de Respuesta	157
Clasif. Mat. Pelig.	6.1
Código Hazchem	2X
Sinónimos	Sal de Sodio, Cianuro blanco.
Uso	Pilas de Lixiviación.
Manufacturero	TICOR CHEMICAL COMPANY PTY LTD. P.O. Box 1305, Gladstone. Queensland, 4680. Teléfono (07) 4976-1777. Emergencias (07) 4973-6660 las 24 horas.
Usuario	MINERA BARRICK MISQUICHILCA S.A Emergencias (51-1) 217-0180.

## Sección II : Composición / Información de Componentes

Ingredientes	Proporción	Número CAS
Cianuro de Sodio	98 %	143-33-9
HCOONa	1 %	
H <sub>2</sub> O	0,3 %	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,6 %	
NaOH	0,1 %	1310-73-2
PEL de OSHA	: 5 mg/m <sup>3</sup>	
TLV de ACGIH	: C 5 mg/m <sup>3</sup>	

Sección III : Identificación de Riesgos	
Entradas Principales	Inhalación, absorción, Ingestión, contacto.
Inhalación	El polvo o neblina (solución) puede ser irritante a las vías respiratorias y garganta. En NaCN reacciona con la humedad liberando gas cianhídrico.
Ojos	El cianuro en forma de polvo o como gas de cianhídrico, es rápidamente absorbido por los ojos y puede ser las vía de severas irritaciones e intoxicación. Debido al contenido de hidróxido de sodio puede causar daños a los tejidos severos y dolorosos.
Piel	Es un tóxico por absorción de la piel. El contacto prolongado o repetido puede causar escozor, caracterizado por erupciones musculares, papilares y vesiculares. A través de la piel se puede absorber cantidades fatales de cianuro de sodio
Ingestión	El cianuro inhibe la oxidación tisular provocando la muerte por asfixia química en minutos.
Carcinogenicidad	No figura como cancerígeno.

Sección IV : Medidas de Primeros Auxilios	
Inhalación	Remover a la víctima al aire fresco. Si hay dificultad al respirar y los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno y nitrito de amilo y no inducir al vómito. Contactar un médico inmediatamente.
Contacto con los ojos	En caso de contacto lavar arriba y abajo de los párpados por 15 minutos. Llamar al médico.
Contacto con la piel	En caso de contacto lavar la zona afectada inmediatamente con abundante agua. Retirar la ropa contaminada. Si los síntomas de envenenamiento son evidentes dar oxígeno. Llamar al médico.
Ingestión	Si respira y esta consciente, lavar la boca con agua. Si esta inconsciente no darle de beber nada. Dar carbón activado (Carbosorb) y buscar ayuda médica inmediatamente.
Facilidades para primeros auxilios	Donde esté presente el cianuro asegúrese que las instalaciones deben contar con ducha y lavaojos disponibles.

Sección V : Medidas para la extinción de incendios	
Medios de Extinción	Usar polvo químico seco para fuegos. No usar extintores de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) ya que pueden liberar HCN. No utilice agua a menos que los contenedores se encuentren intactos.
Riesgos Especiales	No es combustible y sus límites de inflamabilidad son bajos.

Sección VI : Medidas para derrames accidentes	
Procedimientos de Recojo y Limpieza	Barra y recoja con pala y deposite en un recipiente cerrado o una bolsa plástica para detener el derrame mientras se transporta. Etiquete los contenedores. Cubra y mantenga seco el derramamiento.
Derrames Pequeños (soluciones)	Utilice material absorbente adecuado que no reaccione con el material derramado tales como arena. No utilice aserrín en ningún caso (ácido). Recoja el material derramado y etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante.
Derrames Pequeños (sólidos)	Recupere todo lo que es posible con lampas o escobas, etiquete los contenedores. Cubra el derrame. Tratar los residuos con agentes neutralizantes notificados por el fabricante. Cuidado : El hipoclorito de sodio es un agente contaminante del medio ambiente. Use solo donde existen fugas y es improbable causar problemas.
Derrames Grandes	Contacte al servicio de emergencia y proveedor inmediatamente. Contener utilizando sacos de arena o tierra, recuperar el material si es seguro hacerlo. No trate de neutralizar sin asistencia.

Sección VII : Manejo y Almacenamiento	
Almacenamiento	Almacenar en lugares frescos y secos. Las áreas deben contar con buena ventilación y fuera de contacto directo con los rayos solares. Evitar su almacenamiento cerca de materiales incompatibles como productos oxidantes, ácidos, agua y productos que contienen agua.
Manipulación	El cianuro en lo posible debe ser almacenado solo. Utilice siempre su equipo de protección personal.

Sección VIII : Controles de Exposición / Protección Personal	
Protección Respiratoria	Los niveles de exposición deben ser mantenidos bajo los límites. Hacer uso de respiradores canister para NaCN en polvo y con niveles bajos de HCN. En todo caso usar respiradores aprobados por NIOSH si fuera posible con suministro de aire en concentraciones altas.
Equipo de Protección	Usar ropa de seguridad, guantes largos de jebes y lentes o antiparras para una protección total.
Ventilación	Tener una ventilación forzada en las áreas de exposición, para mantener los niveles de exposición por debajo de los límites permisibles.

Sección IX : Propiedades Físicas y Químicas	
Estado físico	Sólido en briquetas
Peso	15 gr
Dimensiones	31 mm x 30 mm x 11 mm
Color	Blanco
Olor	Ligero olor a amoníaco o almendras amargas
Punto de Fusión	562 °C (1043 °F).
Punto de Ebullición	1497 °C (2726 °F).
Solubilidad	480 gr/lt de solución a 20 °C
Gravedad Específica	1.61
Presión de Vapor	0.10 Kpa (800 °C)
Otros	PH : 11-12

Sección X : Estabilidad y Reactividad	
Estabilidad	Estable en condiciones normales.
Incompatibilidad	Ocurre reacciones químicas cuando entran en contacto con ácidos fuertes o bases fuertes. El cianuro de sodio es altamente corrosivo a muchos metales. Reacciona violentamente con agentes oxidantes que liberarán gases tóxicos.
Prod descomposición Peligrosos	Puede formar gases tóxicos como HCN y óxidos de nitrógeno.

Sección XI : Información Toxicológica	
Toxicidad	Los efectos sobre la salud humana debidos a una exposición excesiva por inhalación, ingestión o contacto con la piel o los ojos pueden incluir irritación de la piel con malestar o erupciones, irritación de los ojos o quemadura con malestar, lagrimeo, visión borrosa y la posibilidad de daño permanente a los ojos. No figura como cancerígeno. Los individuos con enfermedades ya existentes del sistema nervioso central pueden ser más susceptibles a la toxicidad de exposiciones excesivas.

Sección XII : Información Ecológica	
Ecotoxicidad	El cianuro es un producto tóxico. Todo manejo debe regirse por las leyes locales.

## ANEXO N° 4

## Hoja de Datos de Seguridad de Materiales para Hidróxido de Calcio

### Sección I - Identidad

**Nombre del Productor y Domicilio:** Ash Grove Cement Company  
 8900 Indian Creek Parkway  
 P. O. Box 25900  
 Overland Park, KS 66225  
**Número Teléfono de Emergencia:** (913) 451-8900  
**Número Teléfono Información:** (913) 451-8900  
**Nombre Químico y Sinónimos:** Hidróxido de calcio, dihidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , cal apagada, cal hidratada, cal, carbóxido, cal viva  
**Nombre Comercial y Sinónimos:** Snowflake, Kemilime, Slik  
 CAS No. 1305-62-0  
**Fecha de Revisión:** Diciembre 2000

### Sección II - Ingredientes Peligrosos y Límites de Exposición

	<u>CAS #</u>	<u>%</u>	<u>OSHA PEL</u>	<u>1994-95 ACGIH TLV</u>	<u>MSHA 1973 TLV</u>
Hidróxido de Calcio	1305-62-0	>1%	15 mg/m <sup>3</sup> polvo total	5 mg/m <sup>3</sup>	N/A
[Ca(OH) <sub>2</sub> ]			5 mg/m <sup>3</sup> polvo respirable		

N/A = No Aplicable

### Sección III – Características Físicas/Químicas

**Familia Química:** Base Inorgánica  
**Peso Molecular:** 74.10  
**Punto de Ebullición:** Se descompone a óxido de calcio arriba de 580EC  
**Punto de Fusión** (-H<sub>2</sub>O) at 580EC; se convierte en óxido de calcio  
**Presión de Vapor (mm Hg):** No Aplicable  
**Gravedad Específica:** 2.24  
**Densidad de Vapor:** (Aire=1) 0  
**Solubilidad en Agua:** 0.185 g/100 ml a 0EC  
 0.077 g/100 ml a 100EC  
**Porcentaje de Evaporación:** No Aplicable  
**Aspecto y Olor:** Polvo blanco blando, sin olor

---

### Sección IV – Datos de Peligro por Incendio o Explosión

---

**Punto de Inflamación:** No aplicable, el hidróxido de calcio no es combustible ni explosivo

**Límite Inflamable o Explosivo:** No aplicable; UEL: No aplicable

**Medio Extintor:** No aplicable

**Procedimientos Especiales para Combatir el Incendio:** El hidróxido de calcio no es combustible.

**Medios para Combatir Incendios:** Químico seco, bióxido de carbono, esparsor de agua o espuma. Para fuegos grandes, use esparsor de agua o neblina.

**PRECAUCION:** Las soluciones de agua saturadas con cal hidratada pueden tener un pH of 12-12.49 a temperaturas de 25EC o superiores. Ver Sección VII para tomar las precauciones apropiadas.

**Peligros No Usuales de Incendio y Explosión:** Ningunos.

---

### Sección V – Datos Sobre Peligros a la Salud

---

**Ruta(s) de Entrada:** Inhalación; piel, ojos, ingestión

1. **Inhalación:** corrosivo
  - a. **Exposición Aguda:** La inhalación de concentraciones bajas puede causar dolor de garganta, tos, asfixia, disnea, y síntomas variados de dolor de cabeza, mareos y debilitamiento. Exposiciones intensas pueden resultar en opresión en el pecho y edema pulmonar de acción retardada. La solubilidad de la sustancia permite una penetración ulterior, y podrá continuar por varios días.
  - b. **Exposición Crónica:** Irritación bronquial con tos crónica es común.
  - c. **Primeros Auxilios:** Retírelo de la exposición, muévelo inmediatamente al aire fresco. Mantenga a la persona afectada cubierta, caliente y descansada. Obtenga atención médica.
  
2. **Contacto con la Piel:** corrosivo
  - a. **Exposición Aguda:** La cal en contacto con la piel desprotegida puede producir graves quemaduras. Debido a la solubilidad de la cal, es posible penetración ulterior y podrá continuar por varios días. La extensión del daño depende de la duración del contacto.
  - b. **Exposición Crónica:** Una dermatitis crónica puede resultar por el contacto repetido.
  - c. **Primeros Auxilios:** Quite inmediatamente la ropa y el calzado contaminados. Lave el área afectada con jabón y agua, o con un detergente suave y grandes cantidades de agua hasta que no quede rastro alguno del químico (aproximadamente de 15 a 20 minutos) En el caso de quemaduras químicas, cubra el área afectada con gasa seca estéril. Aplique vendaje firme no muy apretado. Obtenga atención médica.
  
3. **Contacto con los Ojos:** corrosivo

- a. **Exposición Aguda:** El contacto directo con el sólido o con soluciones acuosas puede causar un edema conjuntival y destrucción de la córnea, lo cual puede llegar a causar ceguera
- b. **Exposición Crónica:** El contacto prolongado puede causar conjuntivitis.
- c. **Primeros Auxilios:** Lave los ojos inmediatamente con grandes cantidades de agua, levantando ocasionalmente los párpados superior e inferior, hasta que no quede rastro alguno del químico (aproximadamente de 15-20 minutos). Obtenga atención médica inmediatamente. La ministración de drogas a los ojos debe ser hecha por personal médico calificado.

4. **Ingestión:** corrosivo. Si es ingestado, consulte a un médico inmediatamente.

El hidróxido de calcio está listado como un carcinógeno por OSHA: NO Por NTP: NO Por IARC: NO

Condiciones médicas generalmente agravadas por la exposición: Desórdenes o enfermedades respiratorias, la dermatitis u otros desórdenes de la piel pueden agravarse por la exposición.

## Sección VI – Datos de Reactividad

**Estabilidad:** Estable bajo temperaturas y presiones normales. El hidróxido de calcio va a absorber gradualmente el bióxido de carbono cuando es expuesto al aire, formando carbonato de calcio.

**Incompatibilidad (materiales a evitar):** anhídrido maléico, Nitroparafinas, nitrometano, nitroetano, y nitropropano; todos pueden formar sales explosivas con el hidróxido de calcio.

El fósforo, cuando se hierve con hidróxidos alcalinos, produce fosfinas mixtas, las cuales pueden incendiarse espontáneamente en el aire.

**Polimerización Peligrosa:** No ocurrirá.

**Agua:** El hidróxido de Calcio forma una solución corrosiva, pH 12-12.49, con agua a temperaturas de 25EC o superiores.

**Descomposición Peligrosa o Subproductos:** Cuando se calienta por arriba de 580EC, el hidróxido de calcio pierde el agua y forma el óxido de calcio, o cal viva.

**Condiciones a Evitar:** No Aplicable

## Sección VII - Precauciones para su Manejo y Uso Seguros

Precauciones para su manejo, almacenamiento, y uso seguros:

**Manejo:** Use equipo protector como se describe en la Sección VIII.

**Almacenaje:** Protéjase contra daño físico y almacénese en lugar seco lejos del agua o de la humedad.

---

### Sección VIII – Medidas de Control

---

**Protección Respiratoria:** Use un respirador con capacidad para filtrar polvo aprobado por NIOSH (42 CFR 84) para protección contra el hidróxido de calcio suspendido en el aire.

**Combate de Incendios:** Aparatos respiradores auto-contenidos con careta completa operados en el modo de presión/demanda o el modo de presión-positiva.

**Ventilación:** Recinto de procesamiento cerrado o ventilación con extractor local. Use ventilación mecánica para desalojo del polvo al colector

**Pasos a tomar en caso de que el material se escape o se derrame:** Levante el polvo derramado. Evite el contacto y condiciones de desempolvado. Los derrames no deben ser drenados a aguas superficiales o drenajes. Dispóngase de acuerdo con todos los requerimientos aplicables, federales, estatales o locales.

**Guantes Protectores:** Guantes de trabajo de tipo manopla.

**Protección de Ojos:** Goggles firmemente ajustados.

**Otro Equipos Protectores :** Camisa de manga larga, pantalones largos; puede usar crema protectora en las áreas de piel expuesta.

**Prácticas Higiénicas:** Inmediatamente después de haber trabajado con cal hidratada, los trabajadores deben bañarse, en ducha con jabón y agua. Tomar las precauciones listadas según sea apropiado durante el mantenimiento y/o reparación de equipo contaminado.

Este producto no contiene ni es directamente producido con ningunas sustancias controladas depletoras de ozono, Clase I y II.

## APENDICE

### FOTOGRAFIAS DE PRUEBAS REALIZADAS EN LABORATORIO

#### APENDICE 01: Recojo de muestra de cabeza y relave en minera San Lucas



#### APENDICE 02: Inicio de trabajos en laboratorio de UNSAAC



**APENDICE 03: Chancadora de quijas de laboratorio****APENDICE 04: Material pasante por chancadora de quijas**

**APENDICE 05: Molienda en molino de bolas de laboratorio****APENDICE 06: Cuarte de mineral molido**

**APENDICE 07: Cuarteo para cálculo de densidad****APENDICE 08: Cálculo de densidad de mineral**

**APENDICE 09: Proceso de cianuración por agitación en botellas****APENDICE 10: Titulación de muestras de pulpa**

### APENDICE 11: Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA: “EXTRACCION DE ORO MEDIANTE EL PROCESO DE CIANURACION POR AGITACION EN LA MINERA ARTESANAL SAN LUCAS.”				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p><b>Problema general.</b></p> <p>¿Cómo extraer oro en la minera artesanal San Lucas usando el proceso de cianuración por agitación?</p> <p><b>Problemas específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál será la dosificación ideal de cianuro de sodio para una extracción óptima de oro?</li> <li>• ¿A qué porcentaje de sólidos se tendrá una extracción óptima de oro?</li> <li>• ¿Cuál será el pH ideal en la extracción del oro?</li> </ul>	<p><b>Objetivo general.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extraer a % óptimos el oro de la minera artesanal San Lucas mediante el proceso de cianuración por agitación.</li> </ul> <p><b>Objetivos específicos.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar la dosificación adecuada de cianuro de sodio.</li> <li>• Determinar el porcentaje de sólidos óptima para una buena extracción de oro.</li> <li>• Determinar el pH adecuado de pulpa para una extracción óptima de oro.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis general.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicando el proceso de cianuración por agitación en la minera San Lucas, se tiene una óptima extracción de oro.</li> </ul> <p><b>Hipótesis específica.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A una dosificación ideal de cianuro de sodio se tiene un buen porcentaje de extracción de oro.</li> <li>• A una cantidad óptima de porcentaje de sólidos en la pulpa, se llega a una buena extracción de oro.</li> <li>• A un pH adecuado en la pulpa se logra un buen % de extracción de oro.</li> </ul>	<p><b>Variables dependientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extracción de oro</li> </ul> <p><b>Variables independientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de cianuro de sodio.</li> <li>• Porcentaje de sólidos.</li> <li>• PH de pulpa.</li> </ul> <p><b>Variables intervinientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura ambiente</li> </ul> <p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje</li> <li>• Gramos por tonelada métrica</li> <li>• Pulgadas</li> <li>• Días</li> <li>• pH metro</li> </ul>	<p><b>Tipo de Investigación</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Nivel de Investigación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descriptivo</li> <li>• Explicativo</li> </ul> <p><b>Diseño experimental</b></p> <p>Diseño experimental 2<sup>k</sup> (2<sup>3</sup>)</p> <p><b>Población</b></p> <p>Mineral aurífero del yacimiento Cochasayhuas - minera artesanal “San Lucas”</p> <p><b>Muestra</b></p> <p>50 kg de mineral aurífero</p>