

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**APLICACIÓN DE PRUEBAS EN BOTELLAS PARA MINIMIZAR EL
CONSUMO DE CIANURO DE SODIO EN LA EXTRACCIÓN DE
ORO DE MINERAL AURÍFERO SULFURADO**

TESIS

Presentada por:

Bach. Robert Alonso Dávila Núñez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GRUHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**APLICACIÓN DE PRUEBAS EN BOTELLAS PARA
MINIMIZAR EL CONSUMO DE CIANURO DE
SODIO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO
DE MINERAL AURÍFERO
SULFURADO**

Tesis sustentada y aprobada el día 12 de diciembre de 2025, estando integrado el

Jurado Calificador por:

PRESIDENTE

: 

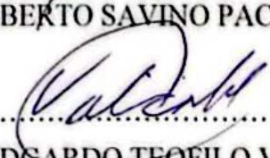
DR. TOLOMEO RAUL SOTO PEREZ

SECRETARIO

: 

DR. ALBERTO SAVINO PACHECO PACHECO

VOCAL

: 

MSC. EDGARDO TEOFILO VALDEZ CORTIJO

ACCESITARIO

: 

ING. JULIAN NIETO QUISPE

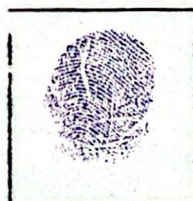
CERTIFICADO DE SIMILITUD

YO, ALBERTO SAVINO PACHECO PACHECO, en mi condición de asesor, acreditado por resolución de Facultad N° 9222-2024 FAIN/UNJBG, de la tesis titulado **"APLICACIÓN DE PRUEBAS EN BOTELLAS PARA MINIMIZAR EL CONSUMO DE GIANURO DE SODIO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO DE MINERAL AURÍFERO SULFURADO"** presentado por el Bachiller. **ROBERT ALONSO DÁVILA NUÑEZ**.

Para optar el título de Ingeniero Metalurgista, habiendo cumplido con el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido que es de 2% (2 por ciento). Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención del título profesional de Ingeniero Metalurgista, consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente documento para que continúe con los trámites respectivos para su publicación.


Firma del asesor
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco
D.N.I. 00419686




Firma del Titulante
Bach. Robert Alonso Dávila Nuñez
D.N.I. 77818362



Dedicatoria

Dedico esta investigación a mis padres como símbolo de logro, constancia y orgullo tanto para mí como para ellos, personas y familiares que en algún momento me aconsejaron y motivaron a cumplir este objetivo.

“Si he visto más lejos, es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes”

Agradecimiento

Agradecer a Dios y mis padres por el apoyo brindado para cumplir este objetivo de querer ser profesional, así como familiares y personas grandiosas que desde que inicie la carrera me ayudaron cuando lo necesite. Satisfecho por el esfuerzo dado durante años para lograr superar obstáculos de la vida y por mantener las ganas de conseguir lo que anhelo.

Contenido

Contenido	vi
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras.....	x
Resumen.....	xi
Introducción	13
Capítulo I.....	14
El problema de investigación	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Identificación y formulación del problema de investigación.....	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Hipótesis.....	19
1.4.1. Hipótesis general	19
1.4.2. Hipótesis específicas	19
1.5. Variables	19
1.5.1. Identificación de las variables	19
1.5.2. Definición conceptual de las variables	20
1.5.3. Definición operacional de las variables	21
1.5.4. Variables no consideradas	22
1.6. Limitaciones de la investigación.....	24
1.7. Descripción de las características de la investigación.....	24
Capítulo II	26
Marco teórico	26
2.1. Antecedentes del estudio.....	26
2.2. Descripción de la planta minera ubicada en la región de Arequipa.....	28

2.2.1.	Diagrama de flujo de la planta minera.	29
2.3.	Bases teóricas	31
2.3.1.	<i>El oro y sus propiedades</i>	31
2.3.2.	<i>Conminución</i>	32
2.3.3.	<i>Distribución granulométrica</i>	33
2.3.4.	<i>Grado de liberación</i>	33
2.3.5.	<i>Lixiviación</i>	35
2.3.6.	<i>Cianuración de oro</i>	35
2.3.7.	<i>Cinética de cianuración del oro</i>	37
2.3.8.	<i>Métodos de cianuración</i>	38
2.3.9.	<i>Factores que influyen a la cianuración del oro</i>	39
2.3.10.	<i>Pruebas de lixiviación en botellas</i>	41
2.4.	Definición de términos	43
	Capítulo III.....	45
	Marco metodológico	45
3.1.	Caracterización del diseño de investigación	45
3.2.	Acciones y actividades para la ejecución del proyecto	45
3.3.	Materiales e instrumentos	47
3.4.	Población y muestras de estudio	48
3.5.	Procedimiento de pruebas de lixiviación en botellas	48
3.5.1.	Descripción de secuencia de trabajo	49
3.6.	Tratamiento de datos (análisis estadístico)	51
3.6.1.	<i>Matriz de diseño experimental</i>	51
3.6.2.	<i>Análisis de oro en muestras sólidas</i>	54
	Capítulo IV.....	57
	Resultados y discusión	57
4.1.	Pruebas preliminares	57
4.1.1.	Extracción de oro	58

4.2.	Resultados	59
4.2.1.	<i>Diseño factorial completo</i>	59
4.2.2.	Análisis de varianza	61
4.2.3.	<i>Análisis de significancia de cada variable</i>	62
4.2.4.	<i>Regresión lineal</i>	65
4.2.5.	<i>Minimización de la concentración de cianuro</i>	66
4.2.6.	Optimización de respuesta con software.....	68
4.2.7.	<i>Cinética de lixiviación</i>	71
4.2.8.	<i>Condiciones de evaluación</i>	72
4.2.9.	<i>Comparación de resultados</i>	73
4.2.10.	<i>Determinación del modelo cinético</i>	76
4.3.	Discusión de resultados.....	81
4.3.1.	<i>Ajuste del modelo matemático</i>	81
4.3.2.	<i>Optimización de la respuesta</i>	81
4.3.3.	<i>Validación del objetivo general de la investigación</i>	82
	Conclusiones	83
	Recomendaciones.....	85
	Referencias bibliográficas	87
	Anexos	90
	Matriz de consistencia.....	90

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Extracción de oro en diferentes pruebas metalúrgicas</i>	16
Tabla 2	<i>Operacionalización de variables</i>	22
Tabla 3	<i>Reposición de cianuro de sodio</i>	51
Tabla 4	<i>Matriz de diseño codificado</i>	52
Tabla 5	<i>Matriz real</i>	53
Tabla 6	<i>Evaluación preliminar</i>	58
Tabla 7	<i>Porcentaje de extracción, consumo de cianuro de sodio y soda caustica</i>	59
Tabla 8	<i>Porcentaje de extracción de Au</i>	60
Tabla 9	<i>Análisis de Varianza</i>	61
Tabla 10	<i>Resumen estadístico del modelo</i>	66
Tabla 11	<i>Rangos de variables</i>	70
Tabla 12	<i>Solución según software</i>	70
Tabla 13	<i>Condiciones de prueba</i>	72
Tabla 14	<i>Evaluación bajo condiciones operativas</i>	74
Tabla 15	<i>Evaluación bajo condiciones obtenidas con software</i>	75
Tabla 16	<i>Datos para modelación bajo condiciones actuales</i>	77
Tabla 17	<i>Datos para modelación bajo condiciones sugeridas</i>	78

Índice de figuras

Figura 1 <i>Flowsheet de planta</i>	30
Figura 2 <i>Propiedades químicas del oro</i>	31
Figura 3 <i>Proceso combinado para minerales refractarios de plata-oro</i>	32
Figura 4 <i>Curva de distribución granulométrica</i>	33
Figura 5 <i>Grado de liberación de un mineral</i>	34
Figura 6 <i>Mecanismo de disolución de oro</i>	38
Figura 7 <i>Sistema de rotación de botellas para lixiviar</i>	41
Figura 8 <i>Porcentaje de extracción versus tiempo</i>	42
Figura 9 <i>Cuadro de Actividades</i>	46
Figura 10 <i>Equipo de Absorción atómica</i>	54
Figura 11 <i>Preparación de residuos para análisis</i>	55
Figura 12 <i>Diagrama de Pareto</i>	63
Figura 13 <i>Efecto de variables sobre la respuesta</i>	64
Figura 14 <i>Gráfica de contornos conc. de cianuro y tiempo</i>	67
Figura 15 <i>Gráfica de contornos conc. de cianuro y % malla -200</i>	68
Figura 16 <i>Herramienta optimizar respuesta</i>	69
Figura 17 <i>Optimizador de respuesta</i>	71
Figura 18 <i>Modelos cinéticos usados</i>	72
Figura 19 <i>Recuperación de oro vs tiempo</i>	73
Figura 20 <i>Modelamiento cinético de condiciones actuales</i>	79
Figura 21 <i>Modelamiento cinético de condiciones sugeridas</i>	80

Resumen

La presente investigación demuestra que es posible obtener recuperaciones de oro superiores al 95 % utilizando niveles más bajos de cianuro de los que actualmente emplea la planta de procesamiento ubicada en la región de Arequipa, esto representa un logro doble: por un lado, mejora la rentabilidad del proceso, y por el otro, contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado al uso de reactivos peligrosos en la minería aurífera. Los resultados iniciales mostraron que, bajo condiciones operativas de planta de 2 000 ppm de cianuro, 48 horas de agitación y 80 % de malla -200 la recuperación promedio de oro alcanzaba aproximadamente 89,63 %. Sin embargo, al aplicar un diseño factorial completo y el análisis estadístico correspondiente, se comprobó que era posible superar notablemente este valor mediante una mejor combinación de variables.

La optimización realizada con el software Minitab determinó una condición ideal de 1 600 ppm de cianuro, 45 horas de agitación y granulometría de 90 % malla - 200, con las cuales es posible alcanzar una recuperación de 96,13 % de oro, superando en 6,5 puntos porcentuales los resultados obtenidos bajo las condiciones usuales de planta y validando el modelo predictivo desarrollado con un coeficiente de determinación R^2_{ajust} de 86,58 %.

Palabras clave: Cianuro, Oro, Lixiviación, Optimización, Mineral.

ABSTRACT

This research demonstrates that it is possible to achieve gold recoveries above 95 % by using lower cyanide concentrations than those currently employed at the processing plant located in the Arequipa region. This outcome represents a double achievement: on the one hand, it improves the profitability of the process, and on the other, it contributes to the reduction of environmental impact associated with the use of hazardous reagents in gold mining. The initial results showed that, under the plant's operational conditions of 2 000 ppm cyanide, 48 hours of agitation, and 80 % -200 mesh particle size, the average gold recovery was approximately 89,63 %. However, by applying a full factorial design and the corresponding statistical analysis, it was confirmed that this value could be significantly increased through a better combination of variables.

The optimization performed using Minitab determined an ideal condition of 1 600 ppm cyanide, 45 hours of agitation, and 90 % -200 mesh, achieving a 96,13% gold recovery, which exceeds the plant's standard results by 6,5 percentage points and validates the predictive model developed, with an adjusted R^2 of 86,58 %.

Keywords: Cianuro, Oro, Lixiviación, Optimización, Mineral

Introducción

El presente trabajo busca optimizar el proceso de lixiviación de mineral aurífero perteneciente a la compañía minera ubicada en la región de Arequipa mediante pruebas de cianuración en botellas evaluando las variables concentración de cianuro, tiempo de agitación y granulometría a malla -200 para determinar cómo influyen en la recuperación de oro. El objetivo del trabajo es reducir la concentración de cianuro de sodio en la solución lixivante, principalmente por ser uno de los insumos más costosos y ambientalmente peligrosos en el procesamiento hidrometalúrgico del oro por lo que también puede considerarse como un aspecto positivo el impacto ambiental al utilizar una menor carga de cianuro para procesamiento del mineral.

En términos económicos, la disminución en el uso de cianuro en cualquier proceso convencional hidrometalúrgico de oro implica un ahorro considerable debido a que permite reducir los costos de operación; sin embargo, es necesario realizar evaluaciones metalúrgicas como las desarrolladas en el presente trabajo para determinar parámetros de trabajo que permitan disminuir el consumo de cianuro sin sacrificar los niveles de la extracción.

Capítulo I

El problema de investigación

1.1. Antecedentes

El cianuro de sodio es el reactivo más importante en el proceso de lixiviación aurífera debido a que permite acomplejar el oro para poder ser recuperado en procesos posteriores como es el caso de la recuperación de oro mediante carbón activado. Si bien, la efectividad del cianuro está ampliamente estudiado y difundido, no se puede dejar pasar por alto la denominación de compuesto químico altamente tóxico, más aún si su uso en el procesamiento de minerales auríferos se hace de manera inadecuada o excesiva.

El manual de buenas prácticas del uso de cianuro de sodio en pequeña minería escrito por Pizzorni (2021) refiere que el peligro que representa el cianuro de sodio está asociado al desprendimiento de gas de cianuro de hidrógeno HCN al reaccionar con agua o alguna solución ácida, este gas es altamente tóxico y fatal si no se toman las precauciones necesarias, la densidad menor a la del aire hace que el gas se eleve por lo que es muy peligroso especialmente en ambientes cerrados.

El uso de cianuro de sodio en la extracción de oro y plata está relacionado con la explotación de minerales de baja ley, condición que impide la aplicación de métodos basados en la gravimetría para la separación del oro por los altos costos operativos, existe registros históricos que el uso de soluciones cianuradas para la extracción de oro y plata se hace desde el año 1887, actualmente el 18 % de la producción mundial de cianuro de sodio está destinada al aprovechamiento de este compuesto para recuperar oro y plata mediante el proceso de lixiviación mediante el uso de cianuro de sodio (González, 2018).

El estudio efectuado por Huapaya et al. (2022) muestra que la optimización del consumo de cianuro de sodio permitió generar un ahorro de USD \$ 706 165,00 en cinco meses de operación en la mina La Arena al reducir la de 7 a 4 toneladas el consumo diario de cianuro, esta reducción permitió a demás, manejar soluciones de percolación con concentraciones menores a 5 ppm por lo que la detoxificación de estas soluciones en épocas de lluvia resultaba ser más manejable.

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en la planta de beneficio ubicada en el departamento de Arequipa, la planta de procesamiento de mineral aurífero tiene una capacidad instalada de 140 TMSD y cuenta con los circuitos enseriados de chancado, molienda, cianuración, desorción, electrodeposición, regeneración térmica de carbón activado, fundición y disposición de relaves, en la planta en mención las soluciones desgastadas provenientes del circuito de electrodeposición son acondicionadas para mantener la

fuerza de cianuro y recirculadas hacia el circuito de lixiviación por lo que no se generan efluentes que pudieran comprometer el medio ambiente.

Tabla 1

Extracción de oro en diferentes pruebas metalúrgicas

Nº	CÓDIGO	Ley de cabeza Au oz/tc	Extracción de Au %	Consumo Cianuro kg/t	Consumo Soda kg/t	Tiempo Agitación h
1	BY-445	0,578	87,54	9,183	1,667	48
2	C-1205	0,475	49,21	20,85	1,667	48
3	CY-4191	0,196	86,91	2,133	1,667	48
4	CY-4192	0,280	86,64	1,683	1,667	48
5	CY-4195	1,142	88,81	9,433	1,667	48

Nota: Datos tomados de reportes internos de consumo de cianuro en la empresa en mención, se evaluó diferentes tipos de muestras.

La Tabla 1 presenta un resumen de las evaluaciones metalúrgicas realizadas en diferentes momentos a los tres tipos de mineral que ingresan a la planta, todas con características geológicas diferentes y evaluadas en las mismas condiciones operativas bajo el test de cianuración en botellas. Se destaca un alto consumo de cianuro de sodio en la muestra del mineral sulfurado de oro, identificada con el código CY-4195. Este mineral presenta una ley de cabeza de oro de 1,084 oz/tc (onzas por tonelada corta) y una extracción de oro de 88,81 %, valor significativamente superior al de otras muestras; sin embargo, es observable que requiere un mayor consumo de cianuro para alcanzar dicha extracción.

1.2. Identificación y formulación del problema de investigación

La relevancia del uso de cianuro de sodio en la hidrometalurgia del oro ha sido ampliamente documentada, y en la actualidad, se considera el agente acomplejante más utilizado en la industria global de este sector. Asimismo, los riesgos potenciales asociados con el uso de cianuro en el procesamiento de minerales auríferos han sido objeto de rigurosos estudios, con el objetivo de prevenir condiciones inseguras que podrían afectar la salud de las personas involucradas en las diversas actividades relacionadas con la extracción hidrometalúrgica de menas auríferas.

Los datos mostrados en la Tabla 1 y Tabla 6 establecen la posibilidad de poder optimizar el consumo de cianuro de sodio en la operación de la planta minera estudiada, se plantea el siguiente cuestionamiento a fin de establecer la problemática que, mediante el desarrollo del presente trabajo, se intentará dar solución:

¿Es posible reducir el consumo de cianuro de sodio utilizado en el procesamiento de mineral aurífero sulfurado mediante la aplicación de pruebas en botellas sin impactar significativamente la extracción de oro?

La absolución de esta problemática permitirá establecer condiciones operativas favorables que optimizarán el consumo de cianuro de sodio. Se espera que esta reducción pueda afectar negativamente la extracción de oro, por lo que la

evaluación se realizará en conjunto con otras variables involucradas, con el objetivo de minimizar el impacto de manera efectiva.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la concentración de cianuro de sodio que permita minimizar su consumo en la recuperación de oro en mineral aurífero sulfurado mediante lixiviación en botellas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de las variables concentración de cianuro de sodio, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la extracción de oro.
- Determinar el efecto de las interacciones de concentración de cianuro de sodio, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la extracción de oro.
- Determinar el modelo cinético que describe la disolución aurífera del mineral estudiado.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- Es posible obtener un valor de extracción de oro aceptable disminuyendo el consumo de cianuro de sodio mediante la aplicación de lixiviación en botellas de mineral aurífero sulfurado.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Las variables concentración de cianuro de sodio, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 tienen incidencia significativa en la extracción de oro en el proceso de cianuración del mineral sulfurado.
- Existe una interacción significativa entre las variables concentración de cianuro de sodio, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la extracción de oro.
- El análisis de oro disuelto obtenido en las pruebas mediante lixiviación en botellas permitirá describir el tipo de modelo cinético que describe la disolución aurífera del mineral.

1.5. Variables

1.5.1. Identificación de las variables

- Variable dependiente (VD):
 - a. Extracción de oro (%)

- Variables independientes (VI):
 - a. Concentración de cianuro de sodio (ppm)
 - b. Tiempo de agitación (horas)
 - c. Porcentaje de malla -200

1.5.2. Definición conceptual de las variables

- Extracción de oro: Es definido como la cantidad de oro extraído en un determinado tiempo expresado en porcentaje referente al oro total presente en el mineral antes de iniciar la lixiviación. De acuerdo con la mayor plataforma de inversión de oro, el proceso más importante para la extracción de oro es la cianuración, principalmente por que el cianuro de sodio permite que el oro entre en solución (BullionVault, 2014).
- Concentración de cianuro de sodio: Es la cantidad de cianuro de sodio utilizado para la extracción del oro, el cianuro es disuelto en un determinado volumen también conocido como fuerza de cianuro expresado en ppm (partes por millón). De acuerdo con el texto guía para la lixiviación de oro y plata de Botz (2024), el suministro de cianuro en operaciones de lixiviación de oro y plata es exclusivamente con cianuro de sodio.
- Tiempo de agitación: Se refiere al tiempo de contacto mediante agitación en botellas del mineral con el agente lixivante, en este caso, el cianuro de sodio. Su valor es expresado en horas desde el momento

que el mineral y el cianuro son agitados en la mesa de rodillos. El portal 911Metallurgist (2017) infiere en su artículo Introducción a la Lixiviación de Oro y Plata a la agitación como el método mecánico utilizado en las operaciones extractivas de oro para mezclar la pulpa con la solución de cianuro a fin de permitir las reacciones de equilibrio de la disolución del oro.

- Porcentaje de malla -200: Representa la cantidad de mineral fino tamizado menor a malla -200 (75 micrones) expresado en porcentaje de malla pasante, esta variable expresa indirectamente el grado de moliendabilidad del mineral que ingresa a lixiviación. La cantidad de material pasante representa el tamaño de partícula que es inferior al tamaño de malla utilizado para separar las partículas de mineral, este procedimiento manual es aplicado para el análisis granulométrico (UCA, 2007).

1.5.3. Definición operacional de las variables

La siguiente Tabla relaciona la definición conceptual de las variables y la forma en la que estas serán medidas:

Tabla 2*Operacionalización de variables*

variable	dimensión	indicador
VI		
Concentración de cianuro de sodio	Cantidad de NaCN en solución	ppm
Tiempo de agitación	Tiempo de lixiviación del mineral	horas
Porcentaje de malla	Porcentaje pasante de malla 200	%
VD		
Extracción de oro	cantidad de oro extraído	% de recuperación

Nota. VD: Variable dependiente; VI: variable independiente.

1.5.4. Variables no consideradas

- Temperatura: La temperatura es un factor relevante en el proceso de lixiviación aurífera, ya que puede influir en la solubilidad del cianuro y la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, no se incluyó debido a que el proceso en la planta de beneficio se lleva a condiciones ambientales, lo que permite su omisión para centrarse en las variables más directamente controlables y de mayor impacto (como concentración de cianuro, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200).

- pH: Aunque el control de pH es crucial para evitar la formación de cianuro de hidrógeno (HCN), además que permite garantizar una lixiviación eficiente, se asumió que el control adecuado de pH estaba implícito en el proceso operacional, ya que se mantiene dentro de un rango específico (10,5 a 12). Dado que la investigación se enfoca en la optimización de la concentración de cianuro, el pH fue considerado una constante operacional controlada por la planta.
- Tipo de mineral: La naturaleza del tipo de mineral es una variable con incidencia en la extracción de oro. Sin embargo, en el presente estudio se centró en un solo tipo de mineral (sulfurado), es decir, se mantuvo constante las características geológicas diversas, razón por la cual se simplifica el impacto del tipo de mineral.
- Tamaño de partícula: Aunque el tamaño de partícula es una variable significativa que influye en la lixiviación, se optó por la variable porcentaje de malla -200, que indirectamente refleja el tamaño de las partículas más finas que tienen un impacto considerable en la disolución del oro. Incluir una variable adicional sobre el tamaño de partícula no habría aportado información toda vez que el control metalúrgico operativo en planta se realiza sobre este tamaño de partícula en particular.

1.6. Limitaciones de la investigación

El desarrollo de la presente investigación tiene como limitantes los siguientes aspectos:

- **Riesgos a la salud:** El proceso de cianuración de oro involucra riesgos que pueden tener consecuencias lamentables en la salud de las personas comprometidas en el desarrollo de las pruebas si no se tiene el control adecuado de pH, en ese sentido se adoptaron todas las medidas de seguridad necesarias como el uso adecuado de equipo de protección personal (EPP) y rango de pH superiores a 10,5 para la preparación del cianuro de sodio.
- **Permisos y normativas:** Si bien la empresa en mención dispuso de sus ambientes y equipos para la ejecución de las pruebas, quedarán en reserva el nombre de algunos equipos y datos operativos alcanzados en el proceso por cuestiones de confidencialidad.
- **Los resultados obtenidos** deben ser considerados solo como datos referenciales para otras operaciones mineras debido a las propiedades intrínsecas de cada yacimiento.

1.7. Descripción de las características de la investigación

La investigación desarrollada en la presente tesis tiene naturaleza cuantitativa debido a que es necesario la experimentación para la obtención de

resultados medibles, tiene como línea de investigación disminuir el consumo de cianuro de sodio en el proceso de extracción de oro. Al término de las evaluaciones se desarrolló un modelo matemático capaz de describir el proceso de cianuración en términos de las variables utilizadas, la aplicación de un diseño factorial en el desarrollo de las pruebas respalda el rigor estadístico necesario para la construcción del modelo.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes del estudio

Para maximizar la recuperación de oro en procesos de lixiviación, es esencial encontrar la dosificación ideal de cianuro. El proceso de optimización reduce el consumo de reactivos, aumenta la rentabilidad y reduce el impacto ambiental. La dosificación de cianuro es un factor crucial en el proceso de lixiviación intensiva, ya que afecta directamente la recuperación de metales preciosos. Como lo demuestra, Chavez (2014) en su investigación donde determina la dosificación adecuada del consumo de cianuro a partir de pruebas de lixiviación por botellas. La autora investiga que la ampliación de la planta de lixiviación intensiva en reactores, también conocida como ILR, demandará un mayor requerimiento de cianuro de sodio. Además, las leyes de oro en el concentrado han disminuido a un promedio de 25 gramos por tonelada en oro. La concentración actual de cianuro es de 187 kilogramos de cianuro por tonelada de concentrado, parámetro que es utilizado desde sus inicios, dosificando 10,5 m³ de cianuro al 16,0 %, por lote del proceso. La autora concluye que la dosificación óptima de cianuro para la recuperación de oro es de 168,42 kg/t y que la mínima dosificación es de 70 kg/t para una recuperación del 91 % de oro.

Por otro lado, Figueredo et al. (2011) evalúan los parámetros a nivel de laboratorio de muestras minerales investigando su comportamiento frente a la tecnología de lixiviación con cianuro de sodio empleando ensayos de cianuración en botellas por agitación. Los autores analizan disoluciones de oro de menas oxidadas de baja ley (1,3-2,0 g/t). Los parámetros iniciales que consideraron las pruebas fueron el grado de molienda de 90 % -0,074mm, y una relación L/S de 2/1, variando la concentración de NaCN entre 500 ppm y 2 000 ppm. El análisis granulométrico reveló que en la muestra prevalece la fracción -0,074 mm en un rango entre 50 - 58 % en peso, y el oro se encuentra en un 70 % entre las fracciones -1,0+0,074 mm. Según los estudios, la muestra estudiada respondió al proceso de cianuración, lo que resultó en una extracción de oro del 70 %.

Los autores Yushandiana et al. (2023) investigaron mediante ensayos de agitación en frascos o botellas, la influencia de distintas concentraciones de cianuro de sodio (600 ppm, 700 ppm, 800 ppm) en la extracción de oro y plata de un mineral de la planta PT Indo Muro Kencana, Indonesia. Los resultados mostraron que a 600 ppm se obtuvo una recuperación de oro cercana al 96,5 % y de plata alrededor del 91,4 %, mientras que incrementos a 700 ppm y 800 ppm apenas mejoraron la recuperación, pero sí aumentaron ligeramente el consumo acumulado de cianuro de sodio (2,88 g para 600 ppm vs 2,97 g y 3,11 g para las concentraciones mayores). Además, el análisis cinético indicó que el mecanismo de control fue difusión de producto (modelo núcleo-hueco). Este trabajo aporta evidencia de que existe un

nivel óptimo de dosificación de cianuro de sodio por encima del cual no se producen mejoras significativas en recuperación, lo que refuerza la necesidad de optimizar la dosificación para reducir consumo sin sacrificar recuperación.

Han et al. (2024) evaluaron la lixiviación cianurada de minerales auríferos de baja ley, para ello utilizaron la dosificación de cianuro (KCN) en el rango de 1 kg/t hasta 5 kg/t en mineral molido a $-0,074$ mm (92,53 % liberación) bajo condiciones controladas (porcentaje de sólidos de 28,57 %, pH 10,5, temperatura 25 °C, agitación 1 500 RPM). Se encontró que al aumentar la dosificación de 1 kg/t a 4 kg/t la tasa de lixiviación de oro creció de 57,27 % a 90,91 %, con 5 kg/t la tasa llegó a 91,82 %.

Además, los autores demostraron que al usar un agente auxiliar de lixiviación juntamente con cianuro (0,6 kg/t) se logró una lixiviación del 93,20 % reduciendo la dosificación de KCN a 2 kg/t, lo que evidencia que se puede mantener alta recuperación con una menor dosificación, optimizando así el consumo del reactivo.

2.2. Descripción de la planta minera ubicada en la región de Arequipa

La planta acopiadora pertenece al sector de pequeña minería, está ubicada en el distrito de Vitor, provincia y departamento de Arequipa, fue fundada en 2022, para sus operaciones emplea 90 trabajadores fomentando así la responsabilidad, trabajo colectivo y el cumplimiento de la gestión ambiental sostenible y normativa

legal. La planta procesa mineral de diferentes yacimientos circundantes, siendo su principal fuente el mineral extraído por mineros artesanales de la región.

2.2.1. Diagrama de flujo de la planta minera.

La Figura 1 describe una planta CIP (*carbon in pulp*) para el procesamiento de mineral aurífero, destacan las etapas de chancado primario donde se utiliza una chancadora de quijada de 16" x 24", posteriormente el mineral es enviado a una segunda etapa de chancado para lo cual utiliza una chancadora cónica tipo short head de 2' de diámetro, para el traslado del mineral en el circuito de chancado y hacia la etapa de molienda, se utiliza fajas transportadoras y volquetes de 20 t. El mineral es pulverizado en un molino de bolas de 6' x 10' donde también conjuntamente con el mineral se ingresa las soluciones de hidróxido de sodio y cianuro de sodio a fin de dar inicio a la disolución del oro asegurando el pH de trabajo, posterior a la clasificación efectuada por un hidrociclón la pulpa es ingresada a la etapa de lixiviación por agitación, donde el contacto sucesivo en tres tanques carboneros garantiza la adsorción del contenido metálico valioso, la solución enriquecida es derivada hacia la etapa de elución para posteriormente ser electrodepositada y refinada mediante fundición obteniendo una barra de 95 % de pureza de oro. La pulpa con mineral empobrecido posterior a la etapa de lixiviación es derivada hacia una poza relavera de donde se recupera la solución barren que por su contenido de cianuro libre es enviada hacia la etapa de molienda para iniciar nuevamente el proceso de lixiviación.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. El oro y sus propiedades

El oro es un elemento químico apreciado por su belleza y utilidad. Presenta densidad de 19,42 g/cm³, punto de fusión de 1 346,15 K (1 073 °C), resistente a la corrosión y oxidación, no magnético, buena conductibilidad eléctrica y térmica, entre otros. Por otro lado, al realizar una preparación con un ácido oxidante se disuelve. Además, presenta otras propiedades conforme a la Figura 2. Entre sus principales minerales se encuentran: Calaverita (con un promedio de 56,44 % de telurio y 43,56 % de oro), silvanita (teluriuro de plata y oro) y electrum (relación de 1:4 de oro y plata). Asimismo, casi todo el oro que se encuentre en su forma natural este asociado, en su mayoría, con plata (Soto, 2021).

Figura 2

Propiedades químicas del oro

Propiedades químicas	Reactivos y características
No es soluble en:	Fe ₂ (SO ₄) ₃ , HCl, FeCl ₃
Soluble en:	Agua regia, cloruros y con MnO ₂
Oxidación:	No se oxida a temperatura ordinaria
Forma aleación con:	La mayor parte de los metales
No forma aleación con:	El azufre

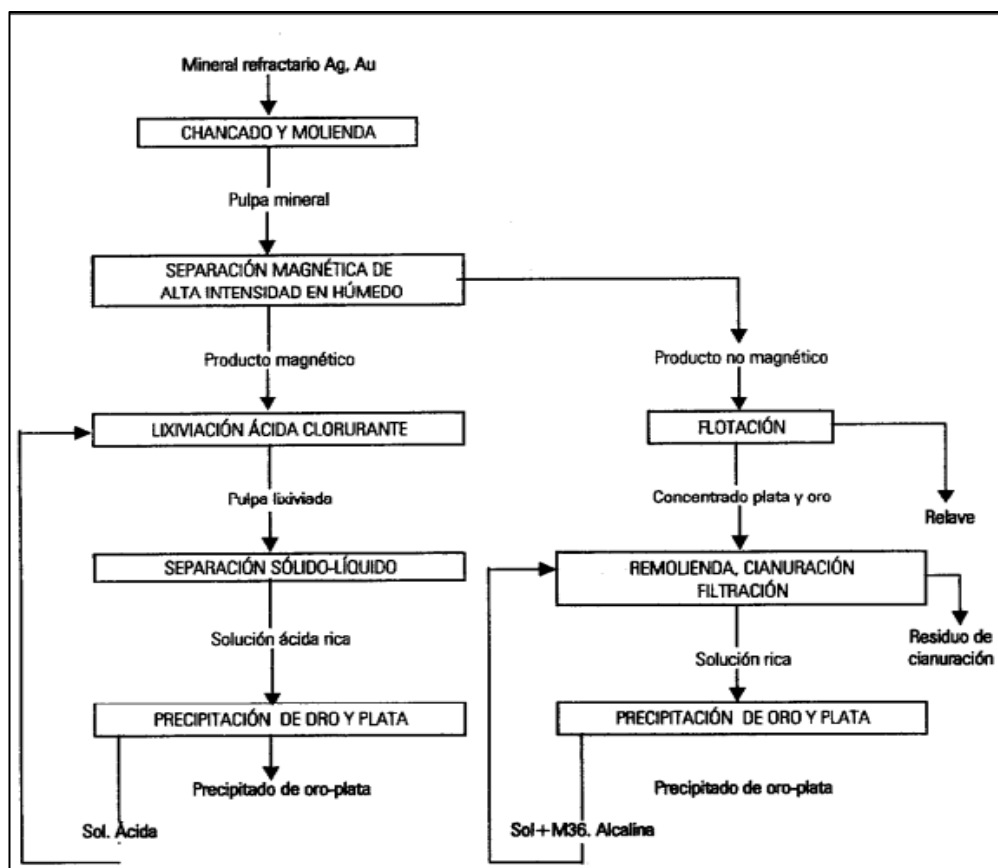
Nota. Tomado de “Estudio de recuperación de oro de minerales aluviales presente en Cerro Caldeiro-Pucamarca MINSUR”, por Flores, 2022 (content (unjbg.edu.pe)).

2.3.2. Conminución

La conminución es el proceso físico mecánico de reducción del tamaño de los minerales, consta de las etapas de chancado y molienda. Siendo la molienda la preparación mecánica final de los minerales. Para este fin, se utilizan cilindros rotativos para reducir las rocas y obtener un producto fino con una granulometría alrededor de P80 (75 micrómetros). Para este fin se emplea fuerzas de presión, impacto y abrasión (Pérez, 2003).

Figura 3

Proceso combinado para minerales refractarios de plata-oro



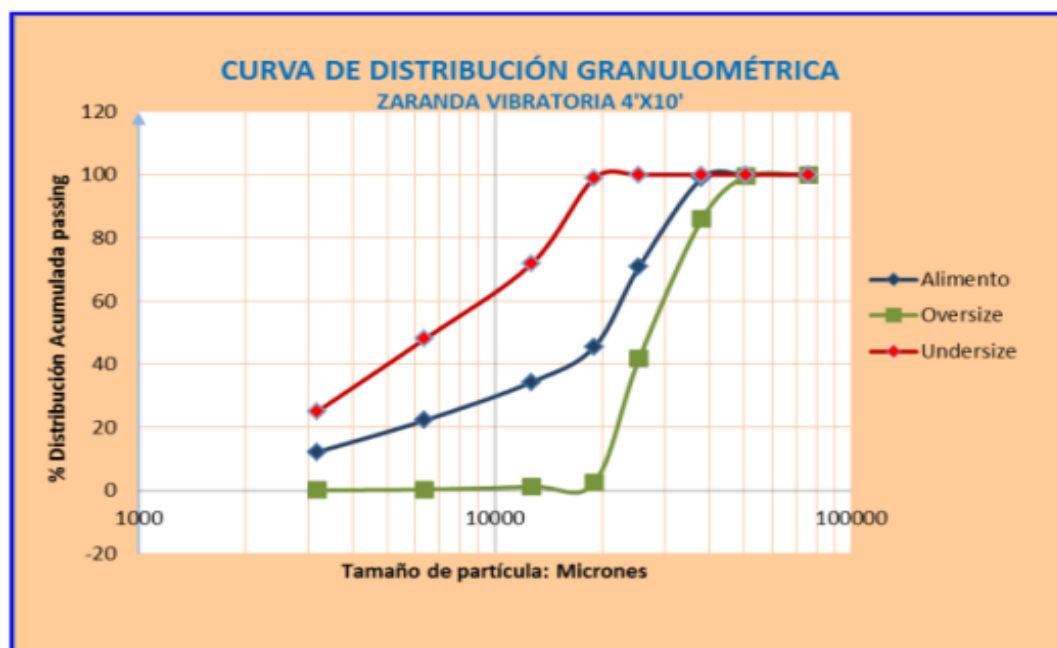
Nota. Tomado de https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/367/6/G-006-Boletin_Beneficio_economico_minerales_auriferos.pdf, por INGEMMET, 2003.

2.3.3. Distribución granulométrica

En el proceso físico de molienda, se obtiene una granulometría adecuada para el proceso de agitación en botellas (entre el 70 % a 80 % - 200 mallas). Este análisis se obtiene por la distribución de los tamaños de los minerales. La finalidad de la granulometría del mineral es medir los grados de liberación; es decir, dado la variabilidad de los tamaños de las partículas minerales es necesario cuantificar el conjunto del tamaño (Saravia, 2018).

Figura 4

Curva de distribución granulométrica



Nota. Tomado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a9390a08-e197-45c9-a871-b5a38010789f/content>, por Saravia, 2018.

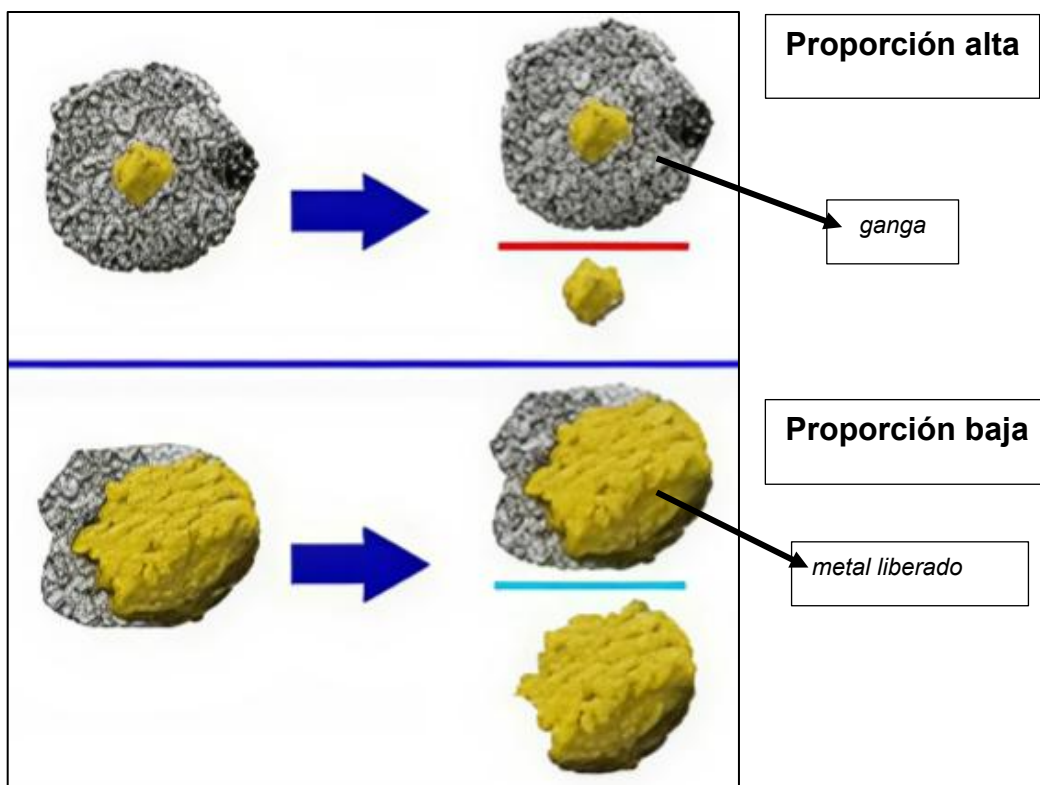
2.3.4. Grado de liberación

El grado de liberación, en el análisis de granulometría, es un indicador de la proporción de partículas minerales. Indica en que malla se ha liberado del material

circundante y se han expuesto a la superficie. Es una medida importante para evaluar la eficiencia de los procesos de trituración y molienda en la industria minera. Se utiliza para describir la proporción de partículas libres de mineral respecto a la cantidad total. Las proporciones de tamaño altas indican una baja liberación y las proporciones de pequeños tamaños de partículas indican alta liberación (Salazar, 2018).

Figura 5

Grado de liberación de un mineral



Nota. Proporción de metal puro con relación a la cantidad total del mineral presente en la mena, Tomado de https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3859/BORRADO_R%20DE%20TESIS%20-%20OMAR%2011-11-2019.pdf?sequence=1, por Guzmán, 2016.

2.3.5. Lixiviación

La lixiviación, es un proceso hidrometalúrgico a partir de la disolución de metales preciosos como oro, plata, cobre, en medios acuosos de cianuro alcalinos o de ácido sulfúrico. Esto permite conseguir precipitaciones por electrolisis o cementación. Para el oro se caracteriza por la acción selectiva que presenta el cianuro respecto a los metales preciosos donde el ion CN^- es el principio activo (Romero, 2020).

2.3.6. Cianuración de oro

El proceso de obtención de oro por cianuración se ha empleado durante más de un siglo y es eficaz incluso en minerales de baja ley; no obstante, esta eficiencia disminuye por la asociación del oro con otros metales básicos como el cobre. De forma general, el cianuro de sodio es empleado como un agente lixivante para la obtención del oro. El oro es disuelto en una solución de cianuro de sodio donde el oxígeno del medio ambiente actúa como agente oxidante y el ion CN^- como agente complejante. Esto permite que el oro se disuelva en la solución acuosa diluida de cianuro de sodio (Salinas et al., 2004).

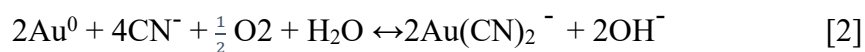
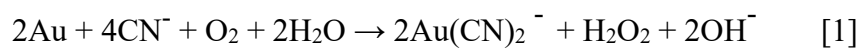
Para obtener oro, los minerales pasan por los siguientes procesos fisicoquímicos.

- Molienda: los minerales sufren un proceso de conminación hasta obtener un polvo fino.

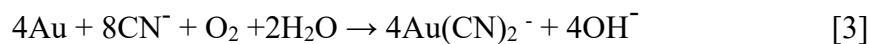
- Lixiviación: el polvo molido se mezcla con una solución de cianuro de sodio.
- Separación: el oro se separa de la solución por métodos con zinc o carbón activado.
- Recuperación: el oro es recuperado

Para este fin, se utiliza una solución débil de cianuro de sodio (NaCN) de 100-500 ppm ocurriendo las siguientes reacciones químicas.

Ecuación de Boonstar:



Ecuación de Elsner:



De la Ecuación 1 y 2, se puede entender que para la obtención de 2 moles de oro son necesarios 4 moles de cianuro y 1 mol de oxígeno.

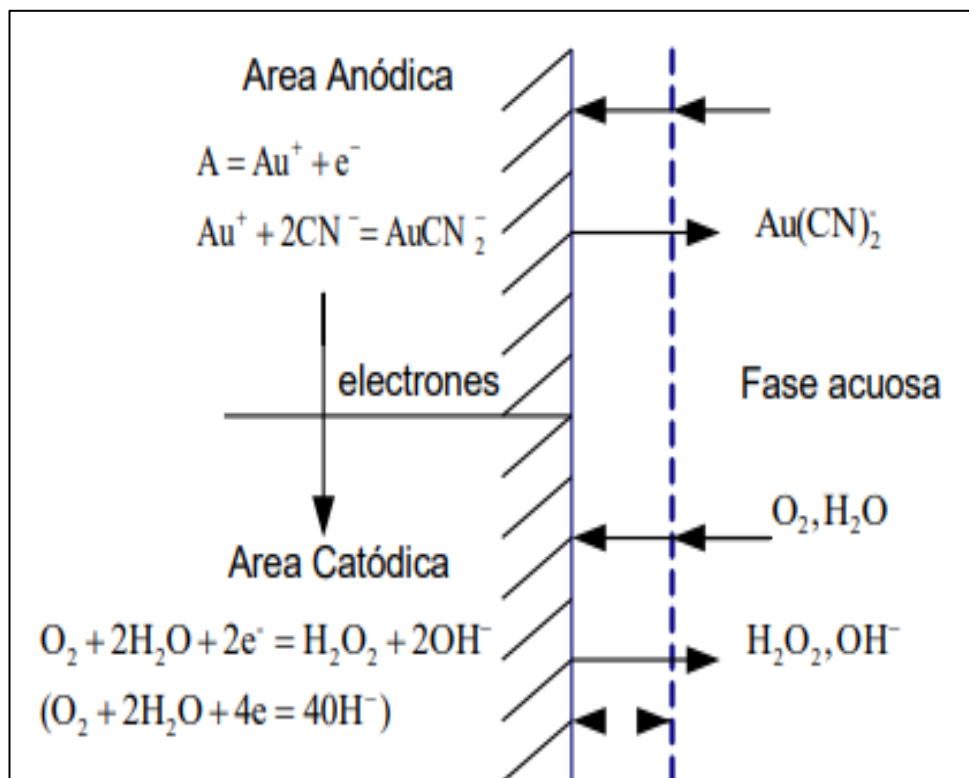
2.3.7. Cinética de cianuración del oro

Ramirez (2016) menciona que la cianuración del oro es un proceso hidrometalúrgico para la extracción de este metal precioso. Los estudios muestran que cuanto más largo sea el tiempo de recuperación de los minerales, que contienen oro, por cianuración implicará una mayor capacidad instalada de tanques para lixiviación. Esto involucraría un mayor coste operativo para las empresas. Por lo que, el tiempo normal, actualmente, oscila en un promedio de 10 a 72 horas.

Por otro lado, la disolución del oro está sujeta a la transferencia de masa (difusión) del oxígeno presente y los aniones de cianuro por medio de la capa límite de las interfaces sólidos-líquidos (Figura 6).

Figura 6

Mecanismo de disolución de oro



Nota. Tomado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f65aa29f-c058-4c71-be63-9709003556de/content>, por Ramírez, 2016.

2.3.8. Métodos de cianuración

Pino (2014) menciona que existen diversos métodos de cianuración que se emplea en la industria minera. La finalidad es la obtención de oro a partir de la conminución de minerales. Entre ellas tenemos:

A nivel de laboratorio

- Cianuración en botellas: La cianuración en botellas es una técnica para estimar la recuperación de oro. Es el método práctico y económico para estudios a niveles de escala.
- Cianuración en columna: Este método emplea mineral triturado cargados en columnas y que se percolan con una solución de cianuro.

A nivel industrial

- Cianuración en PAD: Proceso que combina lixiviación en circuitos cerrados.
- Cianuración por agitación: Proceso que implica la lixiviación del oro que contiene una solución de cianuro en tanques agitados.

2.3.9. Factores que influyen a la cianuración del oro

Vilca (2018) menciona que la obtención del oro es un proceso fisicoquímico complejo y que depende de las interacciones de diversos factores o variables que influyen en la eficiencia de su recuperación, entre ellas tenemos:

- La concentración de cianuro: Debe ser suficiente para disolver el oro sin generar excesos, un exceso de cianuro involucra pérdidas económicas.

- pH o alcalinidad: pH adecuado facilita la formación del complejo aurocianuro, además evita que se forme ácido cianhídrico en mayores cantidades siendo un riesgo para la salud.
- Tiempo de cianuración: El tiempo de contacto entre el mineral y la solución de cianuro debe lograr la disolución completa del oro, normalmente a mayor tiempo de cianuración mayor recuperación se obtiene.
- Tamaño de partícula: Un tamaño de partículas adecuada permite un mayor contacto de la superficie del mineral con la solución, por ello se trabaja como mínimo a un 80% pasante malla 200 para una mejor liberación del oro.
- Agitación: La agitación permite un buen contacto de la solución lixivante con el mineral logrando acelerar la disolución del oro.
- Concentración de oxígeno: Una baja concentración de oxígeno disolverá el oro muy lentamente, se necesita de oxígeno para disolver y oxidar el oro de manera rápida.
- Cianicidas: Son sustancias que descomponen el cianuro y no contribuyen a la disolución del oro.

2.3.10. Pruebas de lixiviación en botellas

Valdivia (2018) menciona que el método de cianuración en botellas es la forma de obtención a escala y sirve para estimar cuantitativamente la recuperación de oro. Además, permite registrar el consumo promedio de los reactivos; por ejemplo, NaCN o CaO y los tiempos de los procesos fisicoquímicos.

Figura 7

Sistema de rotación de botellas para lixiviar



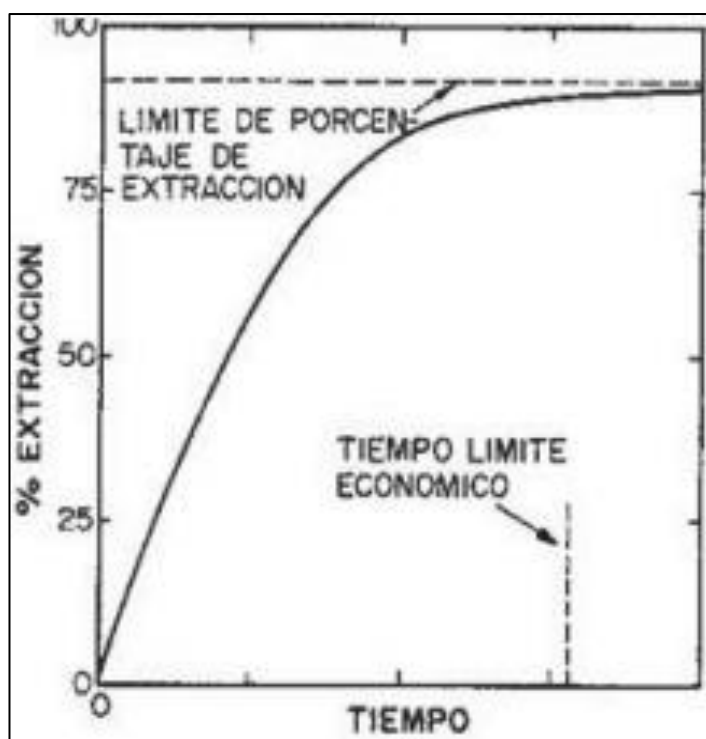
Nota. Tomado de <https://www.minperu.com/index.php?modulo=publicaciones&id=8&ide=58>, por MINPERU, 2024.

Por otro lado, el nombre de pruebas de botellas se deriva por el uso de recipientes en forma de botellas, que presentan la característica de emplear hasta 1 000 gramos de mineral y 33 % de sólidos. Este recipiente hermético se coloca sobre

una máquina de rodillos (ver Figura 7) con una velocidad promedio de 55 revoluciones por minuto (rpm). Parte del procedimiento, es la medición y regulación del pH de la pulpa del mineral pudiéndose emplear cal para restablecer el pH alcalino (Córdova, 2019).

Figura 8

Porcentaje de extracción versus tiempo



Nota. La parte asíntota de la curva indica que el porcentaje de extracción es mínimo, la intersección de esta curva con la proyección del tiempo límite refiere al punto donde la extracción es rentable. Tomado de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6146/253_T20200406_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y, por Cáceres, 2014.

Romero (2020) menciona que el tiempo de lixiviación en botella, empleando cualquier tipo reactivo lixivante, llega a una línea de tiempo límite de porcentaje de extracción, donde si el tiempo de lixiviación excede al tiempo límite económico

ya no resulta rentable continuar con el proceso, ya que la línea de extracción se convertirá en una pendiente negativa y la extracción será mínima (ver Figura 8).

2.4. Definición de términos

- Velocidad de disolución: Esta velocidad en los metales preciosos dependen del área superficial del metal en contacto con la fase líquida, velocidad de agitación de la pulpa y solución cianurante.
- Oxígeno: Este compuesto es introducido a la solución de cianuro de sodio por inyección directa de aire al tanque.
- Porcentaje de finos: Cuando el porcentaje de finos es mayor a 20 % del total conlleva que los finos tienden a juntarse. Esto dificulta el paso de la solución de cianuro. Requiriendo un tratamiento de curado con cemento o cal o una mezcla de ambos, para una mejor percolación.
- Concentración de cianuro: El histórico utilizado en planta sobre esta variable da cuenta el rango de concentración utilizado entre 1 500 a 2 100 ppm.
- pH y alcalinidad: El hidróxido de sodio evita las pérdidas de cianuro por hidrólisis. Además, previene las pérdidas de cianuro de por efectos del CO₂ del medio ambiente.

- Temperatura: Las temperaturas por encima de 85°C presentan pérdidas por descomposición del cianuro de sodio, motivo por el cual esta variable es desestimada, las pruebas serán desarrolladas a temperatura ambiente.

Capítulo III

Marco metodológico

3.1. Caracterización del diseño de investigación

El presente trabajo es clasificado como investigación cuantitativa experimental debido a que mediante el desarrollo de experimentos se intentará dar cumplimiento a las hipótesis planteadas, sobre el desarrollo de estas premisas se intenta generar nuevos conocimientos sobre el procesamiento de mineral aurífero mediante la cianuración en botellas.

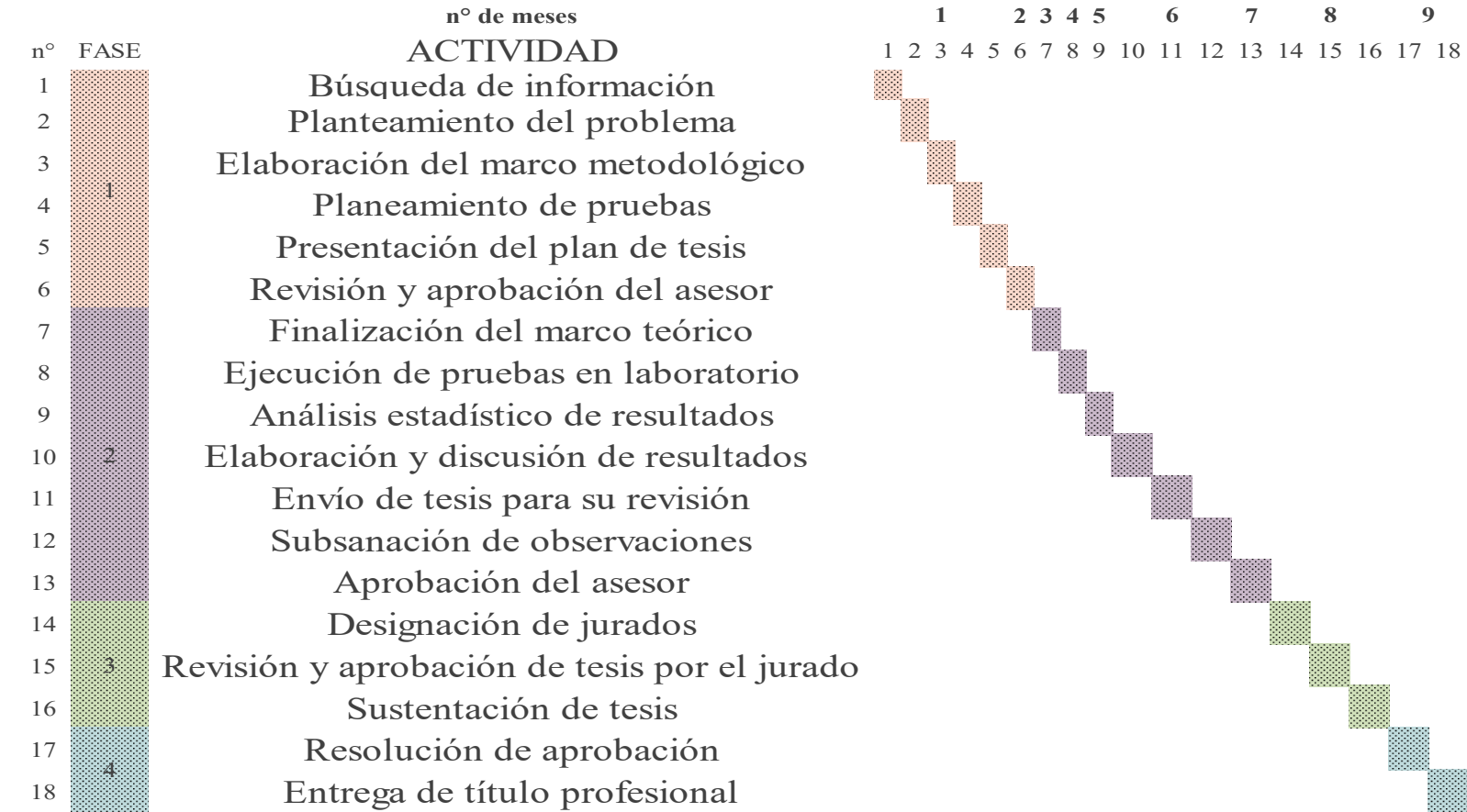
El nivel de investigación al que se pretende es descriptivo correlacional, la descripción de las características de las variables permitirá identificar el grado de correlación de las variables propuestas en base a la recolección de datos de forma longitudinal, es decir que se tomaron mediciones en diferentes momentos.

3.2. Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

El trabajo de investigación contempla un periodo de 9 meses, las actividades están divididas en cuatro fases. La primera fase consiste en recopilar información, establecer pruebas, revisar y proponer un plan de pruebas. La segunda fase consiste en la elaboración de la tesis; es decir, la adquisición de materiales, ejecución de pruebas e interpretación de los resultados. La tercera fase consiste en la presentación formal de la tesis a los jurados y su posterior subsanación para finalmente sustentar el trabajo de investigación, la fase 4 corresponde a los trámites administrativos para la obtención del título profesional.

Figura 9

Cuadro de Actividades



Nota. La figura presenta las actividades a realizar para optar el título profesional.

3.3. Materiales e instrumentos

- Materiales
 - a. Mineral aurífero sulfurado molido.
 - b. Cianuro de sodio en polvo, pureza 98 %
 - c. Soda caustica en sólido, pureza 98 %
 - d. Yoduro de potasio en solución al 5 %
 - e. Nitrato de plata en solución al 0,433 %
- Instrumentos
 - a. Botella damajuana de 3 litros: Recipiente de vidrio donde se lleva a cabo la lixiviación.
 - b. Mesa de rodillos de 3 niveles: Utilizado para agitar el mineral y la solución lixivante mediante el giro de las botellas.
 - c. Instrumentos de análisis: Se utilizará un espectrofotómetro de absorción atómica AAS (Atomic Absorption Spectrometry) de marca Varian para medir la concentración de oro en la solución de lixiviación.
 - d. Pulverizadora de anillos marca TM Andina S.A.C: Utilizado para pulverizar la muestra en seco a diferentes tamaños.

- e. Horno eléctrico de secado
- f. Equipo de tamizaje Ro-Tap marca Advantech
- g. Tamices de marca Taylor
- h. Balanza analítica marca Eppendorf
- i. Pipeta volumétrica
- j. Bureta
- k. Vaso precipitado

3.4. Población y muestras de estudio

La población y la muestra en esta investigación quedan supeditadas a la muestra que será proporcionada por la empresa en mención, es preciso señalar que la empresa es ajena al desarrollo y conclusiones de la presente tesis. En ese sentido se indica como muestreo no probabilístico la obtención de la muestra para el desarrollo de los experimentos.

3.5. Procedimiento de pruebas de lixiviación en botellas

Se establece los siguientes lineamientos para la correcta ejecución de las pruebas, se hace mención especial en la manipulación y adecuamiento del pH alcalino de las soluciones de trabajo para evitar la formación del gas venenoso conocido como ácido cianhídrico.

3.5.1. Descripción de secuencia de trabajo

- Realizar el muestreo de 300 g para cada prueba metalúrgica ajustando el tiempo de pulverizado al porcentaje de malla -200 que se requiere.
- Una vez molida la muestra registrar en la tabla de control de pruebas metalúrgicas el código, tiempo de agitación, % malla -200, y el número de botella asignado a cada prueba.
- Añadir a la botella damajuana 600 ml de agua industrial.
- Pesar 300 g de mineral con una granulometría entre el (80-90 %) en malla -200 y agregar a la botella, a continuación, se deberá agitar la mezcla de agua y mineral hasta que esta esté homogénea.
- Agregar a la botella 0,5 g de soda cáustica, y nuevamente agitar la mezcla.
- Medir pH de la mezcla, debe estar entre 11 y 12, si la pulpa no llega al parámetro indicado se debe agregar 0,1 g de soda cáustica sucesivamente hasta llegar a obtener el pH requerido, anotar el NaOH añadido en la tabla de control de pruebas metalúrgicas.
- Una vez que la mezcla se encuentra con el pH adecuado, para preparar una prueba metalúrgica con concentración de 1 000, 1 500 y 2 000 ppm se debe pesar 0,6, 0,9 y 1,2 g de cianuro de sodio inicial respectivamente y añadir a la botella.

- En cada horario de titulación se deberá anotar el gasto de nitrato de plata y agregar cianuro de sodio en gramos según lo que indique la Tabla de reposición correspondiente a cada concentración a usar.
- Durante el periodo de evaluación de prueba tomar una muestra representativa de solución ya antes sedimentada para análisis de oro vía absorción atómica, si se quiere evaluar cinética de disolución de oro.
- Lavar las pulpas un mínimo de 3 veces con agua y llevar a secar, una vez seco disgregar, embolsar, rotular (código, tipo de mineral, y tiempo de agitación) y entregar al laboratorio químico para el análisis respectivo.
- Para realizar el cálculo del consumo de cianuro de sodio y soda caustica en cada prueba metalúrgica finalizada se utiliza las siguientes formulas, además de la tabla de reposición de cianuro de sodio que se muestra.

$$\text{Consumo de cianuro de sodio} = ((a) - (b * 0,25 * 10 * 2) / 5)$$

Donde:

a = suma de cianuro de sodio de reposición e inicial

b = último gasto de nitrato de plata

$$\text{Consumo de soda cáustica} = (\text{suma de reposición e inicial}) / 0,3$$

Tabla 3*Reposición de cianuro de sodio*

Fuerza de CN (ppm)	1000		1500		2000	
Reactivo	Nitrato de plata	Cianuro de sodio	Nitrato de plata	Cianuro de sodio	Nitrato de plata	Cianuro de sodio
N° de adición	ml	g	ml	g	ml	g
1	0,0	0,6	0,0	0,9	0,0	1,2
2	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	1,0
3	1,0	0,3	1,0	0,6	1,0	0,9
4	1,5	0,2	1,5	0,5	1,5	0,7
5	2,0	0,0	2,0	0,3	2,0	0,6
6	-	-	2,5	0,2	2,5	0,4
7	-	-	3,0	0,0	3,0	0,3
7	-	-	-	-	3,5	0,1
9	-	-	-	-	4,0	0,0

Nota. La Tabla indica la reposición de cianuro de sodio y gasto de equivalente de nitrato para cada concentración.

3.6. Tratamiento de datos (análisis estadístico)**3.6.1. Matriz de diseño experimental**

El desarrollo experimental estará basado en la aplicación de un diseño factorial completo de 19 pruebas con tres variables, dos repeticiones y tres puntos centrales, de manera figurativa se expresa mediante la siguiente expresión $2^K \cdot 2 + 3$, donde: K es el número de factores, en este caso 3; $\cdot 2$ implica que las pruebas serán por duplicado; $+3$ se refiere a la inclusión de tres puntos centrales.

Tabla 4*Matriz de diseño codificado*

Orden aleatorio	Orden corrida	Conc. cianuro	tiempo	%-m200
5	1	-1	-1	1
17	2	0	0	0
12	3	1	1	-1
18	4	0	0	0
8	5	1	1	1
14	6	1	-1	1
1	7	-1	-1	-1
4	8	1	1	-1
3	9	-1	1	-1
11	10	-1	1	-1
6	11	1	-1	1
2	12	1	-1	-1
19	13	0	0	0
15	14	-1	1	1
16	15	1	1	1
7	16	-1	1	1
9	17	-1	-1	-1
13	18	-1	-1	1
10	19	1	-1	-1

Nota. Los niveles bajos de las variables son indicados con “-1”, los puntos centrales con “0” y los niveles altos quedan indicados con “1”.

La Tabla 4 precisa la codificación de cada una de las variables según los niveles en que serán evaluados, se realizará 19 evaluaciones.

La Tabla 5 muestra el orden de cada una de las evaluaciones, así como los valores de cada una de las variables con sus respectivas dimensiones.

Tabla 5

Matriz real

Orden aleatorio	Orden corrida	Punto Central	Bloques	cianuro ppm	tiempo h	-m200 %
5	1	1	1	1000	24	90
17	2	0	1	1500	36	85
12	3	1	1	2000	48	80
18	4	0	1	1500	36	85
8	5	1	1	2000	48	90
14	6	1	1	2000	24	90
1	7	1	1	1000	24	80
4	8	1	1	2000	48	80
3	9	1	1	1000	48	80
11	10	1	1	1000	48	80
6	11	1	1	2000	24	90
2	12	1	1	2000	24	80
19	13	0	1	1500	36	85
15	14	1	1	1000	48	90
16	15	1	1	2000	48	90
7	16	1	1	1000	48	90
9	17	1	1	1000	24	80
13	18	1	1	1000	24	90
10	19	1	1	2000	24	80

Nota. La Tabla mostrada es adaptada de la configuración que ofrece el software Minitab19.

La interpretación estadística para el desarrollo del modelo matemático que describirá el proceso de extracción de oro será ejecutada mediante el uso del software Microsoft Excel y Minitab 19.

3.6.2. Análisis de oro en muestras sólidas

El ensayo para la determinación de oro en muestras sólidas requirió del método del ensayo al fuego, las muestras líquidas fueron ensayadas con la utilización de un equipo de absorción atómica.

Figura 10

Equipo de Absorción atómica



Nota. El EAA de marca Varian utilizado es de propiedad de la empresa gentilmente cedido para la realización de la cuantificación de oro recuperado.

Para la determinación de la recuperación de oro en cada una de las evaluaciones, se procedió al análisis de muestras sólidas tanto para el mineral de cabeza así como para los ripios o residuos, de esa forma el balance de masa resulta en un contenido de oro más preciso por tratarse de unidad de medida que puede ser obtenida de manera más sencilla con la utilización de una balanza de precisión a diferencia de un balance realizado a muestras líquidas donde se requiere de la determinación del volumen de cada solución para el cálculo preciso del contenido de oro total.

Figura 11

Preparación de residuos para análisis



Nota. La preparación mecánica de cada muestra resulta en la obtención de 20 gramos de cada muestra para su respectivo análisis.

Una vez finalizadas las pruebas de lixiviación en botellas, las muestras sólidas, es decir los residuos son filtrados, secados, rodillados y rotulados adecuadamente. Posterior a ello se entrega a laboratorio químico y extraen una muestra representativa para el análisis mediante ensayo al fuego, esta muestra será sometida a fundición, copelación, ataque químico y pesado del producto final. Para posteriormente ser calculada la ley de oro de la muestra analizada, en este caso del residuo o ripio.

La siguiente fórmula permite el cálculo de la recuperación de oro, la diferencia entre la ley de cabeza y del residuo o ripio expresando en términos porcentuales, indica cantidad de oro extraído al final de cada evaluación; las leyes de oro son expresadas en Oz de oro por TC de mineral.

% Rec. Au = (ley de Au en cabeza - ley de Au en residuo) *100 / ley de Au en cabeza.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1. Pruebas preliminares

Se desarrolló 6 pruebas preliminares al mismo tipo de mineral que es objeto de estudio del presente trabajo con la intención de replicar los resultados referenciados en la Tabla 1 “*Extracción de oro en diferentes pruebas metalúrgicas*”, donde se evidenció el alto consumo de cianuro de este tipo de mineral.

La evaluación preliminar se desarrolló usando los siguientes parámetros operativos de planta:

- 2 000 ppm de cianuro de sodio para la solución lixiviante
- 80 % de malla -200 para la granulometría

El mineral fue evaluado en un periodo de tiempo de 48 horas con la finalidad de obtener mejor representatividad.

La Tabla 6 indica un promedio de recuperación de 89,63 %, este será el valor de referencia para contrastarlo con los resultados de la aplicación del diseño experimental con el que se espera mejorar el proceso de lixiviación reduciendo el consumo de cianuro sin comprometer la extracción de oro.

Tabla 6*Evaluación preliminar*

Nº	CÓDIGO	Ley de cabeza Au oz/tc	Recuperación de Au %	Consumo Cianuro kg/t	Consumo Soda kg/t	Tiempo Agitación h
1	CY-4216	1,082	90,87%	9,317	1,667	48
2	CY-4221	1,097	89,91%	9,200	1,667	48
3	CY-4228	1,075	89,48%	9,250	1,667	48
4	CY-4234	1,101	90,41%	9,150	1,667	48
5	CY-4104	0,401	87,92%	8,717	1,667	48
6	CY-4090	0,729	89,21%	12,917	1,667	48

Nota. Resultados bajo condiciones operativas de planta

4.1.1. Extracción de oro

De acuerdo con lo referenciado en la sección 3.6.2 “análisis de oro en muestras sólidas”, la Tabla 8 muestra la recuperación de oro a partir de los análisis tanto de cabeza como los del ripio en las 19 pruebas ejecutadas según el diseño factorial utilizado. La matriz experimental desarrollada requirió de 19 pruebas, la interacción de las tres variables en 8 pruebas que al ser duplicadas requieren 16 experimentos, adicionalmente y con la intención de descartar la existencia de curvatura en la regresión obtenida, se incluyó 3 puntos centrales. La Tabla 8 muestra los resultados de las 19 evaluaciones realizadas en cada una de las interacciones de las variables estudiadas.

Tabla 7*Porcentaje de extracción, consumo de cianuro de sodio y soda caustica*

Orden Corrida	Ley de Cabeza Oz/tc	Ley de residuo Oz/tc	Consumo de cianuro de sodio kg/t	Consumo de soda caustica kg/t	Rec. de Au %
1	1,142	0,061	2,96	1,667	94,658
2	1,142	0,053	4,70	1,667	95,359
3	1,142	0,051	5,46	1,667	95,534
4	1,142	0,055	4,70	1,667	95,184
5	1,142	0,041	5,6	1,667	96,410
6	1,142	0,05	4,63	1,667	95,622
7	1,142	0,066	3,26	1,667	94,221
8	1,142	0,05	5,13	1,667	95,622
9	1,142	0,055	4,00	1,667	95,184
10	1,142	0,058	3,76	1,667	94,921
11	1,142	0,053	4,63	1,667	95,359
12	1,142	0,057	3,8	1,667	95,009
13	1,142	0,05	4,60	1,667	95,622
14	1,142	0,042	4,50	1,667	96,322
15	1,142	0,045	5,6	1,667	96,060
16	1,142	0,044	4,10	1,667	96,147
17	1,142	0,061	2,73	1,667	94,658
18	1,142	0,06	3,26	1,667	94,746
19	1,142	0,051	3,9	1,667	95,534

Nota. Las leyes de cabeza y residuo mostradas en la tabla fueron analizadas en el laboratorio químico de la empresa.

4.2. Resultados

4.2.1. Diseño factorial completo

El porcentaje de extracción de oro reportado en las pruebas metalúrgicas en esta investigación corresponde al porcentaje de recuperación de oro (% Rec. de Au)

ya que el metal valioso extraído o disuelto representa la cantidad de oro recuperado en cada prueba metalúrgica como se muestra a continuación.

Tabla 8

Porcentaje de extracción de Au

Orden Corrida	Conc. cianuro ppm	Tiempo h	Malla % m-200	Rec Au %
1	1000	24	90	94,658
2	1500	36	85	95,359
3	2000	48	80	95,534
4	1500	36	85	95,184
5	2000	48	90	96,410
6	2000	24	90	95,622
7	1000	24	80	94,221
8	2000	48	80	95,622
9	1000	48	80	95,184
10	1000	48	80	94,921
11	2000	24	90	95,359
12	2000	24	80	95,009
13	1500	36	85	95,622
14	1000	48	90	96,322
15	2000	48	90	96,060
16	1000	48	90	96,147
17	1000	24	80	94,658
18	1000	24	90	94,746
19	2000	24	80	95,534

Nota. El diseño factorial planteado contempla la realización de 19 evaluaciones llevadas a cabo en forma aleatoria.

4.2.2. Análisis de varianza

La ejecución de 19 pruebas permite la generación de 18 grados de libertad (n-1), donde “n” es el número de pruebas realizadas, estos grados de libertad o GL permiten evaluar el grado de ajuste del modelo generado.

Tabla 9

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	5,811	1,162	24,22	0,000
Lineal	3	5,051	1,684	35,09	0,000
Conc. cianuro	1	1,151	1,151	23,98	0,000
Tiempo	1	2,554	2,554	53,23	0,000
% malla	1	1,346	1,346	28,06	0,000
Interacciones de 2 términos	2	0,760	0,380	7,92	0,006
Conc. cianuro*Tiempo	1	0,300	0,300	6,24	0,027
Tiempo*% malla	1	0,461	0,461	9,60	0,008
Error	13	0,624	0,048		
Curvatura	1	0,000	0,000	0,01	0,931
Falta de ajuste	2	0,139	0,069	1,43	0,283
Error puro	10	0,484	0,048		
Total	18	6,434			

Nota. Tabla ANOVA adaptada de análisis de regresión factorial en Minitab 19.

El análisis de varianza de la Tabla 9 da cuenta de la utilización de 18 grados de libertad, de los cuales cinco grados son utilizados en la conformación del modelo matemático, 3 conforman la parte lineal y 2 para la interacción de variables; así

mismo, los restantes 13 grados de libertad son utilizados para el análisis del error generado y determinar su significancia.

De acuerdo con el valor p (valor de significancia) el modelo matemático generado tendrá una parte lineal ($p = 0,000$) y una parte conformada por la interacción de variables concentración de cianuro - tiempo y tiempo - % de malla debido a que ambos tienen valores p de 0,027 y 0,008 respectivamente ambos inferiores a 0,05.

El ANOVA o análisis de varianza también nos indica que se puede descartar la existencia de curvatura en el modelo matemático, con un valor $p = 0,931$, es decir un valor ampliamente superior a 0,05, por tanto, se puede aseverar que el modelo generado es totalmente lineal; así mismo, el valor p de 0,283 para la falta de ajuste también da cuenta de que cualquier error generado durante la realización de las pruebas o por lo omisión de alguna variable es lo suficientemente pequeño para ser considerado como significativo, de esa forma se valida el modelo generado.

4.2.3. Análisis de significancia de cada variable

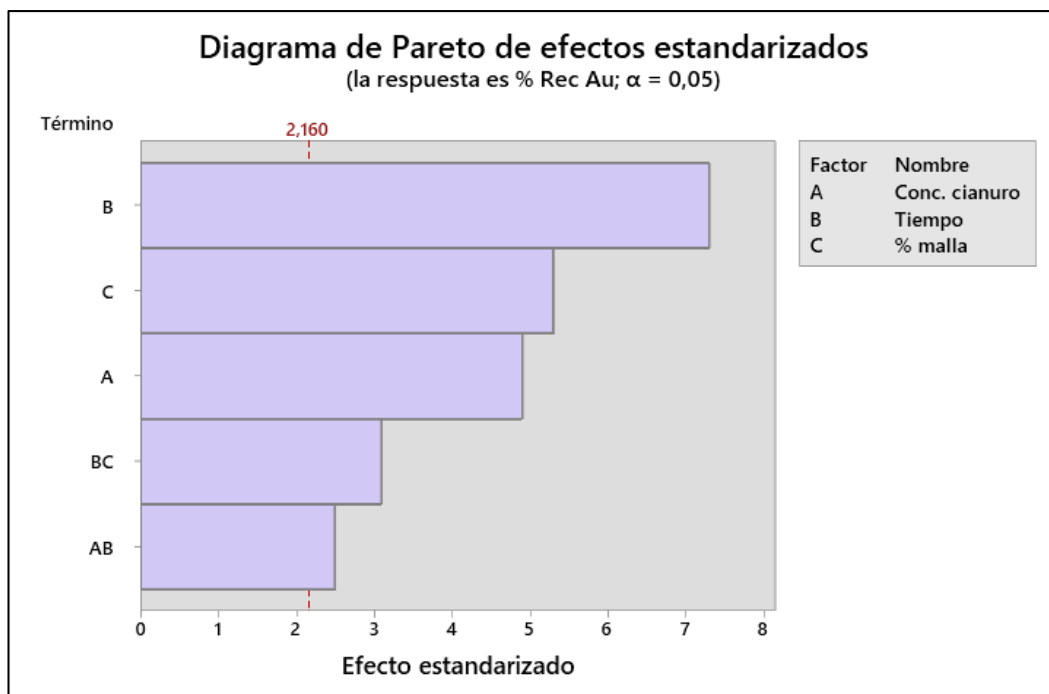
Las variables fuerza o concentración de cianuro, el tiempo de agitación o lixiviación y el porcentaje de malla -200 que son materia de estudio en el presente trabajo de investigación fueron analizadas desde un punto de vista estadístico a fin de determinar su relevancia en la recuperación de oro, esta relevancia es medida

con el grado de significancia que presenta cada una de estas variables con respecto a la variable de salida indicada.

Para el análisis de significancia, se hace uso del diagrama de Pareto mostrado en la Figura 12 donde se visualiza a las tres variables y la preponderancia de cada una de ellas sobre el grado de extracción de oro, así mismo la figura muestra las interacciones más relevantes de tiempo - % de malla y concentración de cianuro - tiempo. El análisis fue realizado con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Figura 12

Diagrama de Pareto

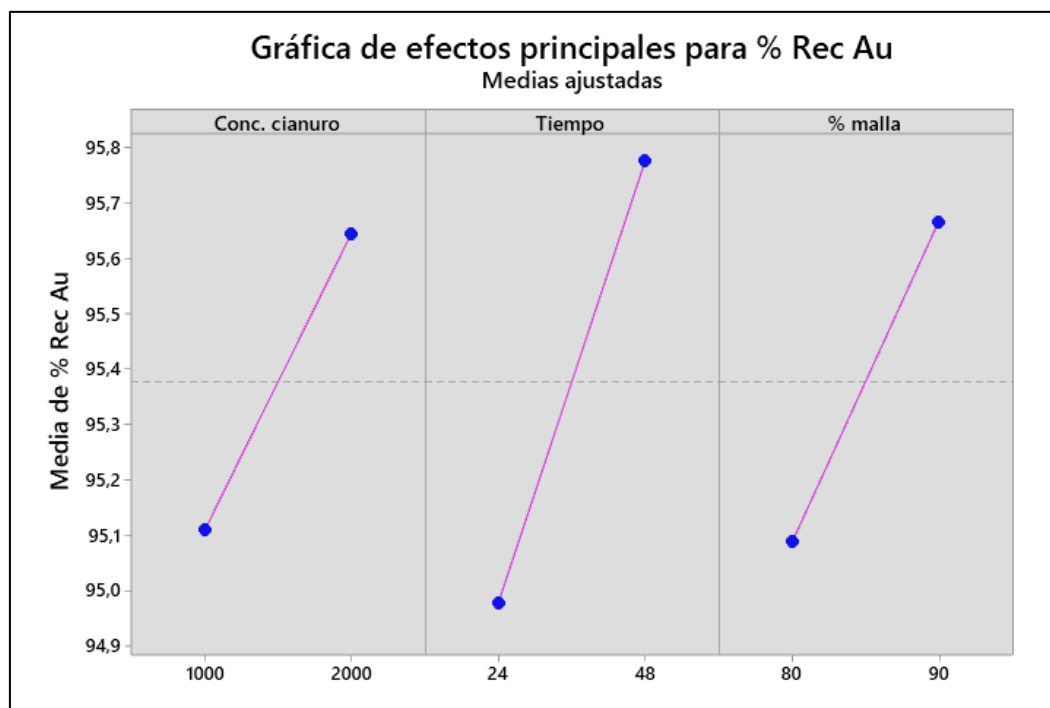


Nota. Diagrama de Pareto adaptado del análisis de significancia en Minitab 19.

De acuerdo con los resultados de la Figura 12, las tres variables influyen significativamente en la recuperación de oro; así mismo, las interacciones entre tiempo - porcentaje de malla (BC) y concentración de cianuro – tiempo (AB) también presentan, aunque en menor grado, un nivel de significancia que debe ser tomado en cuenta en la recuperación de oro. Este análisis es validado con los resultados mostrados en la tabla de ANOVA (Tabla 9) donde las tres variables presentan valor p menor a 0,05, en el caso del valor p de las interacciones BC y AB se muestra valores de 0,006 y 0,027 respectivamente.

Figura 13

Efecto de variables sobre la respuesta



Nota. Gráfica de efectos adaptado del análisis de significancia en Minitab 19.

La Figura 13 muestra el efecto generado de cada una de las tres variables significativas sobre la recuperación de oro.

El efecto de las variables sobre la respuesta mostradas en la figura anterior indica que todas las variables presentan una relación directa, todas tienen influencia positiva sobre la recuperación de oro, en otras palabras, el incremento de cada una favorece el grado de extracción de oro.

La pendiente más pronunciada en la relación tiempo y recuperación da cuenta a esta variable como la más influyente en el grado de extracción de oro, aunque no descarta la preponderancia de las otras dos variables.

4.2.4. Regresión lineal

La regresión obtenida presenta características de una ecuación lineal de acuerdo con los niveles de significancia antes explicados, la recuperación de oro es explicado en función de las tres variables independientes evaluadas y la interacción entre la concentración de cianuro y el tiempo así como por la interacción del tiempo y el % de malla -200 utilizado.

$$\% \text{ Rec Au} = 95,860 + 0,0014\text{Conc. cianuro} - 0,1729\text{Tiempo} - 0,044\% \text{ malla} - 0,00002 \text{ Conc. cianuro}*\text{Tiempo} + 0,003 \text{ Tiempo}*\% \text{ malla}$$

La ecuación desarrollada presenta el siguiente resumen estadístico:

Tabla 10

Resumen estadístico del modelo

S	R ²	R ² ajust.	R ² predicción
	%	%	%
0,219	90,31	86,58	78,02

Nota. Resumen estadístico del modelo obtenido en Minitab 19.

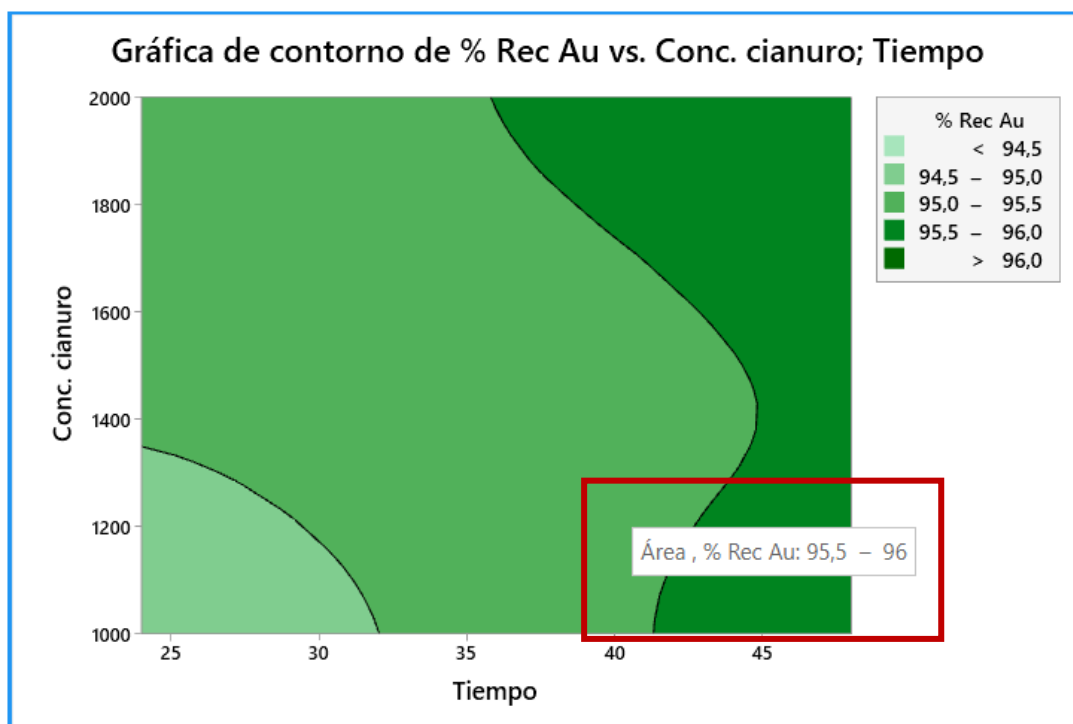
Al evaluar más de una variable de predicción, se toma como coeficiente de determinación al R² ajustado, el valor de 86,58 % indica que el modelo desarrollado es bastante bueno para explicar la recuperación de oro como función de las variables evaluadas; así mismo, el valor de 78,02 % del R² de predicción indica que el modelo tiene una alta capacidad de predicción al variar el valor de las variables utilizadas dentro del rango de evaluación. El valor de variación estándar S = 0,219 indica una variación relativamente baja en los resultados obtenidos.

4.2.5. Minimización de la concentración de cianuro

El análisis de significancia jerarquizó al tiempo y al porcentaje de malla - 200 como las variables con más influencia sobre la recuperación de oro, basado en esta premisa, se puede estimar la recuperación de oro haciendo uso de la regresión obtenida en un nivel bajo de concentración de cianuro de tal manera que no afecte apreciablemente la recuperación de oro.

Figura 14

Gráfica de contornos conc. de cianuro y tiempo

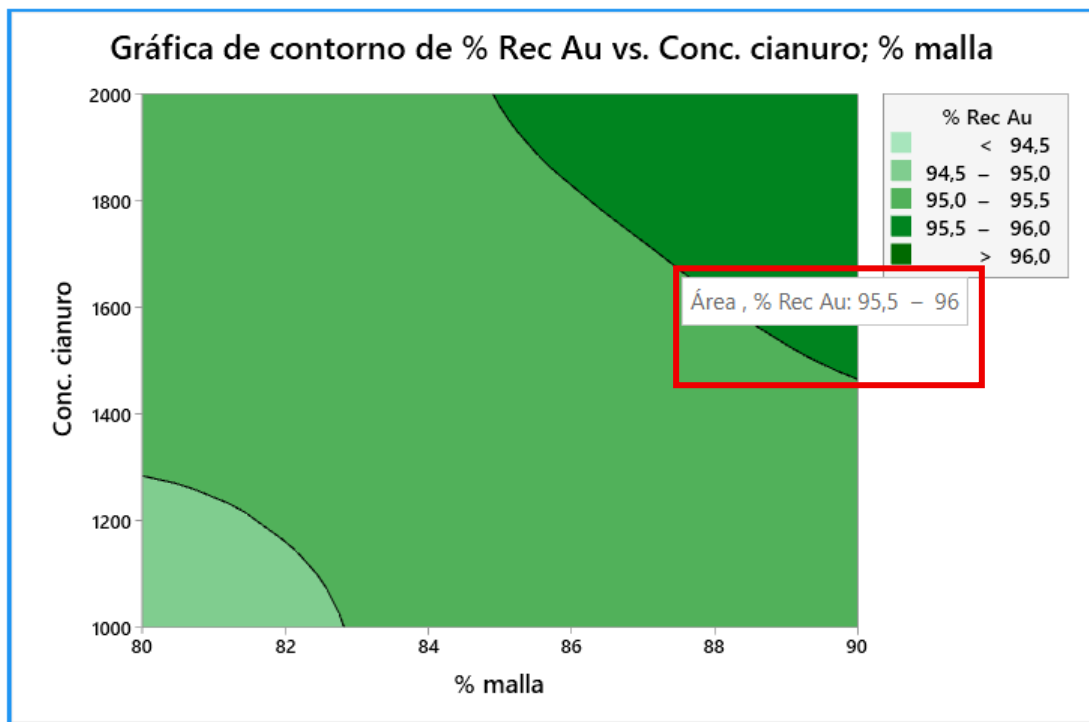


Nota. Gráfica de contornos adaptado del análisis de optimización en Minitab 19.

La Figura 14 está dividida por zonas demarcadas con diferentes tonalidades que indican diferentes grados de recuperación de oro, el color verde oscuro indica las zonas donde las recuperaciones son más altas. El área demarcada en rojo indica la región donde se puede obtener recuperaciones superiores a 95 % con niveles bajos de cianuro entre 1 000 y 1 200 ppm y valores superiores a 40 horas de agitación.

Figura 15

Gráfica de contornos conc. de cianuro y % malla -200



Nota. Gráfica de contornos adaptado del análisis de optimización en Minitab 19.

Al igual que en la Figura anterior, la zona demarcada en rojo indica que es posible obtener recuperaciones entre 95,5 % y 96,0 % para un rango de 1 500 y 1 600 ppm de cianuro, la Figura también indica que es conveniente mantener un rango entre 88 % a 90 % de malla -200.

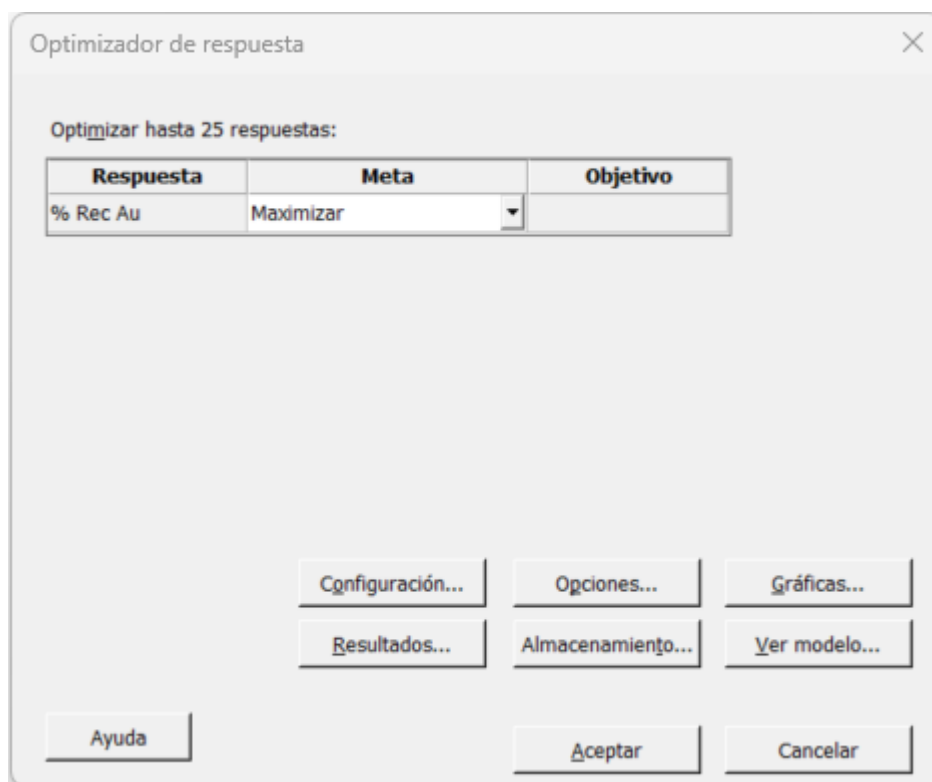
4.2.6. Optimización de respuesta con software

Basado en el análisis de la Figura 14 y Figura 15, es conveniente evaluar la posibilidad de disminuir la concentración de cianuro en rangos apropiados, de tal

manera que estos valores no afecten significativamente la recuperación de oro, para ello se utilizó la herramienta de *Optimización de respuesta* de Minitab 19.

Figura 16

Herramienta optimizar respuesta



Nota. Ventana de herramienta optimizador de respuesta en Minitab 19.

La Tabla 11 muestra los valores en que se realizará la simulación a fin de maximizar la recuperación de oro variando el porcentaje de malla -200, tiempo de agitación y la concentración de cianuro.

Tabla 11*Rangos de variables*

Variable	Valores
Conc. cianuro	1000; 1600
Tiempo	40; 45
% malla -200	88; 90

Nota. Valores escogidos de acuerdo con los análisis de las gráficas de contorno.

Tabla 12*Solución según software*

Solución	Conc. cianuro	Tiempo	% malla	% Rec Au Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	1600	45	90	96,128	0,871

Nota. Valores tomados de la solución obtenida de Minitab 19.

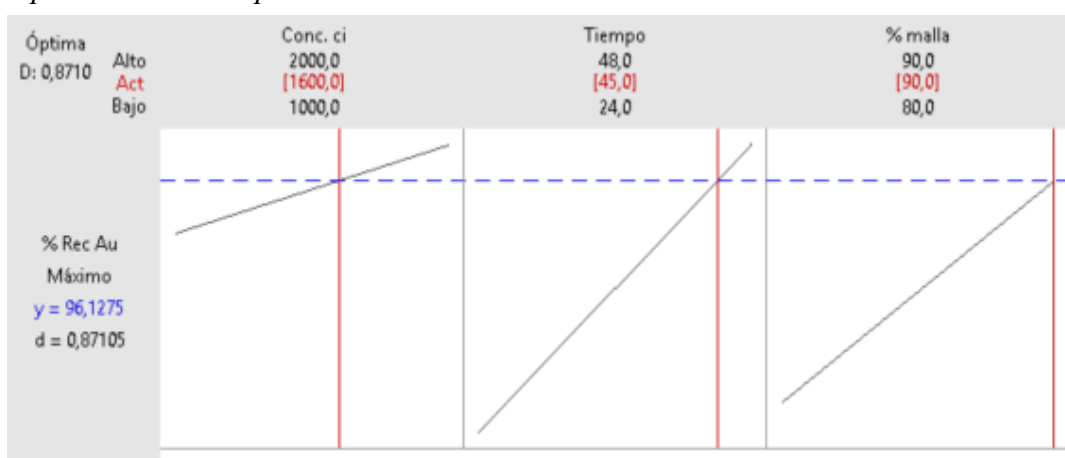
Los valores indicados en la Tabla 12 permiten obtener un valor ajustado de 96,128 % de recuperación de oro alcanzando una deseabilidad compuesta de 0,871 que es un valor muy cercano a 1, lo cual significa que la configuración propuesta satisface correctamente la meta planteada, en este caso, la variación de variables sin afectar la recuperación de oro.

Lo explicado anteriormente puede interpretarse de manera gráfica con la siguiente Figura, se observa que para el caso del porcentaje de malla es conveniente usarlo en el nivel más alto en tanto que para la concentración de cianuro y tiempo

estos alcanzan valores de 1 600 ppm y 45 horas respectivamente para maximizar la recuperación de oro.

Figura 17

Optimizador de respuesta



Nota. Figura adaptada del optimizador de respuesta en Minitab 19.

4.2.7. Cinética de lixiviación

Los resultados de la Tabla 12 indican que la recuperación de oro puede ser favorecida aplicando las siguientes condiciones: Concentración de cianuro = 1 600 ppm; tiempo de agitación 45 horas y en 90% de malla -200. Esta aseveración puede ser demostrada mediante el estudio cinético de la velocidad de disolución del contenido valioso al mismo tipo de mineral en dos escenarios, el primero bajo condiciones operativas de planta y el segundo bajo las condiciones determinadas en la optimización arrojada por el software.

El modelado de ambas situaciones permitirá establecer sus respectivas constantes cinéticas determinando previamente la forma en la que los reactantes se

transforman en productos, es decir el modelo cinético que describa la velocidad de disolución del oro. Se analizó el mecanismo de disolución usando tres modelos cinéticos mostrados en la Figura 18.

Figura 18

Modelos cinéticos usados

Reacción química superficial $1 - (1 - x)^{\frac{1}{3}} = k_{sc} \times t$ Difusión en la película líquida $1 - (1 - x)^{\frac{2}{3}} = k_{lf} \times t$ Difusión a través de la capa producto $1 - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x) = k_{pd} \times t$

Nota. La letra k denota la constante cinética para cada modelo específico, x denota la fracción de oro disuelto y t el tiempo de reacción.

4.2.8. Condiciones de evaluación

La Tabla 13 indica el volumen de lixivante así como la cantidad de mineral utilizado en ambas pruebas, la cantidad de oro inicial resulta del producto del peso de mineral y su respectiva ley.

Tabla 13

Condiciones de prueba

Volumen de lixivante	Peso de mineral	Ley de cabeza		Contenido de oro en la cabeza
ml	g	oz/tc	g/t	g
600	300	1,142	39,154	11,746

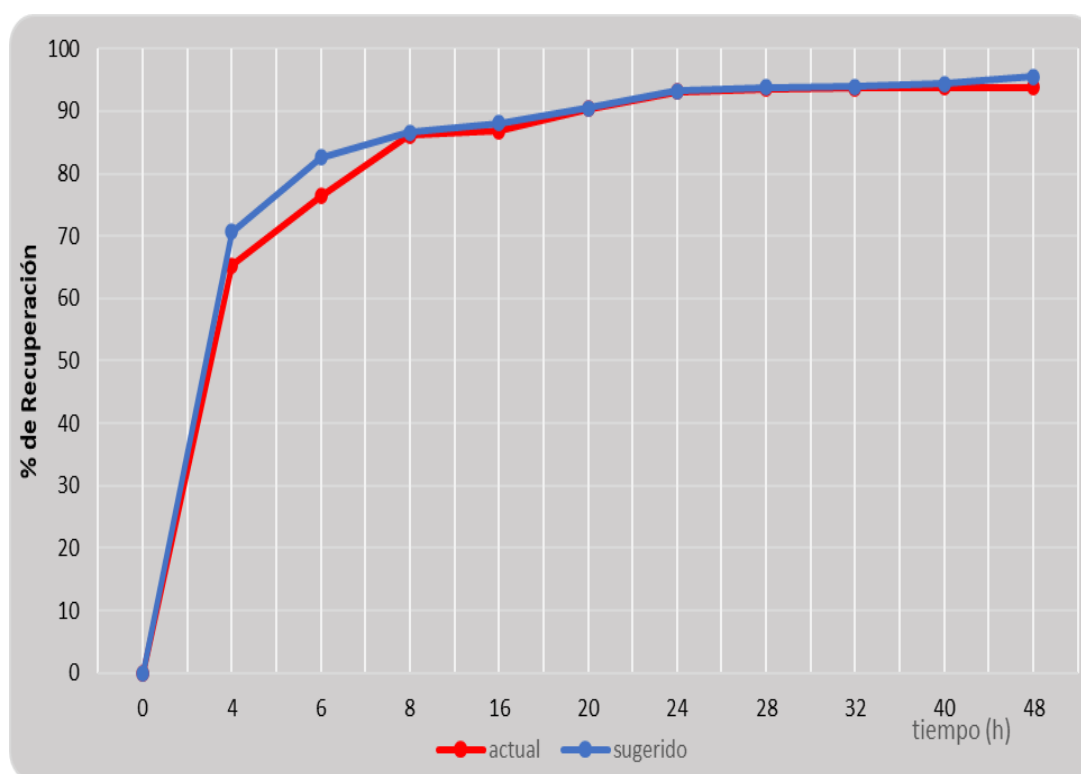
Nota. Factor de conversión de oz/tc a g/t = 34,286.

4.2.9. Comparación de resultados

La Figura 19 muestra la diferencia del contenido de oro recuperado parcialmente bajo las dos situaciones evaluadas, es notorio que bajo las condiciones generadas en la optimización por el software Minitab se alcanza una mejor disolución de oro (tendencia en color azul).

Figura 19

Recuperación de oro vs tiempo



Nota. Disolución de oro bajo condiciones diferentes

Bajo condiciones operativas en las que trabaja actualmente la planta con un 80 % malla -200 y fuerza de cianuro de 2 000 ppm, se obtiene un valor máximo de

93,87 % de recuperación de oro analizando la ley de oro en solución en mg/l en un periodo de evaluación de 45 horas (ver Tabla 14).

Tabla 14

Evaluación bajo condiciones operativas

Tiempo de agitación	Ley de Au en solución	Ley cabeza calculada	Ley de residuo	Recuperación de Au
h	mg/l	oz/tc	oz/tc	%
0	0	1,043	-	0,000
4	11,671	1,043	-	65,25
6	13,667	1,043	-	76,41
8	15,406	1,043	-	86,13
16	15,530	1,043	-	86,82
20	16,158	1,043	-	90,33
24	16,659	1,043	-	93,13
28	16,749	1,043	-	93,64
32	16,771	1,043	-	93,76
40	16,775	1,043	-	93,78
45	16,790	1,043	0,064	93,87

Nota. Resultados de la evaluación bajo condiciones actuales de operación. Ley cabeza calculada es la suma de ley de oro en solución y ley de oro en residuo.

Ley de oro en solución es la cantidad de oro disuelto analizado en diferentes tiempos de agitación. Cuando se aplica las condiciones sugeridas mediante la optimización con el software en el mismo periodo de tiempo, fuerza de cianuro de

1 600 ppm y 90 % de malla -200, se obtiene una recuperación máxima de 95,50 %, valor superior al obtenido bajo las condiciones anteriores (ver Tabla 15).

Tabla 15

Evaluación bajo condiciones obtenidas con software

Tiempo de agitación	Ley de Au en solución	Ley cabeza calculada	Ley de residuo	Recuperación de Au
h	mg/l	oz/tc	oz/tc	%
0	0	1,045	-	0.00
4	12,646	1,045	-	70,58
6	14,767	1,045	-	82,42
8	15,481	1,045	-	86,41
16	15,761	1,045	-	87,97
20	16,194	1,045	-	90,38
24	16,683	1,045	-	93,11
28	16,789	1,045	-	93,71
32	16,811	1,045	-	93,83
40	16,892	1,045	-	94,28
45	17,111	1,045	0,047	95,50

Nota. Resultados de la evaluación bajo condiciones sugeridas por software. Ley cabeza calculada es la suma de ley de oro en solución y ley de oro en residuo.

4.2.10. Determinación del modelo cinético

La recuperación de oro determinadas en las Tablas anteriores permite estructurar los datos necesarios para la adecuación y determinación del modelo cinético que describa la velocidad de disolución permitiendo determinar la constante cinética, precisamente la comparación de este valor en las dos condiciones evaluadas permitirá comprobar que, bajo las condiciones sugeridas, se obtiene una mayor tasa de disolución de oro, es decir, mejores recuperaciones en menor tiempo. Se requiere tabular los datos obtenidos de recuperación en términos de fracción disuelta en cada unidad de tiempo.

Los datos obtenidos en la Tabla 14 *Evaluación bajo condiciones operativas* son usados para ser tabulados en la Tabla 16.

La columna perteneciente al encabezado “x” de Tabla 16 indica la fracción de oro disuelto acumulado, las tres últimas columnas con encabezados RQS, DPL y DCP hacen referencia a los tres tipos de modelos cinéticos que se usarán para determinar cuál es el que mejor describe la disolución de oro en ambas situaciones. Los nombres de los modelos cinéticos están referenciados en la Figura 18 así como las ecuaciones respectivas usadas para calcular los valores plasmados en cada una de las tres columnas mencionadas.

Tabla 16*Datos para modelación bajo condiciones actuales*

Tiempo lixiviación	Recuperación Au	Tiempo	x	RQS	DPL	DCP
h	%	min				
0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
4	65,248	240	0,652	0,297	0,506	0,212
6	76,407	360	0,764	0,382	0,618	0,326
8	86,129	480	0,861	0,482	0,732	0,474
16	86,822	960	0,868	0,491	0,741	0,487
20	90,333	1200	0,903	0,541	0,789	0,561
24	93,134	1440	0,931	0,591	0,832	0,634
28	93,637	1680	0,936	0,601	0,841	0,649
32	93,760	1920	0,938	0,603	0,843	0,653
40	93,782	2400	0,938	0,604	0,843	0,654
45	93,866	2880	0,939	0,606	0,844	0,656

Nota. Datos correspondientes a condiciones de lixiviación con parámetros actuales de planta.

Así mismo, los datos de la Tabla 15

Evaluación bajo condiciones obtenidas con software” permiten tabular los datos de la siguiente tabla:

Tabla 17*Datos para modelación bajo condiciones sugeridas*

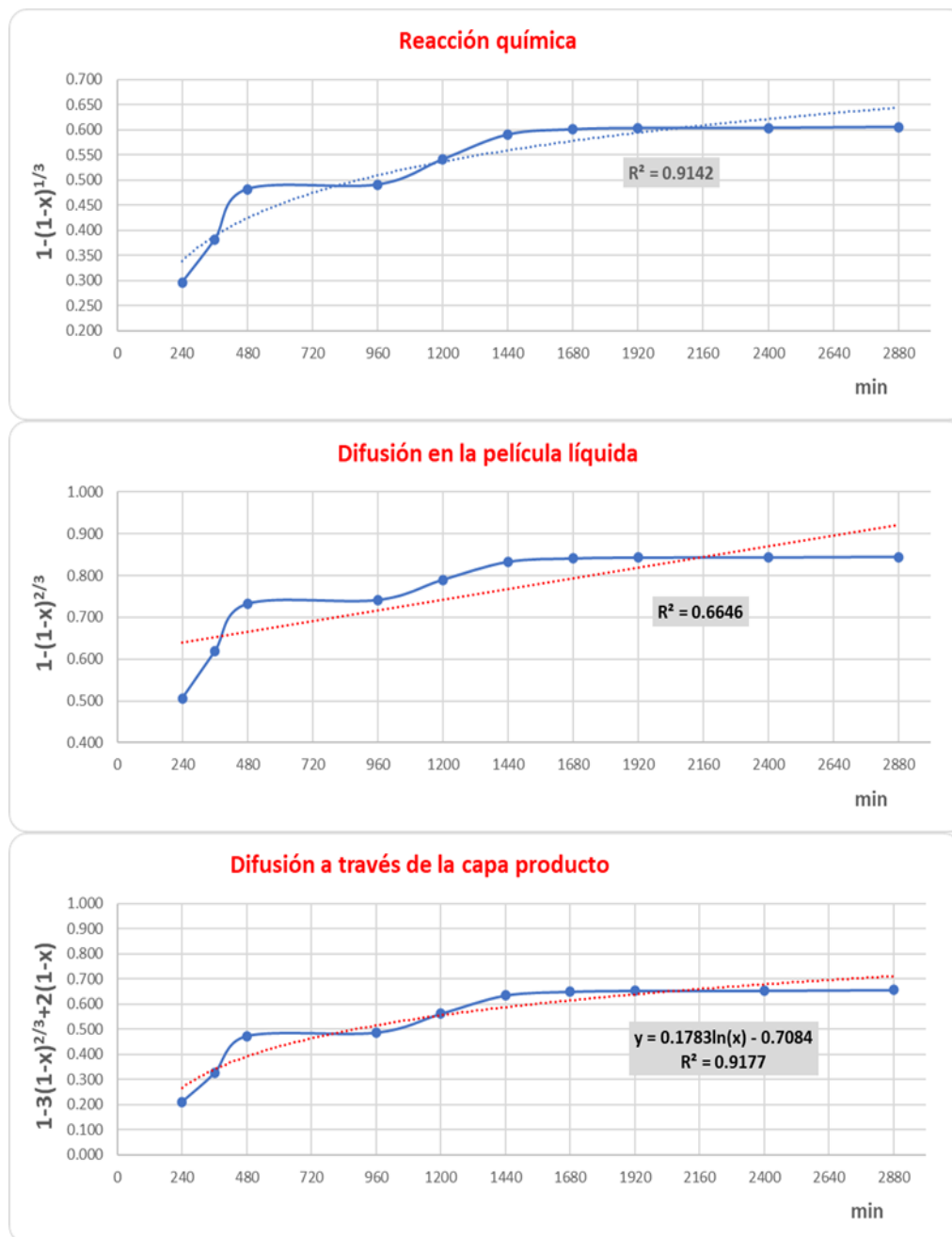
tiempo lixiviación	Recuperación Au	tiempo	x	RQS	DPL	DCP
h	%	min				
0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
4	70,699	240	0,707	0,336	0,559	0,263
6	82,557	360	0,826	0,441	0,688	0,412
8	86,548	480	0,865	0,488	0,737	0,481
16	88,114	960	0,881	0,508	0,758	0,512
20	90,534	1200	0,905	0,544	0,792	0,566
24	93,268	1440	0,933	0,593	0,835	0,638
28	93,861	1680	0,939	0,606	0,844	0,656
32	93,984	1920	0,940	0,608	0,846	0,660
40	94,437	2400	0,944	0,618	0,854	0,674
45	95,503	2880	0,955	0,644	0,874	0,711

Nota. Datos correspondientes a condiciones de lixiviación con parámetros sugeridos.

Para la determinación del modelo que más se ajuste a los resultados obtenidos en ambas situaciones, graficamos los datos de cada una de las tres últimas columnas en función del tiempo, esto permitirá establecer el grado de determinación en cada modelo, precisamente el valor R^2 o coeficiente de determinación más alto indicará el modelo adecuado para cada situación. En las siguientes figuras se indicará los valores respectivos de R^2 y el modelo matemático obtenido en la regresión con R^2 más alto.

Figura 20

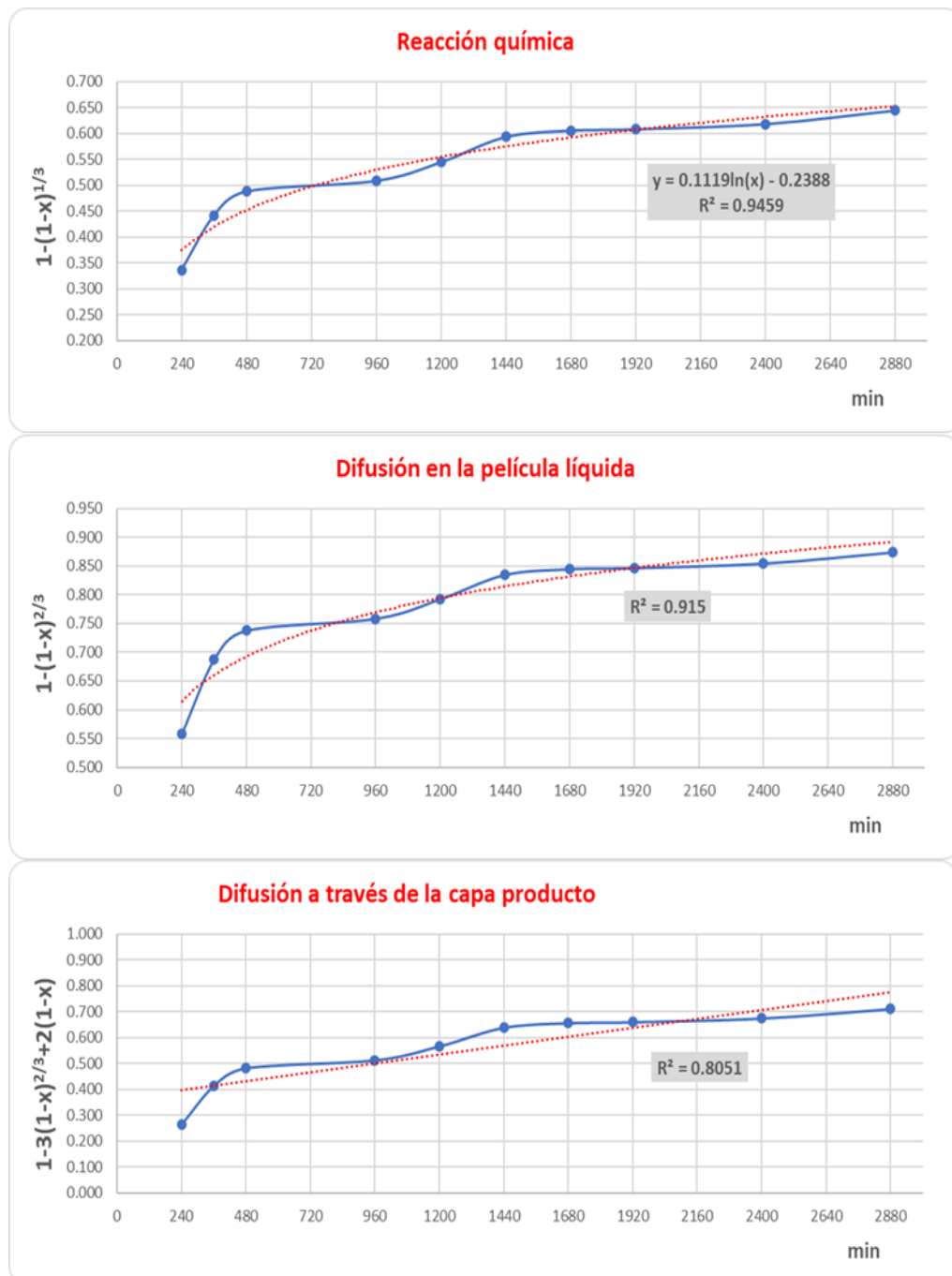
Modelamiento cinético de condiciones actuales



Nota. Condiciones de evaluación bajo parámetros de planta son descritas de manera más adecuada bajo el modelo cinético de difusión a través de la capa producto con R^2 de 0,9177.

Figura 21

Modelamiento cinético de condiciones sugeridas



Nota. Condiciones de evaluación bajo parámetros sugeridos son descritas de manera más adecuada bajo el modelo cinético de reacción química en la superficie con R^2 de 0,9459.

El mecanismo que gobierna la velocidad de disolución del oro según las condiciones propuestas por el software corresponde a la reacción química superficial, mientras que el mecanismo bajo condiciones de planta es la difusión en la capa producto.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. *Ajuste del modelo matemático*

- El análisis de varianza y la regresión lineal generada muestran un R^2 ajustado de 86,58 % y un R^2 de predicción de 78,02 %, confirmando que el modelo explica con precisión la recuperación de oro en función de las variables estudiadas.
- El modelo obtenido es lineal, válido y sin presencia de curvaturas ni falta de ajuste significativa, lo que lo hace útil para la predicción y optimización de condiciones operativas.

4.3.2. *Optimización de la respuesta*

- La herramienta estadística de Minitab estableció que, en condiciones óptimas, es decir 90 % de malla -200, 1600 ppm de cianuro y 45 horas de agitación, se logra una recuperación de 96,128 % con una deseabilidad de 0,871. Esto confirma que estas condiciones son efectivas y factibles económicamente considerando que se ha disminuido el consumo de cianuro. Es posible de reducir el consumo

de cianuro sin sacrificar la recuperación de oro, priorizando un mejor control del tiempo de lixiviación y del nivel de molienda.

4.3.3. Validación del objetivo general de la investigación

- Con base en los resultados, se concluye que la concentración de cianuro puede disminuirse considerablemente (hasta rangos de 1000 – 1200 ppm) siempre que se controlen los otros factores operativos, especialmente tiempo y molienda, garantizando recuperaciones mayores al 95% de Au y validando de manera integral el objetivo principal de esta investigación.

Conclusiones

- Los resultados experimentales y el análisis de optimización demuestran que es posible obtener recuperaciones de oro superiores al 95 % al utilizar concentraciones de cianuro en el rango de 1 000 a 1 600 ppm, notablemente menores que la concentración requerida de planta que utiliza una dosificación de 2 000 ppm, el software utilizado determinó que con una concentración de 1 600 ppm de cianuro es posible alcanzar una recuperación de 95,5 % a 45 horas de lixiviación y con un porcentaje de malla -200 de 90 % lo que implica una optimización del consumo de reactivo con beneficio económico y ambiental.
- El tiempo de agitación resultó ser la variable más influyente en la recuperación aurífera, seguido del porcentaje de malla -200 y, en menor medida, la concentración de cianuro. Todas las variables presentan un efecto positivo sobre la disolución aurífera, incrementos en cualquiera de ellas favorecen la recuperación.
- Las interacciones tiempo – % malla -200 y cianuro – tiempo resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,05$), mostrando que la recuperación de oro no depende únicamente de factores aislados, sino de la combinación adecuada de las condiciones operativas.

- El estudio cinético arrojó que, bajo condiciones optimizadas según lo determinado por el software, la disolución aurífera se ajusta mejor al modelo de reacción química superficial (RQS), bajo condiciones operativas de planta el mecanismo gobernante fue la difusión en la capa producto (DCP). Esto determina que tras las modificaciones sugeridas por el software la etapa controlante pasa a ser la reacción química en el interfaz sólido líquido debido a cambios superficiales del mineral motivados por un mayor porcentaje de sólidos finos y una disminución en la fuerza de cianuro usado.

Recomendaciones

Bajo los resultados obtenidos es posible implementar, a nivel industrial y bajo control operativo, las condiciones optimizadas validadas en laboratorio para el mineral sulfurado aurífero que procesa la unidad productiva, los parámetros determinados de 90 % malla -200 y 1600 ppm de cianuro, con las cuales se obtuvo ~96,1 % de recuperación teórica y 95,50 % de recuperación real son obtenidas permiten una reducción significativa del consumo de cianuro respecto de 2 000 ppm utilizados en planta; por tanto, en operaciones se debe:

- Bajar la concentración de cianuro a 1 600 ppm para lograr los resultados obtenidos en la simulación, que permitirá mantener alta recuperación de oro. Asimismo, se debe controlar en tiempo real el flujo de la solución de cianuro que ingresa al circuito, instalando sensores en la entrada y salida del molino para que evalúe flujo y concentración de cianuro en la solución.
- Controlar de forma continua y permanente la molienda en un 90 % malla -200, de esta manera se podrá maximizar la recuperación de oro en el proceso. En la planta procesamos minerales con Work index diferentes por lo que es recomendable colocar a la salida del molino un sensor que determine el tamaño de partícula enlazado con un programa de control de molienda con la intención de regular la cantidad de mineral que ingresa al molino, de esta manera, en el caso de que la pulpa

presente una malla gruesa, el sistema indicará que el mineral es duro; por lo tanto; tendrá que disminuir parcialmente el flujo de alimentación al molino, así mismo, si la pulpa procesada denota mineral fino, el programa de control incrementará la alimentación del mineral al molino.

- Finalmente, la concentración de oxígeno presente en los tanques de agitación también tiene que ser tomada en cuenta, si esta concentración es baja afectará en la recuperación del mineral, si es necesario, se debe implementar la inyección de aire mediante un soplador o blower en estos tanques de agitación con pulpa para aumentar la concentración de oxígeno.

Referencias bibliográficas

- 911Metallurgist. (2017). *Cianuración de Oro y Plata*.
<https://metalurgia.911metallurgist.com/cianuracion-oro-plata/>
- Botz, M. (2024). *Basic cyanide chemistry : an essential guide for gold and silver leaching*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
<https://books.ms/main/18850517A0EA786094FC778D3A4D3272>
- BullionVault. (2014). *Minería de oro* . <https://oro.bullionvault.es/guia-oro/mineria-de-oro>
- Chavez, P. (2014). *Determinación de la dosificación óptima de cianuro para lograr la mayor recuperación de oro y plata en el proceso de lixiviación intensiva de concentrados* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9df58ffb-199c-4032-9b68-955f41cb8b44/content>
- Córdova, Y. (2019). *Evaluación metalúrgica a los minerales auríferos para la obtención del oro en la Compañía Minera Arias S.A – Huasahuasi, Tarma* [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1598/1/T026_47323967_T.pdf
- Figueredo, M., Pérez, Mi., Castellanos, J., García, I., Cabrera, I., Alcalá, R., Cortés, M., & Cárdenas, R. (2011). Ensayos de cianuración en botellas por agitación de menas auríferas oxidadas de baja ley. *Centro de Investigaciones Para La Industria Minero Metalúrgica Cuba*.
<https://docplayer.es/49732462-Ensayos-de-cianuracion-en-botellas-por-agitacion-de-menas-auriferas-oxidadas-de-baja-ley.html>
- Gonzáles, L. (2018). *Cianuro en la minería Introducción e importancia en la industria*. <https://blog.analitek.com/cianuro-en-la-mineria-introduccion-e-importancia-en-la-industria-0-1>
- Han, J., Dai, S., Deng, J., Que, S., & Zhou, Y. (2024). Technology for aiding the cyanide leaching of gold ores. *Separations 2024, Vol. 11, Page 228, 11(8), 228*. <https://doi.org/10.3390/SEPARATIONS11080228>

- Huapaya, P., Espejo, C., & Gonzáles, P. (2022). *Significativa Reducción del Consumo de Cianuro en la Lixiviación del oro permitió ahorros considerables en los costos operativos de Planta Procesos en Mina La Arena*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-443.pdf>
- Pérez, C. (2003). *Beneficio económico de minerales auríferos Boletín n°6*. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/367/6/G-006-Boletin_Beneficio_economico_minerales_auriferos.pdf
- Pino, J. (2014). *Estudio de la cianuración en tanques de la minera Antapite* [Universidad Nacional San Agustín]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/fb116502-1cbc-4325-999f-99011d9b3360/content>
- Pizzorni, B. (2021). Manual de buenas prácticas: Uso responsable del cianuro en la pequeña minería de oro. *Asociación Suiza de Oro Responsable*. <https://ororesponsable.org/wp-content/uploads/2021/06/Manual-uso-responsable-del-cianuro-BGI.pdf>
- Ramírez, A. (2016). *Estudio de implementación de una planta de cianuración de oro para una capacidad de 20 TMD* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f65aa29f-c058-4c71-be63-9709003556de/content>
- Romero, J. (2020). *Extracción del oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo SANDIOSS del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco - Chumbivilcas, Región Cusco* [Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6146/2/53T20200406_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Salazar, O. (2018). *Aptitud en la molienda de minerales mixto para la liberación de oro a nivel experimental de la empresa MACDESA*. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3859/BORRADOR%20DE%20TESIS%20-%20OMAR%20-11-11-2019.pdf?sequence=1>
- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, R., Patiño, F., Hernández, J., & Hernández, L. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. In *Rev. Soc. Quím. Méx* (Vol. 48).

- Saravia, S. (2018). *Optimización del proceso de cianuración en la minera VETA DORADA S.A.C.* [Universidad Nacional De San Agustín de Arequipa].
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a9390a08-e197-45c9-a871-b5a38010789f/content>
- Soto, A. (2021). *Influencia mineragráfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la minera Qero's Gold de Paucartambo – Cusco* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)].
https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/16117/Soto_ma.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UCA. (2007). *Análisis de tamaño de partículas.*
<http://geotech.uta.edu/lab/Main//sieve/index.htm>,
- Valdivia, C. (2018). *Evaluación del impacto de la implementación de un sistema de información en el proceso de lixiviación de pruebas en botellas en el laboratorio metalúrgico de minera Yanacocha* [Universidad Nacional de Cajamarca].
<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/2062/Tesis%20-%20SI%20de%20Lixiviaci%C3%B3n%20de%20minerales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vilca, L. (2018). *Estudio del proceso de cianuración de oro por HEAP LEACHING en la planta SOTRAMI S.A.*
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f600b8f4-ee18-42f9-a845-fc04b6346584/content>
- Yushandiana, F., Lisanul, A., & Sulaeman. (2023). Study on the effect of cyanide concentration on gold leaching recovery in ore at PT Indo Muro Kencana. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 7(2), 183.
<https://doi.org/10.20961/EQUILIBRIUM.V7I2.77833>

Anexos

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
¿Es posible reducir el consumo de cianuro de sodio utilizado en el procesamiento de mineral aurífero sulfurado mediante la aplicación de pruebas en botellas sin impactar significativamente la extracción de oro?	Determinar la concentración de cianuro de sodio que permita minimizar su consumo en la recuperación de oro en mineral aurífero sulfurado mediante lixiviación en botellas.	Es posible obtener un valor de extracción de oro adecuado disminuyendo el consumo de cianuro mediante la aplicación de lixiviación en botellas de mineral aurífero sulfurado.	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	
P1	OB1	H1	
¿La variabilidad en la composición química y mineralógica del mineral auríferos sulfurados pueden influir en la eficiencia de extracción de oro?	Caracterizar el mineral aurífero en términos de su composición química y mineralógica.	La composición química y la mineralogía tienen incidencia significativa en la extracción de oro en el mineral aurífero sulfurado.	
P2	OB2	H2	INDEPENDIENTE1: Concentración de cianuro de sodio DIMENSION: Cantidad de NaCN en solución UNIDAD: ppm INDEPENDIENTE2: Tiempo de agitación DIMENSION: Tiempo de lixiviación del mineral UNIDAD: horas INDEPENDIENTE 3: Porcentaje de malla DIMENSION: Porcentaje pasante de malla 200 UNIDAD: %
¿Las variables operativas concentración de cianuro, el tiempo de agitación y el porcentaje de partículas que pasan por la malla -200 pueden afectar la eficiencia de la extracción de oro?	Determinar el efecto de las variables concentración de cianuro, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la extracción de oro.	Las variables concentración de cianuro, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 tienen incidencia significativa en la recuperación de oro en el proceso de cianuración del mineral sulfurado.	
P3	OB3	H3	
¿La interacción entre la concentración de cianuro, el tiempo de agitación y el porcentaje de malla -200 tendrá influencia sobre la eficiencia de la recuperación de oro?	Determinar el efecto de las interacciones de concentración de cianuro, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la extracción de oro.	Existe una interacción significativa entre las variables concentración de cianuro, tiempo de agitación y porcentaje de malla -200 sobre la recuperación de oro.	