

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



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO CIL, PARA LA
EXTRACCIÓN DE ORO, EN LA EMPRESA COMERSA
INGENIERIA E.I.R.L-CHALA**

PRESENTADO POR:

Br. HECTOR DAVID SUNI VARGAS

Br. YOSFER QUISPE MAMANI

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

ASESOR:

Mgt. Ing. EDUARDO FABIAN ORTIZ SARAVIA

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Mgt. Ing. Eduardo Fabian ORTIZ SARAVIDA quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: **OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO CIL, PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO, EN LA EMPRESA COMERSA INGENIERIA E.I.R.L-CHALA.**

Presentado por: **Br. Hector David Suni Vargas** DNI N°73594651

presentado por: **Br. Yosfer Quispe Mamani** DNI N°: 735946956

Para optar el título Profesional/Grado Académico PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE **INGENIERO METALÚRGICO.**

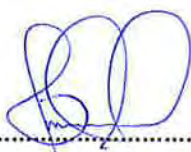
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por tres veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de **9 %**.

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 sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de julio de 2026


Firma

Post firma Mgt. Ing. Eduardo Fabian ORTIZ SARAVIDA

Nro. de DNI 23932525

ORCID del Asesor 0000-0002-6142-3459

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud:
oid: <https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:609098909?locale=es-MX>

Hector David - Yosfer SUNI VARGAS - QUISPE MA... TESIS - YOSFER Y HECTOR.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:609098909

161 páginas

Fecha de entrega

20 jul 2026, 11:03 a.m. GMT-5

32.298 palabras

Fecha de descarga

20 jul 2026, 11:16 a.m. GMT-5

191.260 caracteres

Nombre del archivo

TESIS - YOSFER Y HECTOR.pdf

Tamaño del archivo

3.0 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 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco; distinguidos señores miembros del jurado. En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, y con la finalidad de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, se presenta a su consideración el siguiente informe de tesis titulado:

“OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO CIL, PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO, EN LA EMPRESA COMERSA INGENIERÍA E.I.R.L. – CHALA”.

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación (CIL), a partir del análisis de las principales variables operativas que influyen en la eficiencia del proceso. El estudio se desarrolló en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala, provincia de Caravelí, región Arequipa.

Con la seguridad de que la presente investigación constituirá un aporte al desarrollo de la metalurgia del oro en el Perú y servirá como referencia para profesionales del sector minero–metalúrgico, quedamos atentos a sus valiosas observaciones y recomendaciones.

Br. Hector David Suni Vargas

Br. Yosfer Quispe Mamani

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para perseverar y culminar satisfactoriamente esta etapa de mi formación profesional.

A mi padre, Justiniano, y a mi madre, Felipa, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, así como por los valores inculcados, los cuales han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro académico. Asimismo, a mis hermanos que me inculcaron a esta vocación por mi profesión y tíos, por su constante aliento, comprensión y respaldo moral a lo largo de mi vida personal y académica.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

Yosfer Quispe Mamani

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a Dios, a madre Santusa Vargas Quispe, por su apoyo persistente, comprensión y motivación incondicional durante todo mi proceso de formación profesional, su ejemplo de esfuerzo y perseverancia ha sido fundamental para alcanzar este logro académico.

Y por último a todas aquellas personas que confiaron en mí, amigos y demás familiares, dándome consejos y siempre ayudándome a crecer.

Héctor David Suni Vargas

INDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	II
INDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
SIMBOLOGIA	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCION	VII
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Situación problemática.....	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Justificación.....	3
1.3.1 Conveniencia.....	3
1.3.2 Relevancia social.....	3
1.3.3 Relevancia tecnológica.....	4
1.3.4 Relevancia ambiental	4

	ii
1.3.5 Relevancia económica	4
1.3.6 Valor teórico	5
1.3.7 Ética y bioseguridad	5
1.4 Objetivos de investigación	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
CAPITULO II MARCO TEORICO	7
2.1 Antecedentes de la investigación.....	7
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	7
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3 Antecedentes locales	9
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 Proceso de cianuración.....	10
2.2.2 Métodos de cianuración.....	11
2.2.3 Mineralogía y caracterización del mineral aurífero	19
2.2.4 Variables que afectan la cianuración.....	22
2.2.5 Efecto de pH y Eh en la Cianuración del Oro.....	26
2.2.6 Termodinámica de la Cianuración	30
2.2.7 Naturaleza Electroquímica de la Cianuración.....	32
2.2.8 Cinética del Proceso de Cianuración.....	33

	iii
2.2.9 Minerales auríferos y su comportamiento en cianuración.....	38
2.2.10 Teoría de carbón activado.....	38
2.3 Diagrama de Pourbaix para la cianuración del oro.....	41
CAPITULO III HIPOTESIS Y VARIABLES.....	42
3.1 Hipótesis.....	42
3.1.1 Hipótesis general.....	42
3.1.2 Hipótesis específicas	42
3.2 Variables	42
3.2.1 Variables independientes	42
3.2.2 Variables dependientes	43
3.2.3 Operacionalización de variables	44
CAPITULO IV METODOLOGÍA.....	46
4.1 Ámbito de estudio: Localización política y geográfica	46
4.2 Tipo de investigación.....	51
4.3 Diseño de la investigación.....	51
4.4 Metodología de la investigación.....	52
4.5 Población, selección de la muestra, tamaño de muestra	53
4.5.1 Población	53
4.5.2 Muestra.....	54
4.5.3 Tamaño de muestra	54

4.6	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	55
CAPITULO V		56
TRABAJO EXPERIMENTAL.....		56
5.1	Muestreo y homogenización del mineral aurífero.....	57
5.1.1	Procedimiento de toma de muestra	58
5.1.2	Homogenización y reducción de la muestra.....	58
5.2	Preparación de muestras en laboratorio	63
5.2.1	Secado del mineral aurífero.....	63
5.2.2	Preparación de la pulpa para las pruebas de lixiviación.....	64
5.2.3	Obtención de las muestras de solución y de ripio	67
CAPITULO VI.....		70
ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS		70
6.1	Caracterización de la muestra y variables iniciales	70
6.1.1	Caracterización mineralógica de la zona.....	70
6.1.2	Principales especies minerales identificadas.....	71
6.2	Matriz del diseño experimental	72
6.3	Análisis de resultados según el diseño factorial	75
6.3.1	Determinación de las Variables de incidencia significativa en la recuperación	
	75	
6.3.2	Gráfica normal de los efectos estandarizados en la recuperación de oro	79

6.3.3	Efectos principales de cada variable en la recuperación del Oro.....	82
6.3.4	Efectos de las Interacciones de las Variables en la Recuperación de Oro.....	85
6.3.5	Análisis de Varianza (ANOVA) para la recuperación de oro.....	89
6.3.6	Ajuste y correlación del modelo de recuperación de oro	94
6.3.7	Estimación de coeficientes codificados del modelo matemático de recuperación	96
6.3.8	Modelo de Correlación para la optimización de la Recuperación de Au	101
6.3.9	Grafica de Contornos de Respuesta	102
6.3.10	Grafica de Superficie de Respuesta.....	111
6.3.11	Balance metalúrgico por prueba	120
6.3.12	Optimización de la Recuperación de Oro.....	122
6.3.13	Discusión integral de resultados.....	126
CONCLUSIONES		130
RECOMENDACIONES TECNICAS Y OPERATIVAS.....		131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	44
Tabla 2 Análisis Químico de Cabeza (Newmont).....	70
Tabla 3 Principales especies minerales identificadas	72
Tabla 4 Matriz del diseño experimental.....	74
Tabla 5 Análisis de Varianza	90
Tabla 6 Resumen del modelo.....	94
Tabla 7 Coeficientes codificados.....	97
Tabla 8 Modelo de correlación para la optimización.....	101
Tabla 9 Balance Metalúrgico	121
Tabla 10 Balance de pulpa por cada corrida experimental	122
Tabla 11 Parámetros de optimización.....	122
Tabla 12 Solución.....	122
Tabla 13 Predicción de respuesta múltiple	122
Tabla 14 Matriz de consistencia.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cianuración en estanques o patios	13
Figura 2 Cianuración por agitación en tanques.....	14
Figura 3 Diagrama Eh-pH para el sistema CN-H ₂ O, concentración de cianuro 10 ⁻³ molar	24
Figura 4 Diagrama Eh - pH para el Sistema Oro - Agua a 25°C.....	28
Figura 5 Diagrama Eh - pH para el Sistema Oro - Cianuro, a 25°C	29

Figura 6 Diagrama Eh - pH para el Sistema de Oro - Cianuro - Agua, a 25°C	30
Figura 7 Diagrama de estabilidad Potencial - pH para el Sistema Au-H ₂ O-Cl a 25°C.....	31
Figura 8 Disolución del oro en soluciones cianuradas	33
Figura 9 Representación Esquemática de una Celda de Corrosión Local en la Superficie del Oro	35
Figura 10 Diagrama de Pourbaix para la cianuración del Oro.....	41
Figura 11 Ubicación geográfica de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.....	48
Figura 12 Diagrama de flujo de la empresa.....	50
Figura 13 Etapas del procedimiento experimental.....	57
Figura 14 Toma de muestra del mineral.....	59
Figura 15 Muestras para las 16 pruebas experimentales	60
Figura 16 Muestreo y Homogenización del Mineral Aurífero	61
Figura 17 Muestreo por puntos para obtener muestras para pruebas experimentales a malla 90%	62
Figura 18	64
Figura 19 Adición de cianuro y hidróxido de sodio en las botellas	66
Figura 20 Monitorio para reposición de cianuro.....	69
Figura 21 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	76
Figura 22 Gráfica normal de efectos estandarizados.....	79
Figura 23 Gráfica de efectos principales para Recuperación.....	83
Figura 24 Gráfica de interacción para Recuperación	86
Figura 25 Gráfica de contorno de Recuperación vs Concentración de cianuro, %So.....	102
Figura 26 Gráfica de contorno de Recuperación vs Tiempo de cianuración, % Solid.....	104

Figura 27	Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría, % Solidos	105
Figura 28	Gráfica de contorno de Recuperación vs. Tiempo de cianuración; Concent.....	107
Figura 29	Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría; Concentración de cianuro	108
Figura 30	Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría; Tiempo de cianuración....	110
Figura 31	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Concentración de cianuro; %.....	111
Figura 32	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Tiempo de cianuración, % Sol	113
Figura 33	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; % Solidos.....	114
Figura 34	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Tiempo de cianuración; Concentración .	116
Figura 35	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; Concentración	117
Figura 36	Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; Tiempo de cianuración	119
Figura 37	Predicción de respuesta múltiple.....	123
Figura 38	Informe sobre aportes del trabajo en la empresa	139
Figura 39	Certificado de Prueba de Cianuración por Agitación.....	140
Figura 40	Certificado de Prueba de Cianuración.....	141

SIMBOLOGIA

Au :	Oro
NaCN :	Cianuro de sodio
CIL :	Carbón in Leach (lixiviación con carbón activado)
R (%) :	Recuperación de oro
D :	Función de deseabilidad
pH :	Potencial de hidrógeno de la pulpa
t :	Tiempo de cianuración (h)
C_NaCN :	Concentración de cianuro de sodio (ppm)
%S :	Porcentaje de sólidos en la pulpa
G :	Granulometría del mineral (% pasante)
–200 mallas :	Tamaño de partícula de referencia
ρ_s :	Densidad del sólido (g/cm ³)
rpm :	Revoluciones por minuto (velocidad de agitación)
ANOVA :	Análisis de varianza
R ² :	Coeficiente de determinación
R ² _aj :	Coeficiente de determinación ajustado
EE :	Error estándar del modelo
$\hat{y}$:	Valor estimado de la recuperación de oro
TM:	Tonelada métrica
L:	Litro
mg:	Miligramos

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la recuperación de oro mediante el proceso CIL en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala, provincia de Caravelí, región Arequipa. El estudio evaluó el efecto del porcentaje de sólidos, la concentración de cianuro de sodio, la granulometría del mineral y el tiempo de cianuración sobre la eficiencia del proceso, manteniendo constantes el pH y la velocidad de agitación. La metodología empleada se basó en un diseño experimental factorial, complementado con análisis de varianza (ANOVA), gráficos de efectos principales, análisis de interacciones y superficies de respuesta, utilizando el software Minitab 19. Los resultados evidenciaron que la granulometría y el tiempo de cianuración fueron las variables de mayor incidencia significativa ($p < 0,05$) en la recuperación de oro, seguidas por la concentración de cianuro, mientras que el porcentaje de sólidos presentó un efecto menor. Se obtuvo una recuperación de oro que varió entre 91,3 % y 98,3 % dentro del dominio experimental evaluado. La optimización mediante la función de deseabilidad permitió establecer condiciones óptimas de operación correspondientes a una granulometría cercana al 90 % pasante, un tiempo de cianuración de 48 h, una concentración de cianuro de 1500 ppm y un porcentaje de sólidos de 35 %, alcanzándose una recuperación ajustada de 98,32 %, con una deseabilidad global de 0,91. El modelo estadístico presentó un adecuado ajuste y capacidad predictiva, validando su aplicación como herramienta de apoyo para la optimización del proceso CIL en plantas auríferas de mediana escala.

Palabras clave: Proceso CIL, Recuperación de oro, Cianuración, Optimización metalúrgica.

ABSTRACT

This research aimed to optimize gold recovery through the carbon-in-leach (CIL) process at COMERSA Ingeniería E.I.R.L., located in the district of Chala, Caravelí Province, Arequipa Region. The study evaluated the effect of solids percentage, sodium cyanide concentration, ore particle size, and cyanidation time on process efficiency, while maintaining constant pH and agitation speed. A factorial experimental design was applied, complemented by analysis of variance (ANOVA), main effects and interaction analyses, and response surface methodology using Minitab 19 software. The results showed that ore particle size and cyanidation time were the variables with the highest significant influence on gold recovery ($p < 0.05$), followed by cyanide concentration, whereas solids percentage had a minor effect. Gold recovery ranged from 91.3% to 98.3% within the evaluated experimental domain. Optimization using the desirability function established optimal operating conditions at approximately 90% passing size, a cyanidation time of 48 h, a sodium cyanide concentration of 1500 ppm, and a solids percentage of 35%, achieving an adjusted gold recovery of 98.32% with an overall desirability of 0.91. The statistical model showed good fit and predictive capability, validating its applicability as a decision-support tool for optimizing the CIL process in medium-scale gold processing plants.

Keywords: CIL process, Gold recovery, Cyanidation, Metallurgical optimization.

INTRODUCCION

La minería aurífera constituye una de las actividades económicas de mayor relevancia en el Perú, tanto por su aporte al producto interno bruto como por su contribución al desarrollo regional y a la generación de empleo. En este contexto, la metalurgia del oro desempeña un rol estratégico, dado que la eficiencia de los procesos de extracción condiciona directamente la rentabilidad, sostenibilidad y competitividad de las operaciones mineras. Entre los métodos más utilizados para la recuperación de oro a partir de minerales auríferos destaca la lixiviación con cianuro, particularmente el proceso de carbón en lixiviación (CIL), debido a su elevada eficiencia metalúrgica y a su amplia aplicación en plantas de pequeña, mediana y gran escala.

Sin embargo, la eficiencia del proceso CIL no depende únicamente de su implementación, sino del control adecuado de un conjunto de variables operativas que influyen de manera directa en la cinética de disolución del oro y en la estabilidad del sistema. Variables como la granulometría del mineral, el porcentaje de sólidos en la pulpa, la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración resultan determinantes para alcanzar recuperaciones óptimas. En la práctica industrial, especialmente en operaciones de pequeña y mediana minería, estas variables suelen ajustarse de forma empírica, lo que puede generar pérdidas de recuperación, consumos innecesarios de reactivos y una operación inestable del proceso.

La empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala, provincia de Caravelí, región Arequipa, desarrolla el proceso CIL para la extracción de oro a partir de minerales auríferos con características mineralógicas variables. En este escenario operativo, se evidencia la necesidad de evaluar de manera sistemática la influencia de las principales variables del proceso sobre la recuperación de oro, así como de establecer condiciones óptimas de operación que

permitan maximizar la eficiencia metalúrgica y mejorar el desempeño global del proceso, en concordancia con criterios técnicos, económicos y ambientales.

Desde el punto de vista metodológico, la optimización de procesos metalúrgicos requiere el empleo de enfoques cuantitativos que permitan analizar simultáneamente la incidencia individual y combinada de múltiples variables. En este sentido, el uso de diseños experimentales y herramientas estadísticas constituye una alternativa robusta frente a los métodos tradicionales de análisis univariado. El análisis de varianza (ANOVA), el estudio de efectos principales e interacciones y la metodología de superficies de respuesta permiten identificar variables significativas, comprender su comportamiento conjunto y modelar matemáticamente el proceso, proporcionando una base objetiva para la toma de decisiones operativas.

En coherencia con lo anterior, la presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, aplicado y explicativo, orientado a optimizar las variables del proceso CIL para la extracción de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L. La hipótesis central plantea que la optimización conjunta de las variables operativas críticas permite incrementar significativamente la recuperación de oro, respecto a condiciones operativas no optimizadas. Los resultados obtenidos a lo largo del estudio validan esta hipótesis, demostrando que la aplicación de un enfoque experimental y estadístico conduce a mejoras sustanciales en la eficiencia metalúrgica del proceso.

Asimismo, la aplicación de técnicas de optimización mediante la función de deseabilidad permite integrar los resultados estadísticos y metalúrgicos en la determinación de condiciones operativas óptimas dentro del dominio experimental evaluado. De este modo, la investigación no solo contribuye al conocimiento científico en el ámbito de la metalurgia del oro, sino que también ofrece una herramienta práctica para la mejora continua y la estandarización de parámetros operativos en planta.

El desarrollo de la presente tesis se organiza en seis capítulos, estructurados de manera lógica y coherente con los objetivos e hipótesis planteados:

Capítulo I: Planteamiento del problema, donde se expone el contexto de la investigación, se formulan el problema, los objetivos y la hipótesis, y se justifica la importancia técnica y práctica del estudio.

Capítulo II: Marco teórico, en el cual se desarrollan los fundamentos conceptuales y teóricos relacionados con la metalurgia del oro, el proceso CIL, la cianuración, las variables operativas del proceso y las bases del diseño experimental y análisis estadístico.

Capítulo III: Metodología, que describe el enfoque de investigación, el diseño experimental aplicado, la definición de variables, los procedimientos experimentales y las herramientas estadísticas empleadas para el análisis de los datos.

Capítulo IV: Resultados, donde se presentan de manera ordenada los resultados experimentales obtenidos, incluyendo el análisis de efectos principales, interacciones, ANOVA, modelos matemáticos, superficies de respuesta y optimización del proceso.

Capítulo V: Discusión de resultados, en el cual se interpretan los resultados obtenidos, se contrastan con antecedentes y fundamentos teóricos, y se analiza su coherencia con los objetivos e hipótesis de la investigación.

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones, que sintetiza los principales hallazgos del estudio y propone recomendaciones técnicas y operativas orientadas a la optimización del proceso CIL en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

A nivel mundial, la minería aurífera constituye una actividad económica de gran importancia; sin embargo, genera impactos ambientales significativos, tales como deforestación, contaminación por cianuro y metales pesados, así como degradación de suelos y recursos hídricos. Entre 2005 y 2015, esta actividad fue responsable de una importante pérdida de cobertura forestal en regiones tropicales (Sabillo, 2024).

En América Latina, la minería artesanal y de pequeña escala representa una de las principales fuentes de contaminación por mercurio, liberando entre 675 y 1000 toneladas anuales a la atmósfera. En el Perú, sexto productor mundial de oro y líder en América Latina, la actividad aurífera aporta significativamente a las exportaciones nacionales. Sin embargo, gran parte de la producción proviene de la minería artesanal e informal, sector que involucra aproximadamente a 250 000 personas y genera importantes impactos ambientales asociados al uso de mercurio y a la expansión de actividades extractivas no reguladas (Abadie, 2022).

En la localidad de Chala, provincia de Caravelí, región Arequipa, la empresa Comersa Ingeniería E.I.R.L. procesa minerales auríferos mediante el método de carbón en lixiviación (CIL), cuya eficiencia depende de variables operativas como la concentración de cianuro, la granulometría del mineral y el tiempo de residencia en los tanques de agitación (Autoridad Regional Ambiental Arequipa, 2022).

Uno de los principales problemas de la empresa es la heterogeneidad mineralógica de los minerales tratados, que contienen tanto especies oxidadas como sulfuradas. La presencia de

sulfuros y minerales cianicidas incrementa el consumo de cianuro y reduce la recuperación de oro. Asimismo, una granulometría inadecuada limita la liberación del metal valioso o genera lamas que afectan la adsorción en el carbón activado. Del mismo modo, tiempos de residencia no optimizados disminuyen la eficiencia del proceso metalúrgico.

Estas deficiencias repercuten directamente en la rentabilidad de la operación debido a la reducción de la recuperación de oro y al incremento del consumo de reactivos. Adicionalmente, un uso ineficiente de cianuro incrementa los riesgos ambientales asociados a efluentes y relaves, dificultando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y de estándares internacionales de gestión responsable del cianuro (Galagarza et al., 2021).

En este contexto, resulta necesario optimizar los parámetros operativos del proceso CIL en Comersa Ingeniería E.I.R.L., con el propósito de incrementar la recuperación de oro, reducir costos operativos y fortalecer la sostenibilidad ambiental y competitividad de la empresa.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera la optimización conjunta de las variables operativas del proceso CIL influyen en la maximización de la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., Chala?

1.2.2 Problemas específicos

PE1: ¿Cómo influye la concentración de cianuro de sodio en la recuperación de oro durante el proceso CIL aplicado en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.?

PE2: ¿De qué manera la granulometría del mineral afecta la recuperación de oro en el proceso CIL?

PE3: ¿Cuál es el efecto del porcentaje de sólidos en la pulpa sobre la recuperación de oro en el proceso CIL?

PE4: ¿Cómo influye el tiempo de cianuración en la recuperación de oro durante el proceso CIL?

1.3 Justificación

1.3.1 Conveniencia

La investigación resulta pertinente porque responde a la necesidad de optimizar la extracción de oro en la planta de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en Chala, donde se presentan limitaciones en la extracción debido a factores asociados a la granulometría del mineral y a la dosificación del cianuro en el proceso de carbón en lixiviación (CIL). Este trabajo permitirá generar información técnica confiable para incrementar la eficiencia del proceso metalúrgico, reducir pérdidas de oro y mejorar la estabilidad de la operación. Asimismo, los resultados podrán servir de referencia para otras plantas de beneficio de mediana escala instaladas en la zona sur del Perú, particularmente en Arequipa y Ayacucho, donde predominan operaciones auríferas similares.

1.3.2 Relevancia social

La minería aurífera en la costa sur peruana, especialmente en Chala, constituye una fuente de empleo directo e indirecto, además de dinamizar la economía local a través de servicios asociados. Mejorar la eficiencia de recuperación en la planta de COMERSA Ingeniería E.I.R.L. no solo fortalece la estabilidad económica de la empresa, sino que también garantiza la continuidad laboral para sus trabajadores y aportará al desarrollo socioeconómico de la comunidad. De igual modo, un proceso optimizado contribuirá a minimizar conflictos sociales relacionados con el

manejo de residuos y uso de agua, promoviendo una mayor aceptación social de la actividad minera.

1.3.3 Relevancia tecnológica

Desde la perspectiva tecnológica, el estudio propone la optimización de variables críticas como la concentración de cianuro y la granulometría del mineral, mediante el uso de un diseño experimental factorial que permitirá identificar las condiciones más favorables de operación. Este enfoque favorece la estandarización de parámetros de control en el proceso CIL, elevando el nivel tecnológico de la empresa y sentando bases para la transferencia de conocimiento hacia otras unidades productivas del sector aurífero.

1.3.4 Relevancia ambiental

El uso de cianuro en procesos de lixiviación representa un riesgo ambiental significativo si no se maneja adecuadamente, por lo cual optimizando las variables de operación permitirá reducir el consumo innecesario de este reactivo. Con ello, la empresa se ajustará a las regulaciones ambientales nacionales (MINAM, OEFA) y estándares internacionales como el International Cyanide Management Code (ICMC), reduciendo los impactos negativos sobre el medio ambiente y promoviendo una gestión más responsable y sostenible de los recursos minerales.

1.3.5 Relevancia económica

La recuperación de oro tiene un impacto directo en la rentabilidad de la operación. Incrementar algunos puntos porcentuales en la eficiencia de extracción implica un aumento significativo en los ingresos anuales de la empresa, al producir más oro con el mismo volumen de mineral y con un consumo optimizado de insumos. Para COMERSA Ingeniería E.I.R.L., esta mejora significará una mayor rentabilidad y la posibilidad de sostener su crecimiento en un entorno altamente competitivo como el de la minería en Chala.

1.3.6 Valor teórico

El estudio aportará al campo académico de la metalurgia extractiva, en particular al conocimiento de los procesos de cianuración con carbón en lixiviación (CIL). La investigación permitirá contrastar teorías sobre la cinética de disolución del oro y la influencia de variables como el tamaño de partícula y la dosificación del reactivo. Esto genera aportes para futuros trabajos de investigación, publicaciones científicas y programas de formación universitaria en ingeniería de minas y metalurgia, contribuyendo a consolidar un marco teórico más sólido en torno a la optimización de procesos auríferos.

1.3.7 Ética y bioseguridad

La presente investigación se desarrollará bajo criterios éticos y de bioseguridad que garanticen la integridad de las personas, el respeto al medio ambiente y el manejo responsable de los insumos utilizados. El uso de cianuro de sodio (NaCN), por su alta toxicidad, se efectuará bajo estrictas medidas de protección, incluyendo el empleo obligatorio de equipos de protección personal (EPP) tales como guantes, mascarillas, gafas de seguridad, mandiles y calzado cerrado. Además, los reactivos serán manipulados en áreas ventiladas, evitando su contacto directo con la piel y previniendo derrames o fugas hacia el medio ambiente. Asimismo, los residuos generados durante las pruebas experimentales serán tratados de acuerdo con las disposiciones del Reglamento para la Gestión de Residuos Sólidos Peligrosos (D.S. N° 009-2019-MINAM) y las directrices del International Cyanide Management Code (ICMC, 2023), garantizando una disposición segura y la neutralización de efluentes con cal antes de su vertimiento.

Desde el punto de vista ético, el proyecto no involucra experimentación con seres humanos ni animales, por lo que no genera conflicto bioético. Sin embargo, se resalta el compromiso del

investigador con los principios de responsabilidad ambiental, transparencia y veracidad en la obtención, procesamiento y presentación de resultados.

1.4 Objetivos de investigación

1.4.1 Objetivo general

Optimizar las variables operativas del proceso CIL con el fin de maximizar la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

1.4.2 Objetivos específicos

OE1: Determinar el efecto de la concentración optima de cianuro de sodio en el proceso CIL para la recuperación de oro aplicado en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

OE2: Determinar la influencia de la granulometría del mineral en la recuperación de oro durante el proceso CIL.

OE3: Analizar el efecto del porcentaje de sólidos en la pulpa sobre la recuperación de oro en el proceso CIL.

OE4: Determinar la influencia del tiempo optimo de cianuración en la recuperación de oro durante el proceso CIL.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Kassymova et al. (2025), en Kazajistán, evaluaron la recuperación de cobre a partir de soluciones de lixiviación cianurada de minerales oro-cobre mediante un diseño experimental probabilístico-determinístico. Los resultados demostraron que la concentración inicial de cobre y el pH fueron los factores más influyentes en la precipitación. La mejor alternativa fue la precipitación de cobre como cianuro de cobre hidratado sin adición de Na_2S , alcanzando recuperaciones cercanas al 87 %. Asimismo, los modelos matemáticos desarrollados permitieron predecir con precisión el comportamiento del proceso.

Motasim et al. (2024), en Sudán, analizaron la caracterización mineralógica y el control de calidad en una planta CIL. Determinaron que el mineral estaba compuesto principalmente por silicatos y presentaba condiciones favorables para la cianuración directa. Los resultados mostraron una ley de oro de 9,7 g/t en el mineral y 0,6 g/t en los relaves, evidenciando el potencial de recianuración. Además, el control de calidad permitió mantener condiciones operativas estables, logrando recuperaciones superiores al 90 % de oro mediante el proceso CIL.

Gorji et al. (2020), en Irán, investigaron el uso de bacterias cianogénicas como alternativa a la cianuración convencional para la extracción de oro. Los resultados evidenciaron que las cepas evaluadas produjeron cantidades significativas de cianuro biológico y permitieron obtener recuperaciones superiores al 80 % bajo condiciones optimizadas de pH y pretratamiento del mineral. Los autores concluyeron que la biocianuración representa una alternativa prometedora

para mejorar la recuperación de oro y reducir los impactos ambientales asociados al uso de cianuro químico..

2.1.2 Antecedentes nacionales

Angles (2023), en una investigación desarrollada en la Cooperativa Minera CECOMIRL L.T.D.A. de Puno, evaluó la cianuración de minerales refractarios de oro mediante la adición de nitrato de plomo. Empleando un diseño experimental factorial 2^3 , analizó la influencia de la concentración de nitrato de plomo, cianuro de sodio y pH sobre la recuperación de oro. Los resultados mostraron que, bajo condiciones óptimas de 250 g/Tn de nitrato de plomo, 2 g/L de NaCN y pH 10.5, se alcanzó una recuperación máxima de 97.24 %, confirmando el efecto favorable del nitrato de plomo en la disolución del oro.

Abadie (2022), en una unidad minera de Ayacucho, realizó una evaluación metalúrgica de minerales auríferos con alto contenido de cianicidas. Mediante pruebas de laboratorio bajo condiciones similares a las de planta, determinó que recuperaciones superiores al 90 % para el oro y alrededor del 70 % para la plata son posibles cuando se controlan adecuadamente variables como pH, granulometría, concentración de cianuro y tiempo de lixiviación. Asimismo, identificó al cobre como el principal elemento cianicida, debido a su influencia en el incremento del consumo de cianuro y la disminución de la recuperación metálica.

Pimentel (2021), en la investigación sobre la puesta en marcha de una planta de lixiviación de oro de Minera Artesanal San Luis S.A., destacó la importancia de implementar sistemas de gestión de seguridad y medio ambiente orientados a garantizar la continuidad operativa, la protección de los trabajadores y la sostenibilidad ambiental. El estudio concluye que la capacitación permanente, la innovación tecnológica, el cumplimiento normativo y la gestión

responsable de los recursos constituyen factores fundamentales para el éxito y sostenibilidad de las operaciones de lixiviación aurífera.

2.1.3 Antecedentes locales

Taipe y Challco (2025), en la investigación realizada en la mina Hatun K'asa, ubicada en Livitaca, Chumbivilcas (Cusco), evaluaron la lixiviación por agitación utilizando el reactivo Sandioss para la recuperación de oro. Mediante un diseño experimental factorial analizaron la influencia de la concentración del reactivo, el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación. Los resultados mostraron recuperaciones de oro de hasta 66.75 %, evidenciando que el incremento controlado de la concentración de Sandioss, junto con tiempos adecuados de residencia y un manejo óptimo del contenido de sólidos, mejora significativamente la extracción del metal precioso.

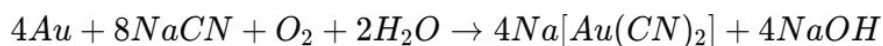
Molina y Vizarreta (2025), en el yacimiento Chapiña, distrito de Colquemarka, provincia de Chumbivilcas (Cusco), evaluaron la influencia de diversas variables operativas en la extracción de oro mediante lixiviación por agitación utilizando el reactivo Gold Max. El estudio se desarrolló mediante un diseño factorial considerando la concentración del reactivo, el porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación. Los resultados determinaron que las condiciones óptimas de operación correspondieron a una concentración de Gold Max de 0.08 %, 30 % de sólidos y 36 horas de lixiviación, alcanzándose una recuperación de oro de 96.24 %. Los autores concluyeron que Gold Max constituye una alternativa eficiente y ambientalmente favorable para la recuperación de oro, logrando recuperaciones superiores al 90 % y reduciendo la dependencia de reactivos cianurados tradicionales.

2.2 Bases teóricas

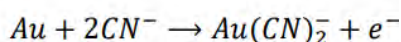
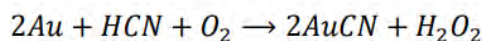
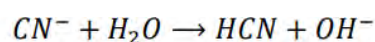
2.2.1 Proceso de cianuración

La cianuración es un método hidrometalúrgico ampliamente empleado para la extracción de oro, especialmente en minerales de baja ley. Este proceso se basa en la capacidad del cianuro de sodio (NaCN) de disolver el oro metálico formando un complejo soluble, lo que permite luego recuperarlo mediante diversos métodos físicos y químicos (Merli et al., 2022).

El principio químico que sustenta la cianuración se representa mediante la ecuación de Elsner, en la que el oro reacciona con cianuro y oxígeno disuelto en agua, produciendo un complejo soluble de aurocianuro de sodio y liberando hidróxido de sodio:



Otras reacciones que pueden ocurrir durante el proceso de lixiviación cianurada son:



En estas reacciones, el cianuro actúa como agente lixivante y el oxígeno como oxidante. La eficiencia del proceso depende de varios factores, incluyendo la concentración de cianuro, el pH, la granulometría del mineral y la presencia de elementos cianicidas, como cobre, hierro y zinc, los cuales consumen cianuro y reducen la recuperación de oro (Kassymova et al., 2025).

2.2.1.1 Etapas del proceso

- 1. Preparación del mineral:** Antes de la cianuración, el mineral se somete a molienda para liberar las partículas de oro y aumentar la superficie de contacto con la solución de cianuro. El tamaño de partícula se controla cuidadosamente para optimizar la

lixiviación sin generar excesivos lodos. Generalmente, se busca que el 80% del mineral pase por mallas 200 a 270.

2. **Lixiviación:** El mineral molido se mezcla con la solución de cianuro alcalino y se mantiene bajo agitación continua en tanques o pulpas, asegurando una adecuada transferencia de masa. La disolución del oro ocurre progresivamente y es favorecida por un pH controlado (10-11) y la presencia de oxígeno disuelto.
3. **Recuperación del oro:** Una vez que el oro se encuentra en solución, puede recuperarse mediante:
 - Adsorción en carbón activado (CIL/CIP), donde el oro se adhiere al carbón y luego se recupera.
 - Cementación con zinc, que desplaza químicamente el oro precipitando el metal.
 - Electrodeposición, que permite recuperar el oro mediante corriente eléctrica.
4. **Manejo de residuos:** El proceso genera colas y soluciones residuales con cianuro y metales disueltos, los cuales deben tratarse cuidadosamente para neutralizar el cianuro, recuperar la solución y minimizar impactos ambientales (Pimentel, 2021).

2.2.2 Métodos de cianuración

La cianuración del oro constituye uno de los procesos hidrometalúrgicos más empleados en la industria minera a nivel mundial debido a su alta eficiencia para disolver metales preciosos, incluso en menas de baja ley. Existen diversas modalidades del proceso, las cuales se diferencian principalmente por la forma en que se pone en contacto la pulpa del mineral con la solución de

cianuro y por la etapa en la que se realiza la adsorción o recuperación del metal disuelto (Gorji et al., 2020). Entre los métodos más relevantes se destacan los siguientes:

2.2.2.1 Cianuración por percolación en pilas (Heap Leaching)

La cianuración en pilas o heap leaching es un método ampliamente utilizado para la recuperación de oro en minerales de baja ley debido a su bajo costo de inversión y operación. Consiste en depositar mineral triturado sobre plataformas impermeabilizadas y regarlo con una solución diluida de cianuro de sodio, la cual percola a través de la pila disolviendo el oro contenido. La solución rica obtenida es recolectada y sometida a procesos de recuperación como adsorción en carbón activado o precipitación con zinc (Merli et al., 2022; Kassymova et al., 2025).

Entre sus principales ventajas destacan la capacidad de procesar grandes volúmenes de mineral y su aplicación en operaciones a cielo abierto. Sin embargo, presenta recuperaciones moderadas (50–70 %), largos tiempos de lixiviación y riesgos ambientales asociados a posibles filtraciones de soluciones cianuradas (Pimentel, 2021).

Las variables operativas más importantes son la granulometría del mineral, la altura de la pila, la concentración de cianuro, el pH y la tasa de riego, las cuales influyen directamente en la eficiencia de la lixiviación. Por ello, este método resulta más adecuado para minerales oxidados de baja ley y con escasa presencia de minerales refractarios o cianicidas (International Cyanide Management Institute, 2021a)..

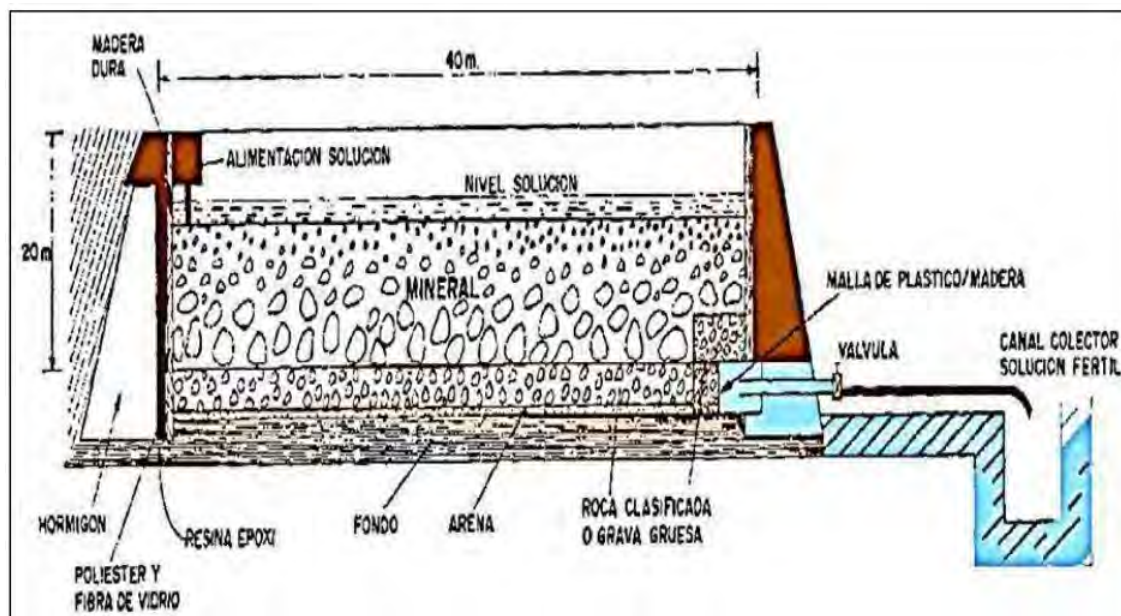
2.2.2.2 Cianuración en estanques o patios (Vat Leaching)

La cianuración en estanques o patios (vat leaching) es un método tradicional de extracción de oro que consiste en colocar mineral triturado en estanques o recipientes de gran capacidad, donde permanece en contacto con una solución de cianuro durante un tiempo determinado para

disolver el oro contenido. La solución rica obtenida es posteriormente tratada mediante adsorción en carbón activado o precipitación química para recuperar el metal.

Figura 1

Cianuración en estanques o patios



Nota: Metallum Perú. (2023). Proceso de lixiviación de minerales auríferos.

Entre sus principales ventajas destacan el mejor control de variables operativas como el pH, la concentración de cianuro y el tiempo de contacto, así como recuperaciones superiores al heap leaching, que pueden alcanzar entre 70 % y 85 %. Sin embargo, presenta mayores costos de construcción y operación, baja eficiencia por las etapas de carga y descarga del mineral, y limitada aplicabilidad en minerales refractarios o con alta presencia de cianicidas.

Aunque ha sido desplazado por tecnologías más modernas, este método aún se emplea en operaciones artesanales y de pequeña escala para el tratamiento de minerales oxidados de ley intermedia (International Cyanide Management Institute, 2022)..

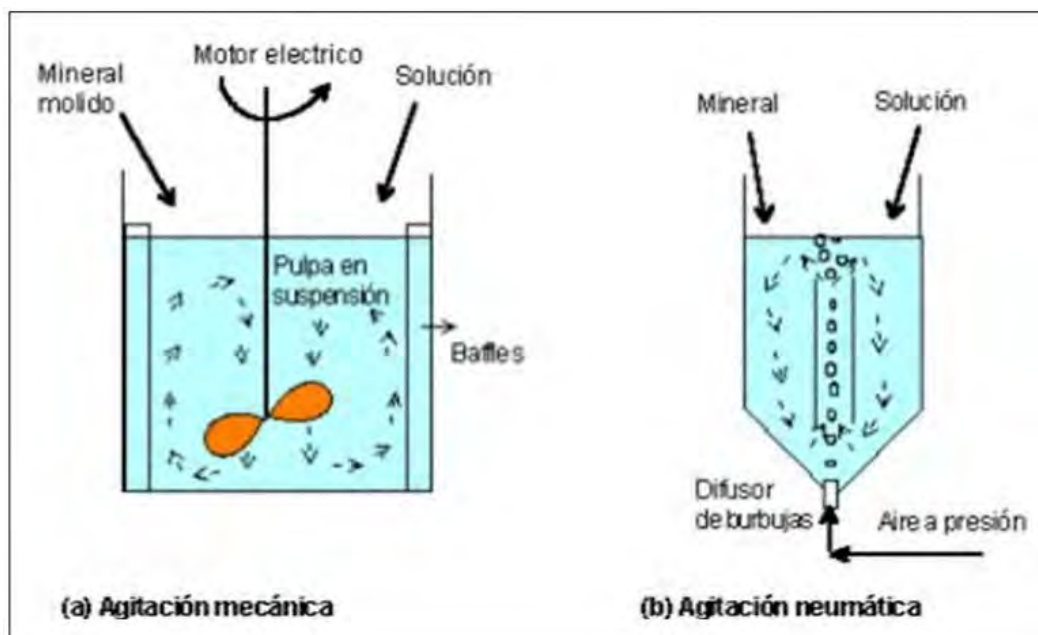
2.2.2.3 Cianuración por agitación en tanques (Agitated Tank Leaching)

La cianuración por agitación en tanques, también conocida como agitated tank leaching, es uno de los métodos más eficientes y ampliamente utilizados en la minería aurífera moderna. Este

proceso se aplica principalmente a minerales de granulometría fina, obtenidos tras la molienda del mineral, lo cual favorece la liberación del oro contenido y aumenta la superficie de contacto con la solución cianurada (Merli et al., 2022).

Figura 2

Cianuración por agitación en tanques



Nota: Adaptado de “The Chemistry of Gold Extraction”, Society for Mining, Metallurgy and Exploration

El procedimiento consiste en transferir la pulpa (mezcla de mineral molido con agua) a una serie de tanques dispuestos en cascada. Dentro de estos tanques se inyecta aire comprimido o se utilizan agitadores mecánicos que permiten mantener el material en suspensión, asegurando una adecuada homogenización de la pulpa y el reactivo. Esta agitación intensifica el proceso de disolución del oro, ya que facilita la penetración del cianuro en las partículas y mejora el transporte de oxígeno, componente fundamental en la reacción química de la cianuración (Eniowo, 2025).

La solución rica en oro (denominada solución pregnant) obtenida al final del circuito es sometida a procesos de recuperación, tales como:

- CIP (Carbon in Pulp): el oro es adsorbido por carbón activado directamente en la pulpa.
- CIL (Carbon in Leach): el carbón activado se introduce en los mismos tanques de lixiviación, logrando una mayor eficiencia en el contacto mineral–carbón.
- Merrill-Crowe: precipitación con zinc, previa clarificación de la solución.

Actualmente, la cianuración en tanques constituye el método más utilizado en plantas industriales de mediana y gran escala, dado que combina altos niveles de recuperación con un control operacional eficiente, lo que la convierte en la técnica de referencia en la metalurgia del oro (International Cyanide Management Institute, 2022).

2.2.2.4 Procesos con carbón activado: CIP y CIL

Dentro de los métodos de cianuración, los procesos con carbón activado han marcado un avance fundamental en la recuperación de oro a nivel industrial. Su aplicación se ha consolidado debido a su alta eficiencia, versatilidad y reducción de costos frente a métodos tradicionales como la precipitación Merrill-Crowe. Entre los más utilizados se encuentran el Carbon in Pulp (CIP) y el Carbon in Leach (CIL), ambos basados en la capacidad de adsorción del carbón activado para retener los complejos de oro-cianuro presentes en la solución (Deveci et al., 2023).

a. Proceso CIP (Carbon in Pulp)

En el proceso CIP, el mineral previamente sometido a lixiviación por agitación se mantiene en suspensión como pulpa dentro de tanques. Posteriormente, se incorpora carbón activado en contacto con la pulpa ya lixiviada. El carbón tiene la propiedad de adsorber selectivamente el complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ presente en la solución rica, lo cual permite concentrar el oro en el carbón. Una vez saturado, el carbón cargado (conocido como loaded carbon) es separado de la pulpa

mediante cribas y trasladado a un circuito de desorción y electrólisis, donde el oro es recuperado y el carbón es reactivado para ser reutilizado (Kim et al., 2024).

Características principales del CIP:

- El carbón se introduce después de la lixiviación.
- Se requieren etapas adicionales de clarificación y cribado para separar el carbón de la pulpa.
- Eficiente para minerales con bajas concentraciones de oro en solución.

b. Proceso CIL (Carbon in Leach)

El proceso CIL representa una variante más avanzada, en la cual el carbón activado se añade directamente a los tanques de lixiviación, en conjunto con la solución cianurada y la pulpa mineral. De esta manera, la disolución del oro y su adsorción en el carbón ocurren de forma simultánea, lo que aumenta la eficiencia global del proceso y reduce los tiempos de residencia (Karppinen et al., 2024).

El CIL es especialmente recomendable en minerales de baja ley o cuando se busca una mayor recuperación en comparación con el CIP. Además, al integrar la adsorción y lixiviación en un solo paso, se reduce el número de equipos necesarios y se optimizan los costos operativos (Nurjaman et al., 2024).

Características principales del CIL:

- El carbón se incorpora durante la lixiviación.
- Mayor eficiencia de adsorción y recuperación.
- Menor consumo de reactivos en comparación con CIP.

Ventajas de los procesos con carbón activado (CIP y CIL):

- Recuperaciones de oro superiores al 95 % en minerales de baja y mediana ley.

- Reducción significativa en el consumo de zinc y otros reactivos respecto al método Merrill-Crowe.
- Reutilización del carbón activado tras su reactivación térmica, disminuyendo costos.
- Adaptabilidad a minerales con diferentes características mineralógicas.

En la actualidad, tanto el CIP como el CIL se consideran tecnologías estándar en la industria aurífera, especialmente en operaciones de mediana y gran escala, debido a su probada eficiencia y viabilidad económica (Surimbayev et al., 2024).

2.2.2.5 Proceso Merrill-Crowe

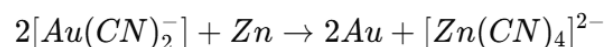
El proceso Merrill-Crowe es un método tradicional de recuperación de oro y plata de soluciones cianuradas, ampliamente empleado en plantas de mediana y gran escala antes de la masificación de los procesos con carbón activado (CIP y CIL). Este proceso combina la clarificación de la solución y la precipitación química mediante zinc para obtener el metal precioso en forma metálica (Wadnerkar et al., 2015).

c. Etapas del proceso Merrill-Crowe

1. Clarificación de la solución rica: La solución de lixiviación cargada de oro (pregnant solution) es previamente filtrada para eliminar sólidos suspendidos y partículas de carbón, evitando que interfieran con la precipitación del oro. La clarificación puede realizarse mediante filtros de presión, espesadores o decantadores.
2. Desoxigenación de la solución: La solución clarificada se desoxigena utilizando una corriente de gas inerte o vacío. La presencia de oxígeno en la solución

disminuye la eficiencia de precipitación del oro con zinc, por lo que esta etapa es crítica para garantizar un alto rendimiento del proceso.

3. Precipitación con zinc: Una vez desoxigenada, la solución se introduce en un tanque de precipitación donde se adiciona polvo de zinc metálico. El zinc reduce los complejos de oro y plata en solución, provocando la formación de partículas metálicas que se depositan en el fondo del tanque. La reacción química básica es:



4. Filtración y secado del precipitado: El precipitado metálico obtenido se filtra, se lava y se seca para luego fundirse y obtener doré, una aleación de oro y plata que posteriormente se refina (Ordoñez y Alarcon, 2024).

2.2.2.6 Tecnologías emergentes

La cianuración ha sido durante décadas el método principal para la extracción de oro, sin embargo, los avances tecnológicos han dado lugar a nuevas estrategias y tecnologías emergentes que buscan aumentar la eficiencia del proceso, reducir el consumo de cianuro y minimizar el impacto ambiental. Entre estas innovaciones destacan los métodos combinados, la cianuración biológica y los sistemas de control automatizados (Angles, 2023).

d. Cianuración asistida por bioprocesos (Bio-cyanidation)

Este enfoque utiliza bacterias cianogénicas, como *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas aeruginosa*, capaces de producir cianuro de manera biológica. Estas bacterias permiten la lixiviación de oro de manera más controlada, reduciendo la dependencia de cianuro químico y disminuyendo el riesgo de contaminación ambiental. Además, el bio-proceso puede aplicarse a minerales refractarios que presentan dificultades para la cianuración tradicional (Sayiner, 2014).

e. Cianuración con control automatizado y optimización en tiempo real

El desarrollo de sistemas de control avanzado mediante sensores, inteligencia artificial y análisis de datos permite monitorear parámetros críticos como concentración de cianuro, pH, granulometría y tiempo de residencia en tiempo real. Esto posibilita ajustes inmediatos para mantener condiciones óptimas, maximizando la recuperación de oro y reduciendo el consumo de reactivos (Vargas et al., 2022).

f. Combinación con tecnologías de lixiviación verde

Algunas plantas experimentan la cianuración parcial combinada con lixiviantes alternativos, como tiosulfato o tiourea, para disminuir la toxicidad de los procesos. Estos métodos se enfocan en la extracción selectiva del oro, reduciendo la formación de residuos peligrosos y mejorando la sostenibilidad del proceso (Ghasemi et al., 2022).

Las tecnologías emergentes buscan maximizar la recuperación de oro, reducir el consumo de cianuro y disminuir el impacto ambiental, manteniendo la viabilidad económica de las operaciones. La integración de bio-cianidación, control automatizado y lixiviantes alternativos representa una tendencia creciente en la minería aurífera moderna, que puede aplicarse en plantas como la de Comersa Ingeniería E.I.R.L. para optimizar el proceso de carbón en lixiviación (Xia et al., 2022).

2.2.3 Mineralogía y caracterización del mineral aurífero

La mineralogía y caracterización del mineral aurífero constituyen aspectos fundamentales en la planificación y optimización de procesos metalúrgicos como la cianuración. La naturaleza del mineral determina en gran medida la recuperación de oro, el consumo de reactivos y la eficiencia global del proceso. Por ello, es imprescindible conocer la composición mineralógica, la distribución del oro y la presencia de minerales acompañantes, especialmente aquellos que pueden

actuar como cianicidas, como el cobre, hierro y zinc (International Cyanide Management Institute, 2021a).

2.2.3.1 Clasificación de los minerales auríferos

Los minerales auríferos pueden clasificarse en dos grandes grupos, según la facilidad con que el oro puede ser liberado y disuelto:

1. Minerales no refractarios o libres: En estos minerales, el oro se encuentra de forma relativamente libre o ligeramente asociado a otros minerales. Esto facilita su recuperación mediante cianuración convencional, ya que no requiere tratamientos previos complejos. Entre los minerales auríferos no refractarios más comunes se encuentran el oro nativo y algunas partículas de electrum (Martínez-Peñuñuri et al., 2023)
2. Minerales refractarios: En los minerales refractarios, el oro se encuentra encapsulado dentro de sulfuros o silicato de hierro, como la pirita (FeS_2), arsenopirita o pirrotita. La disolución directa mediante cianuración es limitada, debido a que el oro está químicamente protegido. Para estos minerales, es necesario aplicar pretratamientos como tostación, oxidación por presión, biooxidación o uso de agentes químicos específicos antes de la lixiviación (International Cyanide Management Institute, 2021b).

2.2.3.2 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica permite identificar los minerales presentes, su estructura y asociación con el oro. Los métodos más utilizados incluyen:

- Difracción de rayos X (XRD): Determina la composición mineralógica y permite identificar fases mayoritarias y minoritarias en el mineral (Sanz et al., 2018).

- Microscopía óptica y electrónica: Facilita la observación de partículas de oro, sulfuros y minerales acompañantes, evaluando su tamaño, forma y liberación.
- Análisis químico: Se realiza mediante técnicas como fluorescencia de rayos X (XRF) o espectrometría de absorción atómica (AAS) para determinar la concentración de oro, plata y metales cianicidas (International Cyanide Management Institute, 2022).

En el caso de la Planta COMERSA Ingeniería EIRL., la caracterización mineralógica ha permitido identificar que el mineral aurífero contiene principalmente hematita (Fe_2O_3), cuarzo (SiO_2), pirita (FeS_2), cuprita (Cu_2O) y malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), con el oro presente tanto en forma libre como asociado a sulfuros. Esta información es clave para determinar la granulometría de molienda y ajustar la concentración de cianuro y tiempo de lixiviación, optimizando la recuperación.

2.2.3.3 Influencia de la mineralogía en la cianuración

La mineralogía del mineral aurífero tiene un impacto directo en:

- Recuperación de oro: Los minerales refractarios requieren pretratamientos para liberar el oro, mientras que los minerales libres permiten altas recuperaciones mediante cianuración directa.
- Consumo de reactivos: La presencia de metales cianicidas como cobre, zinc y hierro incrementa el consumo de cianuro, afectando la eficiencia del proceso.
- Tiempo de lixiviación: Minerales con oro encapsulado requieren tiempos más largos o pretratamientos oxidativos para garantizar la disolución completa (Deveci et al., 2023).

2.2.3.4 Caracterización granulométrica

La granulometría es otro factor crítico en la eficiencia del proceso de cianuración. La molienda del mineral busca:

- Liberar el oro de los minerales acompañantes.
- Aumentar la superficie de contacto entre el mineral y la solución de cianuro.
- Controlar la formación de lodos finos, que pueden dificultar la recuperación de oro y el manejo de pulpas.

En general, se busca que un 80% del mineral pase por mallas entre 200 y 270, garantizando un equilibrio entre liberación de oro y eficiencia operativa. La caracterización mineralógica y granulométrica del mineral aurífero es fundamental para optimizar el proceso de cianuración, mejorar la recuperación de oro y reducir el consumo de reactivos (Kim et al., 2024). En la Planta la Planta COMERSA Ingeniería EIRL, este análisis permite ajustar parámetros operativos específicos, determinar la necesidad de pretratamientos y garantizar que el proceso se realice de manera eficiente y ambientalmente responsable.

2.2.4 Variables que afectan la cianuración

El éxito del proceso de cianuración depende de una combinación de factores físicos, químicos y mineralógicos que influyen directamente en la recuperación del oro, el consumo de reactivos y la eficiencia operativa. La comprensión de estas variables es esencial para optimizar las condiciones de operación y reducir costos en plantas de procesamiento (Ghasemi et al., 2022).

2.2.4.1 Concentración de cianuro

La concentración de cianuro en la solución de lixiviación es un factor determinante para la disolución completa del oro. Una concentración insuficiente puede limitar la formación del complejo aurífero, mientras que un exceso aumenta el consumo de reactivos y genera riesgos

ambientales por liberación de cianuro libre. Estudios indican que la eficiencia óptima generalmente se encuentra en un rango de 0.1% a 0.3% de NaCN, dependiendo de la naturaleza del mineral y la presencia de elementos cianicidas.

A presión atmosférica, la velocidad de la cianuración no está determinada por la cantidad de cianuro disuelto en la solución. En condiciones de temperatura ambiente y presión normal, la solubilidad del oxígeno alcanza aproximadamente 8,1 mg/L, lo que equivale a $0,2 \times 10^{-3}$ mol/L. Por ello, la concentración mínima necesaria de cianuro de sodio (PM = 49) debe ser, como mínimo, cuatro veces mayor que la cantidad de oxígeno disponible. Esto se traduce en un valor cercano a 0,05 g/L. Cuando las soluciones contienen concentraciones de NaCN superiores a este límite, la velocidad de disolución del oro no se incrementa, ya que, en estas condiciones, el factor que controla el proceso es principalmente la concentración de oxígeno en la solución y no la del cianuro (Vargas et al., 2022).

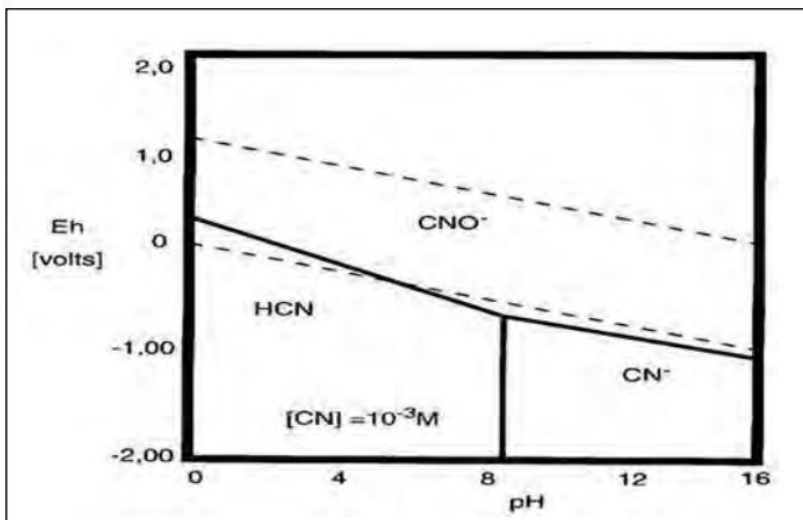
2.2.4.2 pH de la solución

El pH debe mantenerse en rango alcalino, típicamente entre 10 y 11, para evitar la formación de cianuro de hidrógeno (HCN), altamente tóxico y volátil. Un pH bajo no solo compromete la seguridad del proceso, sino que también reduce la eficiencia de disolución del oro. Por el contrario, un pH demasiado alto puede provocar la precipitación de hidróxidos metálicos que interfieren con la lixiviación.

El uso de álcalis es fundamental para regular y ajustar el pH de la pulpa, los cuales deben incorporarse previamente a la adición del cianuro con el fin de asegurar una adecuada protección alcalina. Este procedimiento evita la pérdida significativa de cianuro ocasionada por la hidrólisis. Para este propósito, es común emplear hidróxido de calcio (cal apagada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) o, en su defecto, hidróxido de sodio, ambos efectivos en el control del pH (Chavez Carpio, 2021).

Figura 3

Diagrama Eh-pH para el sistema CN-H₂O, concentración de cianuro 10⁻³ molar



Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

2.2.4.3 Granulometría del mineral

El tamaño de partícula del mineral afecta directamente la velocidad de disolución y la liberación del oro. La molienda fina aumenta la superficie de contacto entre el mineral y la solución, acelerando la cianuración. Sin embargo, partículas demasiado finas generan lodos que complican la recuperación y el manejo de pulpas. En la práctica, se busca que aproximadamente el 80% del mineral pase por malla 270, logrando un equilibrio entre liberación del oro y eficiencia operativa (Angles, 2023). En la práctica minera actual, el agotamiento de yacimientos de alta ley ha llevado a que el oro se encuentre mayormente en fracciones de granulometría más fina. En consecuencia, se requiere alcanzar aproximadamente un 80% de liberación del mineral con un tamaño pasante a la malla -200. Según diversos estudios, la velocidad de disolución del oro se estima en 3,25 mg/cm² por hora. Bajo estas condiciones, partículas de oro de 44 micras logran disolverse en un tiempo aproximado de 14 horas, mientras que aquellas de 140 micras requieren cerca de 44 horas para completar el mismo proceso (Abadie, 2022).

2.2.4.4 *Tiempo de residencia*

El tiempo que el mineral permanece en contacto con la solución de cianuro, también denominado tiempo de lixiviación, es crucial para asegurar una extracción completa del oro. Minerales con oro encapsulado en sulfuros requieren tiempos más prolongados o pretratamientos oxidativos. Un tiempo insuficiente reduce la recuperación final, mientras que un tiempo excesivo aumenta costos y riesgos de degradación del cianuro (Wadnerkar et al., 2015).

2.2.4.5 *Presencia de elementos cianicidas*

Minerales que contienen cobre, hierro, zinc u otros metales presentan un desafío adicional, ya que estos elementos reaccionan con el cianuro, consumiéndolo y disminuyendo su disponibilidad para disolver el oro. Esto obliga a ajustar la concentración de cianuro y otros reactivos, y en algunos casos aplicar tratamientos previos para reducir la interferencia de estos metales (Deveci et al., 2023).

2.2.4.6 *Oxígeno disuelto*

El oxígeno actúa como agente oxidante en la reacción de disolución del oro. Su presencia en la pulpa de lixiviación es fundamental para completar la formación del complejo aurífero. La falta de oxígeno limita la velocidad de disolución y puede requerir el uso de sistemas de aireación o inyección de oxígeno en tanques.

2.2.4.7 *Temperatura*

Aunque el proceso de cianuración suele realizarse a temperatura ambiente, incrementos controlados en la temperatura pueden acelerar la cinética de disolución del oro. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden descomponer el cianuro y aumentar la volatilización de HCN, por lo que se debe mantener un control estricto.

2.2.4.8 Densidad de pulpa

La densidad de sólidos en la pulpa afecta la transferencia de masa y la eficiencia de contacto entre mineral y cianuro. Pulpa demasiado densa reduce la movilidad de reactivos y oxígeno, mientras que una pulpa demasiado diluida incrementa el volumen de procesamiento y los costos asociados (Motasim et al., 2024). La cianuración es un proceso sensible a múltiples variables operativas y mineralógicas. La combinación adecuada de concentración de cianuro, pH, granulometría, tiempo de residencia, oxígeno y control de elementos cianicidas permite maximizar la recuperación de oro y minimizar el consumo de reactivos.

En general, la lixiviación se lleva a cabo con una densidad de pulpa que varía entre 1250 y 1300 g/L, con contenidos de sólidos comprendidos entre el 35% y el 50%. Estos valores dependen de factores como la densidad específica de los minerales, el tamaño de partícula y la presencia de materiales que incrementan la viscosidad, como las arcillas. El proceso de transferencia de masa se ve favorecido cuando la pulpa presenta bajas densidades; sin embargo, al aumentar la concentración de sólidos en un volumen fijo dentro del equipo de lixiviación, también se prolonga el tiempo de retención de las partículas en el sistema (International Cyanide Management Institute, 2022).

2.2.5 Efecto de pH y Eh en la Cianuración del Oro

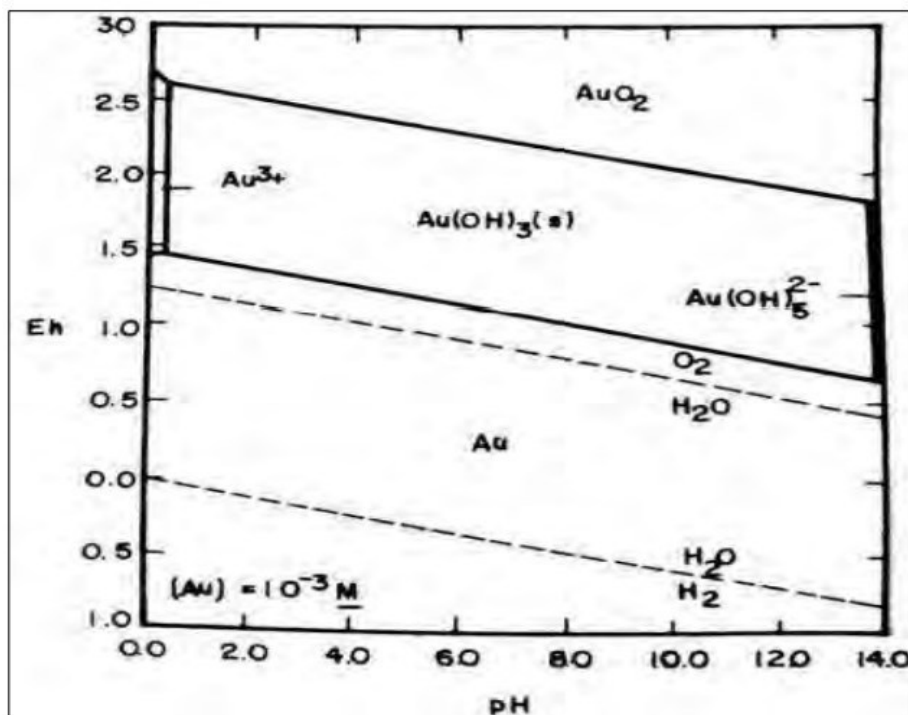
El proceso de disolución del oro mediante cianuración depende directamente de las condiciones químicas de la solución, en particular del pH y del potencial de óxido-reducción (Eh). Estos parámetros determinan tanto la estabilidad del complejo aurocianuro como la eficiencia de la disolución metálica. En términos generales, la cianuración requiere de un medio alcalino, donde el pH óptimo suele encontrarse en el rango de 10 a 11,5. Este control se realiza mediante la adición de álcalis, principalmente cal apagada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ o hidróxido de sodio (NaOH). El mantenimiento

de un pH elevado cumple una doble función: por un lado, evita la descomposición del cianuro por hidrólisis y, por otro, previene la formación de ácido cianhídrico gaseoso (HCN), altamente tóxico y volátil. En condiciones ácidas, el cianuro libre se convierte rápidamente en HCN, incrementando los riesgos ambientales y ocupacionales, además de ocasionar pérdidas de reactivo (Merli et al., 2022).

El Eh también desempeña un papel fundamental en la cinética de disolución del oro. Para que el oro pase a solución como complejo aurocianuro $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, es necesario que exista un agente oxidante que favorezca la reacción. En condiciones de lixiviación convencional, dicho oxidante es el oxígeno disuelto, cuya disponibilidad se ve reflejada en los valores de Eh de la pulpa. Valores de potencial entre +300 y +500 mV (medidos frente a un electrodo de referencia) son considerados favorables para la disolución del oro, mientras que niveles inferiores limitan la velocidad del proceso (Gorji et al., 2020). Cuando el Eh es demasiado bajo, la disolución se vuelve lenta debido a la insuficiente oxidación del oro metálico. En contraste, valores excesivamente altos de Eh pueden provocar la oxidación de especies como el hierro, cobre o azufre, generando precipitados secundarios (por ejemplo, jarositas o compuestos férricos) que consumen cianuro y reducen la eficiencia global. Tal como se observa en la Figura 4, los iones áuricos (Au^{3+}) pueden mantenerse en equilibrio con el oro metálico (Au^0) dentro del sistema oro-agua, o bien con el complejo auro-cianuro $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ cuando el medio corresponde al sistema oro-cianuro-agua, alcanzando estabilidad hasta valores de pH cercanos a 11 (Motasim et al., 2024).

Figura 4

Diagrama Eh - pH para el Sistema Oro - Agua a 25°C

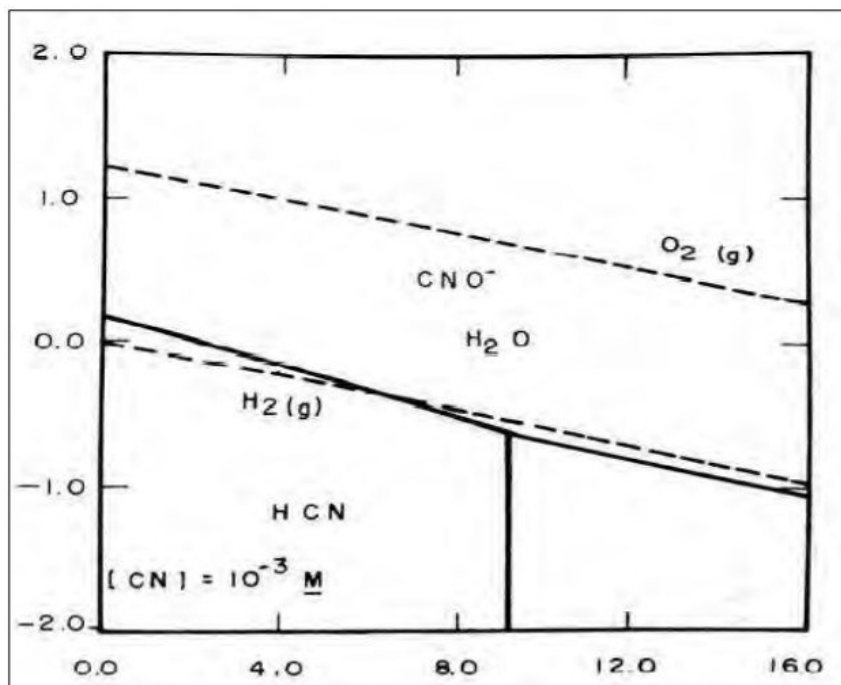


Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

De manera similar, en la Figura 4 se aprecia que los iones de oro predominantes corresponden al estado áurico (Au^{3+}) y no al estado auroso (Au^+). Esto se debe principalmente a que la reacción de oxidación del oro metálico hacia el ion áurico ($Au^0 \rightarrow Au^{3+}$) se sitúa bastante por debajo del límite de estabilidad de la reacción que forma el ion auroso ($Au^0 \rightarrow Au^+$).

Figura 5

Diagrama Eh - pH para el Sistema Oro - Cianuro, a 25°C



Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

Tal como se aprecia en las Figuras 4 y 6, el oro metálico mantiene un amplio campo de estabilidad en todo el rango de pH cuando se encuentra en condiciones de potenciales de reducción bajos, comportamiento similar al del agua. Sin embargo, a potenciales más elevados, el oro puede generar óxidos insolubles como el óxido áurico hidratado ($Au_2O_3 \cdot 3H_2O \leftrightarrow 2Au(OH)_3$) o el peróxido de oro (AuO_2). Estas especies, aunque termodinámicamente inestables, actúan como fuertes agentes oxidantes. Es importante señalar que la fuerza oxidante de dichos compuestos está directamente influenciada por la acidez del medio: cuanto mayor es el pH, menor es su capacidad oxidante (International Cyanide Management Institute, 2021a).

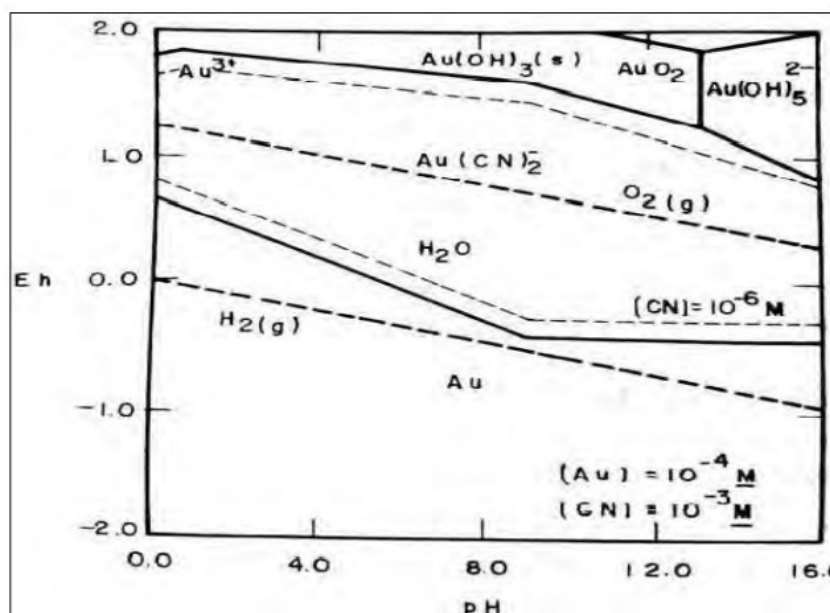
En cuanto a las especies de cianuro, el ácido cianhídrico (HCN) y el ion cianuro (CN^-) permanecen estables en condiciones de potencial bajo; no obstante, el ion cianuro predomina en medios con pH superiores a 9,24. A potenciales más altos, la especie estable es el ion cianato (CNO^-). Por otro lado, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 5, aunque algunos estudios han

descrito al cianuro auroso sólido (AuCN) y al complejo áurico de cianuro ($[\text{Au}(\text{CN})_4]^-$) como estables, en la práctica el único complejo que conserva su estabilidad durante la cianuración es el complejo auroso de cianuro ($[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$) (Eniowo, 2025).

Finalmente, al comparar las Figuras 4 y 6, se observa que la incorporación de cianuro en el sistema acuoso reduce de manera considerable la zona de estabilidad del oro metálico y de sus óxidos. En cambio, el complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ presenta una extensa región de estabilidad, sobre todo a valores de pH superiores a 9, donde se evita la formación de HCN. Esta amplia estabilidad explica por qué la cianuración constituye un método eficiente y viable para la extracción de oro a partir de sus menas.

Figura 6

Diagrama Eh - pH para el Sistema de Oro - Cianuro - Agua, a 25°C.



Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

2.2.6 Termodinámica de la Cianuración

La termodinámica desempeña un papel fundamental en la cianuración con carbón en lixiviación (CIL), ya que permite establecer las condiciones de pH y potencial de oxidación-

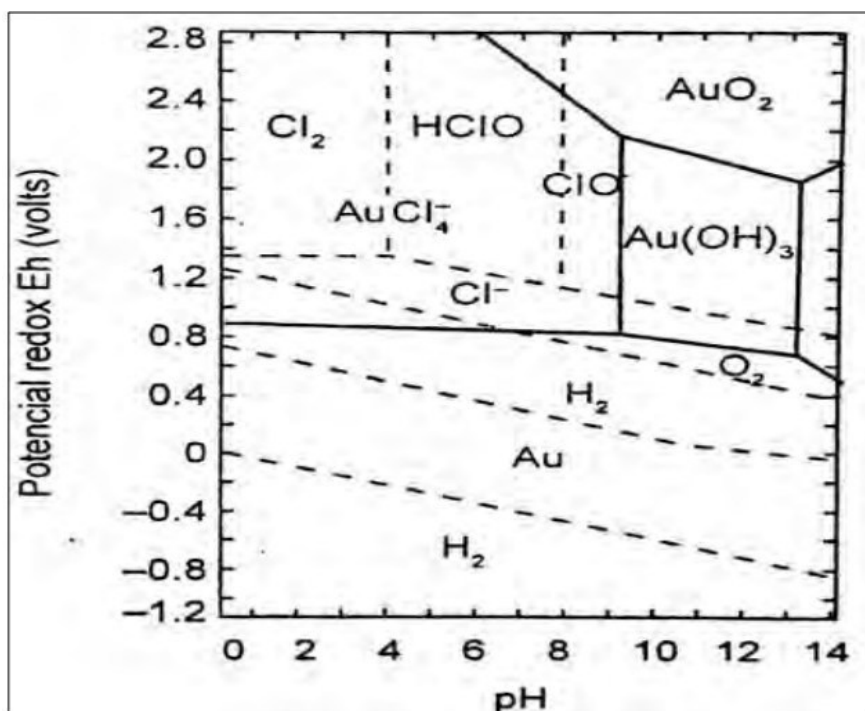
reducción (Eh) que favorecen la disolución del oro y la formación de especies estables en solución (Gorji et al., 2020).

Para analizar estos equilibrios se emplean los diagramas de Pourbaix (Eh–pH), los cuales representan la relación entre el potencial redox y el pH del sistema. Estos diagramas muestran que especies como Au^{3+} , $\text{Au}(\text{OH})_3$ y otros compuestos oxidados del oro solo son estables a potenciales muy elevados, lo que explica la alta resistencia del oro metálico a la oxidación (Deveci et al., 2023; Kim et al., 2024).

En el sistema $\text{Au-H}_2\text{O-CN}^-$, la presencia de cianuro favorece la formación del complejo soluble aurocianuro, principal especie responsable de la recuperación del oro. Asimismo, los diagramas indican que este complejo es estable en medios alcalinos y oxigenados, condiciones que favorecen la lixiviación y la eficiencia del proceso de cianuración (Ordoñez y Alarcón, 2024)..

Figura 7

Diagrama de estabilidad Potencial - pH para el Sistema Au-H₂O-Cl a 25°C.

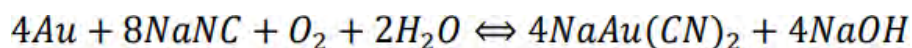


Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

2.2.7 Naturaleza Electroquímica de la Cianuración

La disolución del oro en medios cianurados se fundamenta en un proceso de naturaleza electroquímica, en el cual participan simultáneamente una reacción de oxidación y otra de reducción. El oro metálico (Au^0) actúa como especie anódica al oxidarse y transformarse en un complejo soluble, mientras que el oxígeno disuelto en la solución cumple el rol de agente oxidante en el cátodo (Motasim et al., 2024).

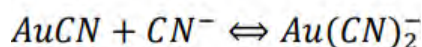
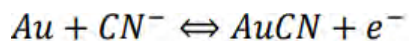
El avance en la comprensión de la química involucrada en la cianuración del oro se atribuye a Kudryk y Kellog (1954), quienes evidenciaron que este proceso posee una naturaleza electroquímica. La reacción de disolución del oro, conocida como ecuación de Elsner, describe el mecanismo mediante el cual el oro metálico forma complejos solubles en presencia de cianuro y oxígeno.



Esta reacción consiste de dos medias reacciones anódicas y catódicas.

2.2.7.1 Reacción Anódica

La reacción anódica consiste en la oxidación del oro metálico (Au^0) a Au^+ , llevándose a cabo en dos etapas principales. Primero, el oro reacciona con un ion cianuro, formando un compuesto superficial que puede identificarse como AuCN . Posteriormente, este compuesto se transforma en el complejo de cianuro de Au^+ , representado como $(\text{Au}(\text{CN})_2)^-$, como se evidencia en las reacciones que siguen:



2.2.7.2 Reacción Catódica

Estas reacciones anódicas se complementan con la reducción catódica del oxígeno en la superficie del oro. En este proceso, el oxígeno molecular se reduce primero a peróxido y luego este peróxido se transforma en iones hidróxido (OH^-), tal como lo describe Matthew (1997) y se ilustra en la Figura 8.

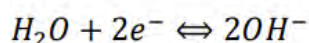
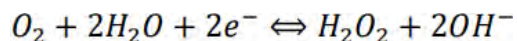
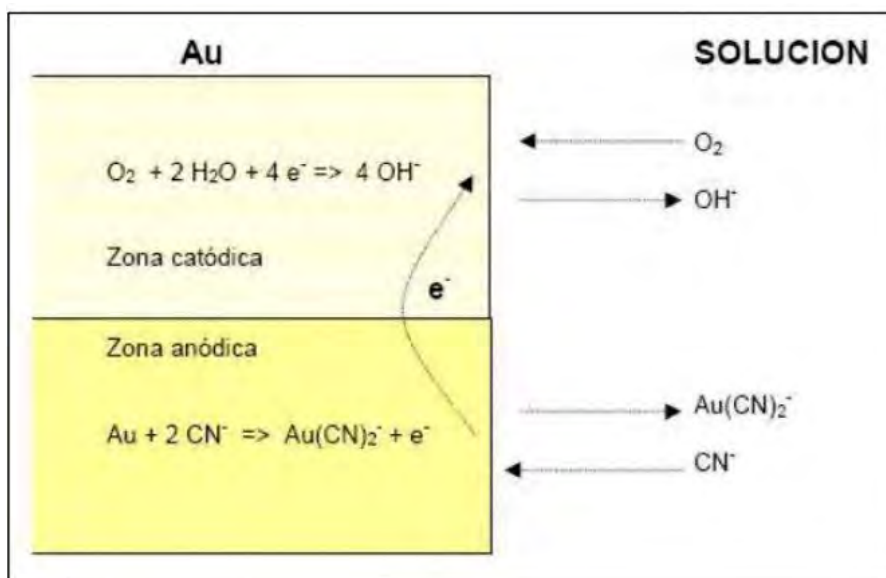


Figura 8

Disolución del oro en soluciones cianuradas



Nota. Gold cyanidation process: Chemistry and mechanisms, 2022.

2.2.8 Cinética del Proceso de Cianuración

La disolución de oro y plata en soluciones cianuradas se desarrolla mediante reacciones heterogéneas en la interfase sólido-líquido. La velocidad a la que el oro se disuelve está principalmente determinada por la difusión del oxígeno disuelto hacia las partículas de oro. Por lo tanto, factores como la agitación, la temperatura, el pH y otras condiciones que faciliten la

transferencia de oxígeno resultan esenciales para acelerar la reacción y mejorar la disolución del oro contenido en el mineral (Karppinen et al., 2024).

Por consiguiente, los procedimientos descritos pueden considerarse fundamentales para garantizar la lixiviación eficiente de estos metales preciosos, asegurando su máxima disolución y recuperación en el proceso metalúrgico.

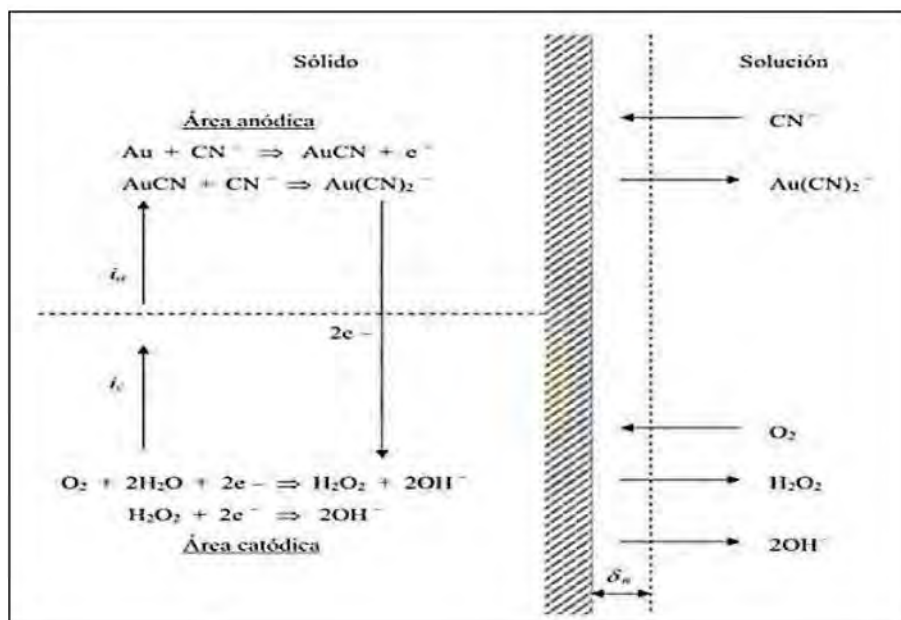
Los pasos fundamentales en la lixiviación de metales preciosos, como el oro y la plata, en soluciones cianuradas pueden describirse de la siguiente manera:

1. Incorporación de oxígeno a la solución: El oxígeno disuelto es esencial para la reacción de oxidación del oro y la plata. Su concentración en la solución determina, en gran medida, la velocidad de disolución del metal.
2. Transporte de reactivos hacia la interfase sólido-líquido: Tanto el cianuro como el oxígeno disuelto deben difundirse hasta la superficie del mineral. Este paso asegura que los reactivos estén disponibles en la zona donde ocurre la reacción, lo que facilita la disolución eficiente del oro y la plata.
3. Adsorción de los reactivos en la superficie del mineral: En este paso, los iones cianuro y las moléculas de oxígeno se adsorben en la superficie de las partículas metálicas, formando complejos reactivos que inician la reacción electroquímica.
4. Reacción electroquímica de disolución: Ocurre la oxidación del oro y la plata, formando complejos solubles con el cianuro. Este paso es el núcleo del proceso de lixiviación y depende de factores como el pH, la temperatura, la concentración de cianuro y la agitación.

5. Desorción de los complejos metálicos solubles: Los complejos formados, como $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ y $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$, se liberan desde la superficie sólida hacia la fase líquida, lo que permite su posterior recuperación.
6. Transporte de los productos disueltos a la solución: Finalmente, los complejos solubles se trasladan hacia la masa líquida, garantizando su disponibilidad para los procesos posteriores, como la absorción en carbón activado o la precipitación, según el método empleado (CIL, CIP o Merrill-Crowe) (Kassymova et al., 2025).

Figura 9

Representación Esquemática de una Celda de Corrosión Local en la Superficie del Oro



Nota. Adaptado de Marsden y House (2006, p. 207). Copyright 2006 por SME.

El proceso de cianuración se rige fundamentalmente por los principios de difusión establecidos en las leyes de Fick, que permiten cuantificar el movimiento de los reactivos hacia la superficie del mineral y de los productos de reacción hacia la solución. Estas leyes describen matemáticamente cómo las concentraciones de especies químicas varían en función del tiempo y el espacio, determinando así la velocidad a la que el cianuro y el oxígeno alcanzan la interfase sólido-líquido y la rapidez con que los complejos solubles de oro y plata se dispersan en la solución

(Nurjaman et al., 2024). Aplicando estas ecuaciones, es posible estimar la cinética de lixiviación, optimizar parámetros como la agitación, la granulometría del mineral y la concentración de reactivos, y predecir la eficiencia del proceso en la extracción de metales:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{DO_2 A_1 ([O_2] - [O_2]_s)}{\delta}$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{DCN^- A_2 ([O_2] - [O_2]_s)}{\delta}$$

Donde:

$\frac{d(O_2)}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$ son velocidades de difusión de O_2 y CN^- respectivamente, expresada en moles/seg.

En este contexto, DO_2 y DCN^- representan los coeficientes de difusión del oxígeno y del ion cianuro, respectivamente, expresados en $cm^2/segundo$. Los términos A_1 y A_2 corresponden a las áreas anódica y catódica donde ocurre la reacción, medidas en cm^2 . La variable δ indica el grosor de la capa límite de Nernst, también en centímetros. Por su parte, $[O_2]$ y $[CN^-]$ denotan la concentración de oxígeno y cianuro en la solución, mientras que $[O_2]_s$ y $[CN^-]_s$ hacen referencia a la concentración de estos reactivos en la superficie de contacto, donde se lleva a cabo la reacción electroquímica (Angles, 2023).

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

$$\frac{2DO_2 A_1 ([O_2] - [O_2]_s)}{\delta} = \frac{1/2DCN^- A_2 ([O_2] - [O_2]_s)}{\delta}$$

Tomar en consideración que para el área totales $A = A_1 + A_2$, resolviendo este sistema de ecuaciones se deduce que la velocidad de cianuración:

$$V = \frac{2A DCN^- DO_2 [O_2] [O_2]}{\delta(DCN^- [CN^-] + 4DO_2 [O_2])}$$

Para derivar esta ecuación se analizan dos escenarios; en el caso de que las concentraciones de cianuro sean bajas, el primer término del denominador resulta insignificante en comparación con el segundo, por lo que la expresión se simplifica tomando en cuenta principalmente el segundo término, teniendo:

$$V = \frac{1/2 DCN^- A [CN^-]}{\delta}$$

$$V = K_1 [CN^-]$$

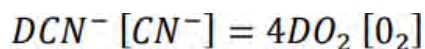
En consecuencia, considerando las condiciones del proceso, la velocidad de cianuración depende directamente de la concentración de cianuro, como ha sido comprobado mediante experimentos. Por otro lado, cuando las concentraciones de cianuro son altas, el segundo término del denominador se vuelve despreciable frente al primero, simplificando la ecuación a una nueva forma:

$$V = \frac{2 DO_2 A [O_2]}{\delta}$$

$$V = K_2 [O_2]$$

Esto indica que, en condiciones de altas concentraciones de cianuro, la rapidez de disolución del oro está determinada principalmente por la concentración de oxígeno. Esta hipótesis teórica ha sido corroborada mediante estudios experimentales. Para establecer el punto en el cual una de las concentraciones deja de ser limitante y la otra asume el control de la velocidad de

lixiviación, se recurre nuevamente a la ecuación general, aplicándola cuando se cumplen las condiciones correspondientes:



o lo que es lo mismo:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = \frac{4 DO_2}{DCN^-}$$

2.2.9 Minerales auríferos y su comportamiento en cianuración

La termodinámica es fundamental en el proceso CIL, ya que permite definir las condiciones de pH y potencial de oxidación-reducción (Eh) que favorecen la disolución del oro y la formación de especies estables en solución (Gorji et al., 2020).

Para analizar estos equilibrios se emplean los diagramas de Pourbaix (Eh–pH), los cuales muestran que el oro metálico posee una alta estabilidad frente a la oxidación y que sus especies oxidadas solo son estables a potenciales elevados (Deveci et al., 2023; Kim et al., 2024).

En el sistema Au–H₂O–CN[–], el cianuro favorece la formación del complejo soluble aurocianuro, especie responsable de la recuperación del oro. Este complejo es estable en medios alcalinos y oxigenados, condiciones que optimizan la eficiencia del proceso de cianuración (Ordoñez y Alarcón, 2024).

2.2.10 Teoría de carbón activado

El carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados en la extracción de oro en soluciones cianuradas por su elevada porosidad y extensión de superficie interna, lo que permite que los complejos auríferos sean captados de manera efectiva. Un aspecto clave en la selectividad del carbón activado es la presencia de grupos funcionales en su superficie. Un estudio mediante teoría del funcional de densidad (DFT) demostró que grupos oxigenados como carboxilo (–

COOH) o hidroxilo ($-\text{OH}$) pueden influir en la energía de interacción entre el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y la superficie del carbón. En algunos casos, estos grupos disminuyen la afinidad del carbón por el oro al competir o modificar la estructura electrónica del sitio (Ghasemi et al., 2022).

Adicionalmente, investigaciones recientes han mostrado que modificar el carbón activado, por ejemplo, impregnándolo con surfactantes aniónicos como el SDS (dodecil sulfato de sodio), puede aumentar la eficiencia de adsorción del complejo aurífero en aproximadamente un 10 %. Se sugiere que esta mejora se debe a la limpieza de la superficie del carbón y al aumento en el área específica disponible para interacción (Vargas et al., 2022).

El carbón activado (CA) es uno de los adsorbentes más usados en la extracción de oro por su alta superficie específica, porosidad, capacidad de regeneración, y afinidad por los iones aurocianuro ($[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$). A continuación, se presentan los aspectos fundamentales, termodinámicos, cinéticos y operativos, extraídos de literatura reciente (Wadnerkar et al., 2015).

2.2.10.1 Características estructurales y funcionales

El rendimiento del carbón activado depende fuertemente del tamaño de los poros, del volumen total de poros y de la distribución de estos — microporos, mesoporos, macroporos. Se ha observado que carbones con estructura porosa bien desarrollada y presencia de microporos favorecen la adsorción de los iones $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ al aumentar la superficie disponible. La presencia de defectos estructurales, heterogeneidades superficiales y grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón activado modulan su capacidad de adsorción. Esos grupos oxigenados ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, etc.) pueden afectar la interacción con el complejo auro-cianuro, modificando la afinidad del carbón (Xia et al., 2022).

De acuerdo a Martínez-Peñuñuri et al. (2023), al evaluar carbón activado micrométrico con distintas granulometrías, pesos de carbón y tiempos, se identificó que la adsorción de oro es un

proceso espontáneo (ΔG negativo), exotérmico (ΔH negativo) y con disminución del desorden (ΔS negativo). Estos resultados indican que la interacción entre el complejo Au-CN y la superficie del CA libera energía y favorece la organización molecular al adsorber. Además, el comportamiento de las isothermas (Freundlich vs Langmuir) sugiere que la adsorción no ocurre sobre una superficie homogénea, sino sobre superficies con heterogeneidad de sitios activos (Nurjaman et al., 2024).

2.2.10.2 Cinética de adsorción

El tamaño de partícula del carbón tiene un papel clave: carbones más finos presentan mayor velocidad de adsorción, pero al mismo tiempo causan posibles pérdidas físicas (escapes, deterioro mecánico). Martínez-Peñuñuri et al. (2023), compararon diferentes granulometrías y tiempos, observándose que tamaños más pequeños aumentan la tasa, aunque reducen la robustez operacional. También se ha desarrollado carbón activado magnético, que facilita la separación del carbón de la pulpa, reduciendo tiempos muertos y pérdidas. En un estudio de 2021, carbono activado magnético logró ~99.1 % de recuperación de oro de una solución cianurada en 5 horas, gracias a su área de superficie específica ($\approx 249.7 \text{ m}^2/\text{g}$) y facilidad de separación magnética (Martínez-Peñuñuri et al., 2023).

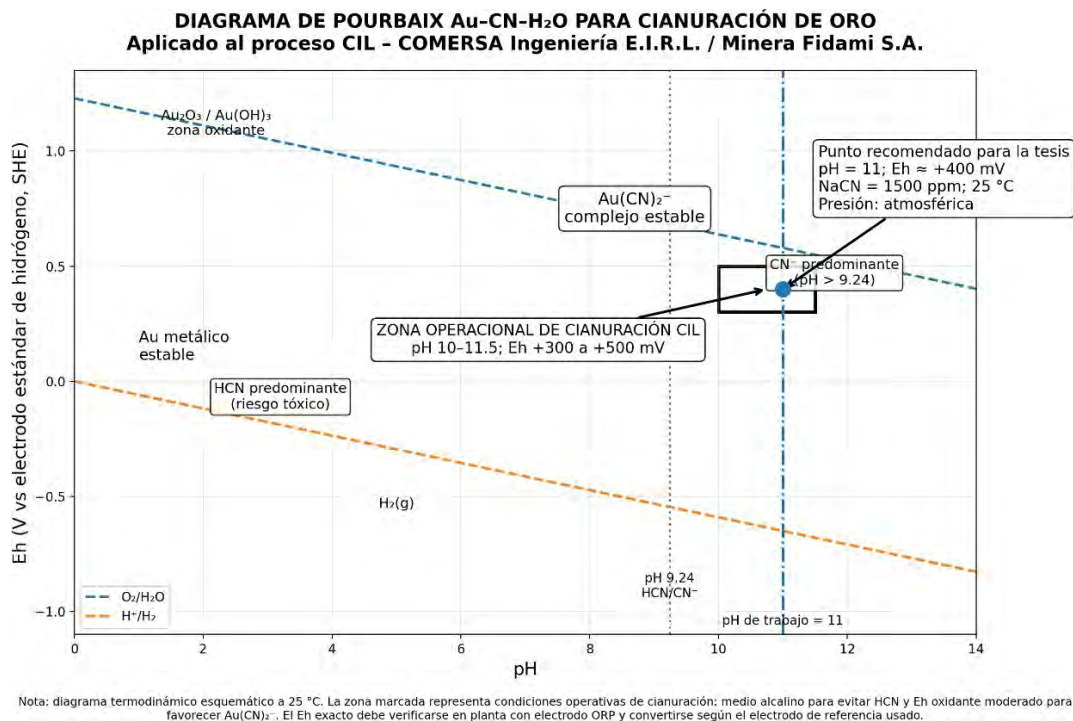
Un buen carbón debe tener tanto alta capacidad de adsorción como buena capacidad de desorción. Si el oro queda “atrapado” o el carbón pierde actividad tras varios ciclos, baja la eficiencia global del proceso.

Se usan agentes de desorción (soluciones químicas que liberan el oro del carbón) y luego se reactivan el carbón para reutilizarlo. Estudios recientes muestran que el carbón activado impregnado, funcionalizado o modificada mejora tanto la adsorción como la reutilización tras desorción.

2.3 Diagrama de Pourbaix para la cianuración del oro.

Figura 10

Diagrama de Pourbaix para la cianuración del Oro.



el diagrama de Pourbaix Au-CN-H₂O marcando la zona operacional de cianuración: pH 10–11.5 y Eh +300 a +500 mV, con punto recomendado pH = 11, Eh ≈ +400 mV, NaCN = 1500 ppm y presión atmosférica. Esto se sustenta en la tesis, donde se indica que la cianuración trabaja en medio alcalino y que valores de Eh entre +300 y +500 mV favorecen la disolución del oro como [Au(CN)₂]⁻.

CAPITULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

La optimización conjunta de las variables operativas del proceso CIL permite significativamente la maximización de la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala.

3.1.2 Hipótesis específicas

H1: La concentración de cianuro de sodio permite una lixiviación optima e influye significativamente en la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

H2: La granulometría del mineral influye significativamente en la recuperación de oro en el proceso CIL.

H3: El porcentaje de sólidos en la pulpa influye significativamente en la recuperación de oro durante el proceso CIL.

H4: El tiempo de cianuración influye significativamente en la recuperación de oro en el proceso CIL.

3.2 Variables

3.2.1 Variables independientes

Las variables independientes de la investigación son:

Granulometría del mineral

Corresponde al tamaño de partícula del mineral alimentado al proceso CIL, expresado como porcentaje pasante en malla (-200 mallas). Esta variable controla el grado de liberación del oro.

Concentración de cianuro de sodio (NaCN)

Cantidad de cianuro de sodio presente en la solución lixivante, expresada en partes por millón (ppm). Determina la disponibilidad del reactivo para la disolución del oro.

Porcentaje de sólidos en la pulpa

Relación entre la masa de sólidos y el total de la pulpa durante la lixiviación, expresada en porcentaje (%). Influye en la viscosidad de la pulpa y en la transferencia de masa.

Tiempo de residencia

Periodo de contacto entre el mineral y la solución cianurada, expresado en horas (h). Controla la cinética de disolución del oro.

3.2.2 Variables dependientes

Recuperación de oro (%)

3.2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumento/Técnica
Concentración de cianuro (NaCN)	Se refiere a la cantidad de cianuro presente en la solución lixiviante utilizada para disolver el oro de la matriz mineral.	Cantidad de cianuro adicionada en gramos por litro de solución durante el proceso de cianuración.	- Nivel mínimo de concentración 1000 ppm - Nivel máximo de concentración 1500 ppm	Dosis de NaCN en ppm - Variación del pH en función del NaCN - Eficiencia de disolución del oro	Razón (ppm)	Dosificación controlada y medición con el método de titulación.
Granulometría	Tamaño de las partículas minerales producto de la molienda, que influye en la superficie expuesta a la solución de cianuro.	Tamaño promedio de partícula medido mediante análisis granulométrico (malla Tyler).	- Tamaño grueso (80% - malla 200) - Tamaño fino (90% - malla 200µm)	- Distribución de tamaño de partícula (µm) - Porcentaje pasante en malla -200	Razón (µm)	Análisis granulométrico por tamizado y medición en laboratorio metalúrgico (clasificación por mallas Tyler).
Tiempo de residencia	Período de contacto entre la pulpa mineral y la solución cianurada que permite la disolución del oro.	Horas de permanencia del mineral en el tanque de cianuración.	- Nivel bajo (24 h) - Nivel alto (48 h)	- Tiempo de lixiviación en horas - Variación de concentración de oro disuelto según el tiempo	Razón (horas)	Cronometría de proceso y monitoreo de tiempo de retención en botellas de agitación.
Porcentaje de sólidos	Relación entre la masa de sólidos y el total de la pulpa durante la lixiviación.	Expresada en porcentaje (%). Influye en la viscosidad de la pulpa y en la transferencia de masa.	- Condición física de la pulpa Nivel alto 45% Nivel bajo 35%	- Relación sólido-líquido	Porcentaje (%)	Balanza analítica y cálculos gravimétricos

Recuperación de oro (VD)	Proporción del oro contenido en el mineral que es disuelto y recuperado en la solución de cianuro en condiciones específicas de operación.	Porcentaje de oro recuperado, calculado a partir de ensayos metalúrgicos (análisis de cabeza y de colas).	- Rendimiento en % - Comparación entre condiciones experimentales (según diseño factorial)	- % de oro disuelto en solución - % de oro adsorbido en carbón activado - % de recuperación total (balance metalúrgico)	Porcentaje (%)	Ensayo metalúrgico por análisis químico de oro por ensayo al fuego.
---------------------------------	--	---	---	---	----------------	---

Nota: Elaboración Propia.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Ámbito de estudio: Localización política y geográfica

La investigación se desarrollará en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., entidad dedicada al procesamiento de minerales auríferos mediante la tecnología de carbón en lixiviación (CIL). Esta planta de beneficio constituye un actor relevante dentro de la cadena de valor de la minería aurífera en el sur del Perú. La empresa se ubica en la región Arequipa, provincia de Caravelí, distrito de Chala, territorio reconocido a nivel nacional por su alta concentración de operaciones mineras de pequeña y mediana escala.

Desde el punto de vista político-administrativo, la localización de la empresa es la siguiente:

Región: Arequipa

Provincia: Caravelí

Distrito: Chala

El distrito de Chala forma parte de la franja costera sur del Perú y destaca históricamente por su dinamismo económico asociado a dos actividades principales: la minería aurífera y la pesca artesanal e industrial. Esta zona constituye uno de los polos mineros más representativos del país, caracterizado por un elevado flujo migratorio orientado a actividades ligadas a la extracción, beneficio y comercialización del oro. La población distrital, que bordea los 9 000 habitantes, ha incrementado progresivamente debido al crecimiento de la actividad minera y a las oportunidades laborales que esta genera.

En el ámbito económico, Chala contribuye significativamente a la producción regional mediante la explotación y exportación de concentrados de oro, plata, cobre y molibdeno,

provenientes tanto de operaciones artesanales como de plantas metalúrgicas privadas. Paralelamente, el puerto de la zona permite la comercialización de especies marinas como corvina, pejerrey y jurel, que complementan la estructura productiva local. A ello se suman actividades agrícolas menores, principalmente cultivos de maíz, arroz y papa, que sostienen parte de la economía familiar.

No obstante, junto con sus aportes positivos, la actividad minera genera desafíos ambientales y sociales relevantes. Entre ellos se encuentran la contaminación del aire, agua y suelo asociada a procesos metalúrgicos tradicionales, especialmente cuando se emplean técnicas poco eficientes y con limitada gestión ambiental. En este contexto, la incorporación de tecnologías más limpias y reactivos de menor impacto, como el reactivo Sandioss utilizado en procesos de extracción aurífera, adquiere un rol esencial para reducir los efectos negativos y promover una minería más responsable.

En este marco territorial y productivo se inserta la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., cuya operación ocupa un papel estratégico en la economía local y constituye el escenario principal del presente estudio. Su ubicación y condiciones operativas permiten analizar con rigor los procesos productivos, ambientales y de gestión vinculados a la minería aurífera en un entorno representativo de la realidad minera del sur del Perú.

Figura 11

Ubicación geográfica de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.



Nota: Extraído de earth.google.com

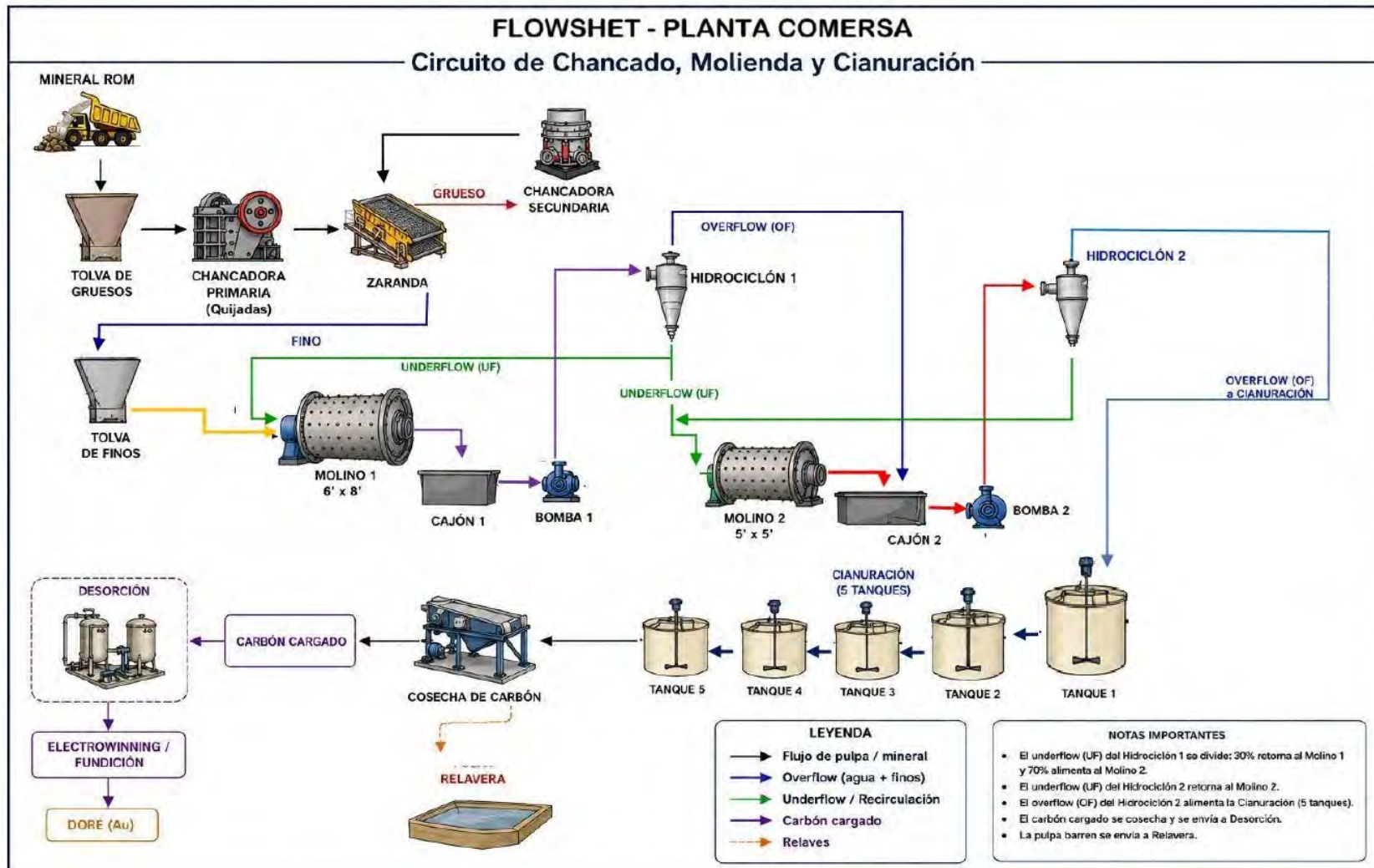
En cuanto a su localización geográfica, Chala se ubica en la zona costera sur del Perú, aproximadamente a 612 km al sureste de la ciudad de Lima y a 430 km de la ciudad de Arequipa, capital regional. El distrito de Chala se caracteriza por un clima desértico costero, con temperaturas moderadas y baja humedad, lo que favorece el desarrollo de actividades mineras.

La importancia de esta localización radica en que Chala es considerada un núcleo minero aurífero del sur peruano, al concentrar una gran cantidad de plantas de beneficio, talleres metalúrgicos y empresas de servicios vinculadas al procesamiento de oro proveniente tanto de operaciones formales como de pequeña minería. COMERSA Ingeniería E.I.R.L. forma parte de este clúster minero, contribuyendo al dinamismo económico de la provincia y generando empleo directo e indirecto en la región.

La planta de la empresa se encuentra estratégicamente situada para recibir mineral aurífero de diversas procedencias, lo que la convierte en un centro clave para la investigación de parámetros de cianuración y optimización del proceso CIL, especialmente en un contexto donde las condiciones mineralógicas presentan una notable variabilidad.

Figura 12

Diagrama de flujo de la empresa.



Nota: Elaboración propia.

4.2 Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo correlacional, ya que tiene como propósito determinar la relación existente entre las variables concentración de cianuro (NaCN), granulometría, tiempo de residencia y la recuperación de oro en el proceso de cianuración. Según Hernández y Mendoza (2018), este tipo de investigación no busca manipular las variables de manera experimental pura, sino establecer el grado de asociación o dependencia entre ellas, permitiendo identificar cómo las variaciones en las condiciones operativas influyen en el rendimiento del proceso metalúrgico. Asimismo, el enfoque es cuantitativo, dado que se utilizan datos numéricos obtenidos mediante pruebas de laboratorio y mediciones experimentales, los cuales serán analizados estadísticamente para determinar el nivel de correlación entre las variables mencionadas

4.3 Diseño de la investigación

Se empleará un diseño experimental, ya que se manipularán deliberadamente las variables independientes concentración de cianuro (NaCN), granulometría del mineral y tiempo de residencia con el propósito de observar su efecto sobre la variable dependiente, que corresponde a la recuperación de oro. El estudio se enmarca dentro de un diseño factorial completamente aleatorizado, debido a que permitirá evaluar de manera simultánea el efecto individual y combinado de los factores seleccionados sobre la variable de respuesta. Este enfoque facilita la identificación de las condiciones óptimas del proceso de cianuración, maximizando la eficiencia metalúrgica del sistema CIL (carbón en lixiviación).

El experimento se desarrollará en condiciones controladas dentro de la planta de procesamiento de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., donde se mantendrán constantes los

demás parámetros operativos (pH, agitación, relación sólido-líquido, temperatura), a fin de garantizar la validez de los resultados.

4.4 Metodología de la investigación

La investigación se desarrollará en cuatro fases principales:

1. Caracterización del mineral

- Ensayos mineralógicos
- Determinación de leyes de oro y plata.
- Granulometría inicial y distribución de tamaños.
- Identificación de minerales consumidores de cianuro (pirita, calcopirita, sulfuros de hierro).

2. Definición de variables y niveles

- Con base en experiencias previas de la planta y literatura especializada, se seleccionaron las variables críticas de la cianuración (NaCN, granulometría y tiempo).
- Se establecieron los rangos experimentales a evaluar, asegurando que sean técnicamente viables para la operación industrial.

3. Ejecución de pruebas experimentales

- Ensayos de cianuración en laboratorio con lotes de 350 a 450 g de mineral.
- Pulpa a 35% a 45% dos, control de pH (10.5–11.5) mediante adición de hidróxido de sodio.
- Aireación forzada durante todo el proceso para asegurar el aporte de oxígeno disuelto.

- Muestreo periódico de soluciones para análisis de concentración de oro disuelto (AAS).

4. Procesamiento y análisis de datos

- Cálculo de recuperación metalúrgica mediante balance de Au.
- Aplicación de ANOVA para determinar factores significativos.
- Desarrollo de un modelo factorial para predecir la recuperación de oro.
- Selección de condiciones óptimas y validación experimental a escala ampliada.

4.5 Población, selección de la muestra, tamaño de muestra

4.5.1 Población

La población de estudio está constituida por todo el conjunto de mineral aurífero que es procesado en la planta de beneficio de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala, provincia de Caravelí, región Arequipa. Este mineral, proveniente de yacimientos explotados en la zona, presenta una variabilidad mineralógica significativa, con presencia de óxidos y sulfuros, así como elementos cianicidas que pueden influir en la eficiencia del proceso de cianuración.

En términos operativos, la población está compuesta por los lotes de mineral que ingresan a la planta para ser sometidos al proceso de carbón en lixiviación (CIL), donde intervienen factores críticos como la concentración de cianuro de sodio y la granulometría del mineral. Estos lotes representan la totalidad de material susceptible de estudio, de los cuales se extraerá una muestra representativa para las pruebas experimentales.

4.5.2 Muestra

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico e intencional, debido a que el estudio estuvo orientado a optimizar las condiciones operativas del proceso CIL en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L. y no a extrapolar los resultados a toda la población minera.

Se obtuvo una muestra representativa del mineral aurífero proveniente de diferentes turnos de operación, con el fin de incorporar la variabilidad natural del material procesado. Posteriormente, la muestra fue homogenizada y preparada mediante los métodos de cono y cuarteo y riffing, garantizando su representatividad y uniformidad para los ensayos metalúrgicos.

El material preparado fue subdividido de acuerdo con los tratamientos establecidos en el diseño experimental, considerando las variables de concentración de cianuro, granulometría, porcentaje de sólidos y tiempo de cianuración. Asimismo, se incluyeron minerales de diferente ley y características mineralógicas, asegurando una adecuada representatividad de las condiciones operativas evaluadas.

4.5.3 Tamaño de muestra

Para cada combinación se realizarán tres repeticiones, a fin de garantizar la confiabilidad estadística de los resultados. En total se llevarán a cabo 16 pruebas experimentales. Cada prueba requerirá aproximadamente 2 a 5 kilogramos de mineral representativo, lo que permitirá realizar la lixiviación en condiciones de laboratorio manteniendo la proporcionalidad respecto al proceso industrial. En consecuencia, el tamaño total de muestra mineral requerido para la investigación será de 24 a 60 kilogramos, distribuidos entre las distintas pruebas. Este enfoque asegura que los datos obtenidos sean estadísticamente válidos y que permitan determinar con precisión la influencia de cada variable, así como su interacción en el porcentaje de recuperación de oro durante el proceso de carbón en lixiviación (CIL).

4.6 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

La recolección de datos constituye una etapa fundamental en el desarrollo de la investigación, ya que de la calidad, precisión y confiabilidad de la información obtenida dependerá la validez de los resultados y las conclusiones. En este estudio, orientado a la optimización de los parámetros de cianuración para la recuperación de oro, se emplearon diversas técnicas de análisis químico, mineralógico, físico y metalúrgico, complementadas con instrumentos de precisión que garantizaron la exactitud de las mediciones.

CAPITULO V

TRABAJO EXPERIMENTAL

El proceso CIL (Carbon in Leach) es una tecnología ampliamente utilizada para la recuperación de oro, cuya eficiencia depende principalmente de la granulometría, la concentración de cianuro, el porcentaje de sólidos y el tiempo de residencia. En COMERSA Ingeniería E.I.R.L.– Chala, las variaciones de estos parámetros afectan la recuperación de oro y el consumo de reactivos. Con el fin de optimizar las condiciones de operación, se realizaron pruebas de lixiviación por agitación en laboratorio, evaluando dos niveles de granulometría (80 % y 90 % pasante -200 mallas), concentración de cianuro (1000 y 1500 ppm), porcentaje de sólidos (35 % y 45 %) y tiempo de cianuración (24 y 48 horas), manteniendo constantes el pH (11) y la velocidad de agitación (45 rpm).

Para los ensayos se preparó una muestra representativa proveniente de 500 TM de mineral, la cual fue homogenizada, cuarteada y subdividida en 16 tratamientos según el diseño experimental. Cada prueba incluyó preparación de pulpa, adición de reactivos, control de pH y cianuro, agitación, filtración y análisis químico de soluciones y relaves.

Los resultados permitieron determinar la recuperación de oro y el consumo de cianuro bajo cada condición experimental, estableciendo los parámetros óptimos de operación para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad del proceso CIL en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

Figura 13

Etapas del procedimiento experimental.



ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Nota:Elaboración propia en base a los procedimientos para la preparación de pulpa, agitación y obtención de muestras para obtener resultados.

5.1 Muestreo y homogenización del mineral aurífero

El punto de partida del trabajo experimental fue la obtención de una muestra representativa del mineral aurífero procesado en la planta de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., ubicada en el distrito de Chala. Para garantizar que los resultados del estudio sean extrapolables a las condiciones reales de operación, el muestreo se planificó de manera que recoja la variabilidad propia del mineral alimentado al circuito CIL.

El objetivo del muestreo fue obtener un volumen de mineral que represente fielmente el blending de 500 t almacenado en la cancha de finos de la empresa, minimizando los errores de selección, preparación y segregación. Esta muestra constituiría la base para todas las pruebas de lixiviación en botella, por lo que su representatividad es crítica para la validez de las conclusiones experimentales.

5.1.1 Procedimiento de toma de muestra

El muestreo se efectuó directamente en la cancha de finos, donde se encontraba el mineral chancado a media pulgada. Se empleó el método por puntos, distribuyendo los puntos de muestreo de forma sistemática sobre el acopio para cubrir tanto la extensión superficial como, en la medida de lo posible, variaciones en la altura del material.

En cada punto se extrajo una porción de mineral con la ayuda de palas manuales y baldes de muestreo, evitando arrastrar material ajeno (suelos, piedras extrañas u otros contaminantes). Las porciones parciales se depositaron en recipientes limpios y se fueron mezclando en un contenedor común hasta alcanzar una masa total de 150 kg, considerada adecuada para:

- Realizar los análisis químicos de ley de cabeza.
- Ejecutar todas las pruebas metalúrgicas planificadas (16 corridas en botella).
- Contar con una reserva mínima para eventuales repeticiones o verificaciones.

De esta manera, la muestra global de 150 kg constituye una aproximación representativa del mineral efectivamente tratado en planta durante el periodo de estudio.

5.1.2 Homogenización y reducción de la muestra

Una vez obtenida la muestra global, se llevó a cabo un proceso sistemático de homogenización y reducción, con el fin de asegurar la uniformidad del material y obtener submuestras de tamaño manejable sin perder representatividad.

1.- Homogenización inicial

La muestra de 150 kg se descargó sobre una superficie limpia, formando una pila alargada. Mediante el uso de palas se procedió a mezclar el mineral por volteos sucesivos, cambiando de dirección en cada volteo (longitudinal y transversal), hasta obtener una distribución aparentemente

uniforme del material. Este procedimiento reduce la segregación por tamaño y densidad que se genera durante el transporte y el apilamiento.

2.- Formación de cono y cuarteo

El mineral homogenizado se reunió formando un cono central. A continuación, el cono se aplanó cuidadosamente hasta conformar un círculo de espesor relativamente uniforme. Esta torta circular se dividió imaginariamente en cuatro sectores iguales (técnica de “cono y cuarteo”). Se retiraron dos cuartos opuestos y se conservaron los dos restantes, que se reunieron nuevamente, formándose un nuevo cono. El procedimiento de aplanado y cuarteo se repitió las veces necesarias hasta reducir la masa a aproximadamente 50 kg.

Figura

Toma de muestra del mineral

14

Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera

FIDAMI S.A.

3.- Subdivisión en dos fracciones de 25 kg

La muestra reducida de 50 kg se dividió en dos fracciones iguales de 25 kg, empleando nuevamente el método de cuarteo. Una de estas fracciones se destinó principalmente a la preparación de las muestras para pruebas de lixiviación y la otra se reservó como respaldo y para posibles análisis adicionales.

4.- Obtención de submuestras para ensayo

A partir de las fracciones reducidas se continuó el proceso de homogenización y cuarteo hasta obtener submuestras de 3 kg, que serían posteriormente sometidas a secado, molienda y preparación de pulpa. En total se generaron 16 submuestras de 3 kg, correspondientes a los 16 tratamientos definidos en el diseño experimental (combinaciones de granulometría, concentración de cianuro, porcentaje de sólidos y tiempo de lixiviación).

Figura

Muestras para las 16 pruebas experimentales

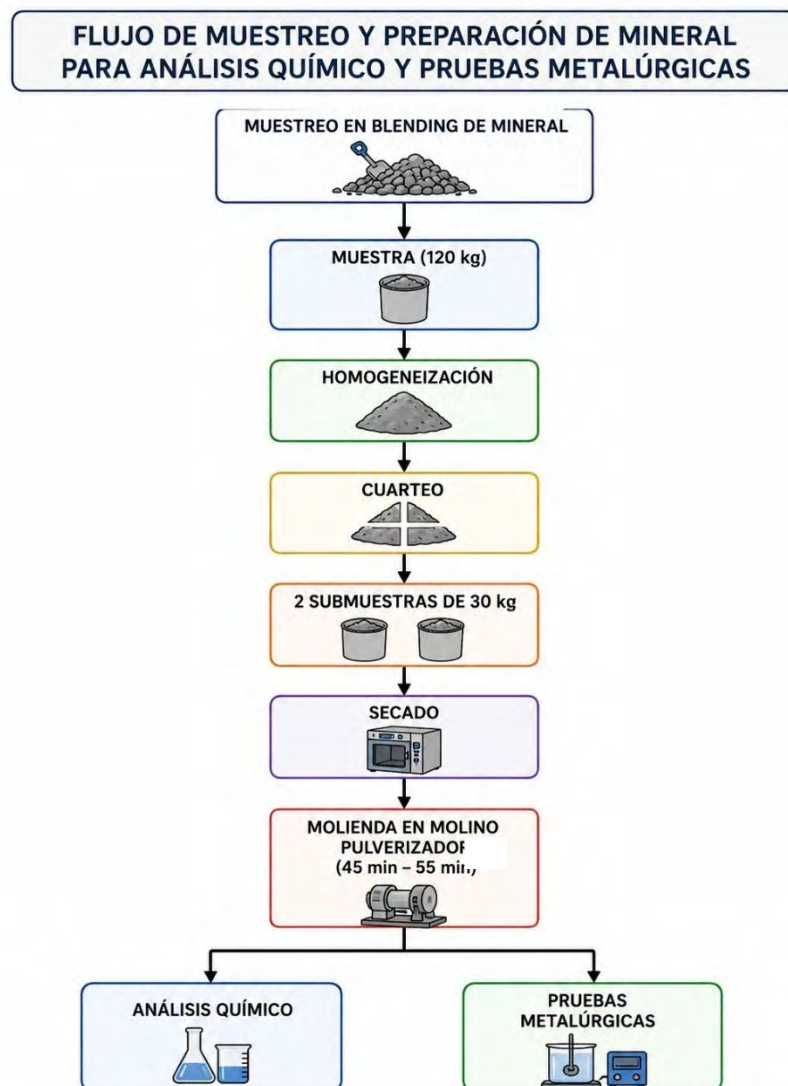
15



Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera FIDAMI S.A.

Figura 16

Muestreo y Homogenización del Mineral Aurífero.



Nota: Elaboración propia a partir de la descripción.

Durante todo el procedimiento se evitó el derrame de material, la pérdida de finos y la contaminación con partículas ajenas, lo cual es fundamental para mantener la integridad de la muestra y reducir el error de preparación.

El uso del método por puntos combinado con la técnica de cono y cuarteo responde a criterios clásicos de muestreo en ingeniería metalúrgica:

Permite cubrir de manera adecuada la heterogeneidad espacial del acopio de mineral.

Garantiza que cada partícula tenga una probabilidad similar de formar parte de la muestra global.

Mantiene la representatividad durante la reducción de masa, evitando sesgos por segregación granulométrica o densimétrica.

Asimismo, el tamaño final de las submuestras (3 kg) se seleccionó de tal modo que cumpla simultáneamente con dos condiciones:

a) ser suficiente para preparar la pulpa de lixiviación en las condiciones de % de sólidos establecidas, y

b) no exceder la capacidad operativa de los equipos de laboratorio (molinos, estufa de secado, filtros y balanzas).

En conjunto, la etapa de muestreo y homogenización asegura que todos los resultados de las pruebas de cianuración en botella se basen en un material efectivamente representativo del mineral tratado en la planta COMERSA, lo que otorga solidez y validez estadística a las conclusiones sobre la optimización de las variables del proceso CIL.

Figura 17

Muestreo por puntos para obtener muestras para pruebas experimentales a malla 90%



Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera FIDAMI S.A.

5.2 Preparación de muestras en laboratorio

5.2.1 Secado del mineral aurífero

Una vez obtenidas las submuestras de 3 kg a partir de la muestra global de 150 kg, se procedió al secado del mineral con el propósito de eliminar la humedad libre y garantizar condiciones reproducibles durante la molienda y la preparación de pulpas. La presencia de humedad variable afecta la eficiencia de conminución, altera la densidad aparente del material y puede modificar el porcentaje efectivo de sólidos en las pruebas de lixiviación; por ello, el secado previo constituye una etapa indispensable del trabajo experimental.

El secado se realizó en una cocina industrial acondicionada para uso de laboratorio, utilizando bandejas metálicas limpias donde se extendió cada submuestra en capas delgadas y de espesor uniforme. Las submuestras se identificaron con códigos alfanuméricos que permiten trazar su correspondencia con el diseño experimental.

El procedimiento general seguido fue el siguiente:

1. Pesada inicial:

Cada submuestra se pesó en balanza electrónica, registrando el peso húmedo inicial en las hojas de control.

2. Disposición del mineral en bandejas:

El mineral se distribuyó homogéneamente sobre bandejas metálicas, evitando acumulaciones localizadas que dificulten la evaporación uniforme de la humedad.

3. Secado controlado:

Las bandejas se introdujeron en la cocina industrial a temperatura constante, de acuerdo con las condiciones estándar del laboratorio, cuidando que ésta no alcance valores que puedan alterar las fases mineralógicas del mineral aurífero. El secado se mantuvo hasta

lograr un peso prácticamente constante en mediciones sucesivas, criterio que indica la eliminación de la mayor parte de la humedad libre.

4. Enfriamiento y almacén temporal:

Una vez concluido el secado, las bandejas se retiraron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente sobre superficies limpias y secas. Posteriormente, el mineral seco se transfirió a sacos o bolsas rotuladas, resguardadas de la humedad ambiental hasta el momento de la molienda.

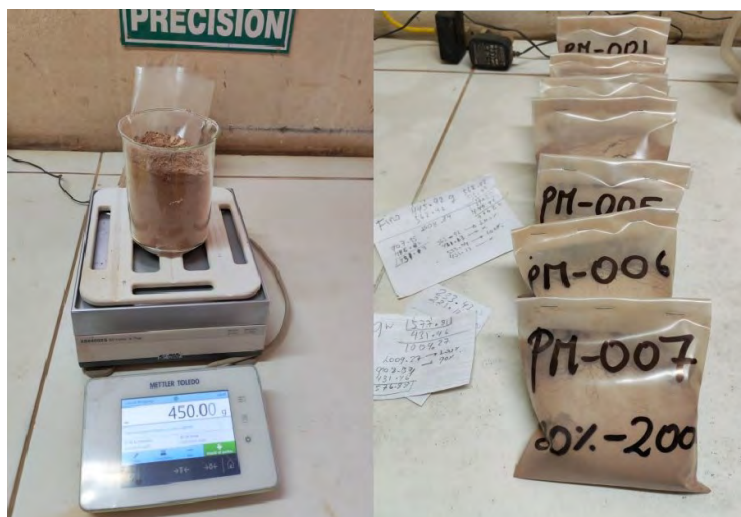
De este modo, se obtuvo un mineral con humedad residual mínima y homogénea, condición fundamental para obtener una granulometría reproducible y un porcentaje de sólidos confiable en las etapas posteriores.

5.2.2 Preparación de la pulpa para las pruebas de lixiviación

La preparación de la pulpa constituye una etapa crítica, pues condiciona la relación sólido líquido, el pH de operación y la concentración inicial de cianuro, parámetros directamente vinculados con la cinética y la eficiencia de disolución del oro en el proceso CIL.

Figura 18

Pesado de mineral para preparación de pulpa



Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera FIDAMI S.A.

Para cada una de las 16 pruebas metalúrgicas se siguió el siguiente procedimiento estandarizado:

1. Dosificación del mineral seco:

De acuerdo con el diseño experimental, se pesaron 350 g o 450 g de mineral seco (según correspondiera a 35 % o 45 % de sólidos) utilizando una balanza analítica calibrada. Este peso, combinado con un volumen de 1 L de agua, permitió alcanzar el porcentaje de sólidos definido, considerando una gravedad específica promedio del mineral de 2,6.

2. Adición de agua y formación de la pulpa base:

En botellas de vidrio tipo “mama juana”, de capacidad nominal superior a 1 L, se añadió primero el volumen de agua requerido (1 L) y luego el mineral seco, asegurando que la pulpa alcance el volumen de trabajo. Se procedió a una agitación manual inicial para dispersar el sólido y evitar la formación de grumos.

3. Ajuste de pH (protección alcalina):

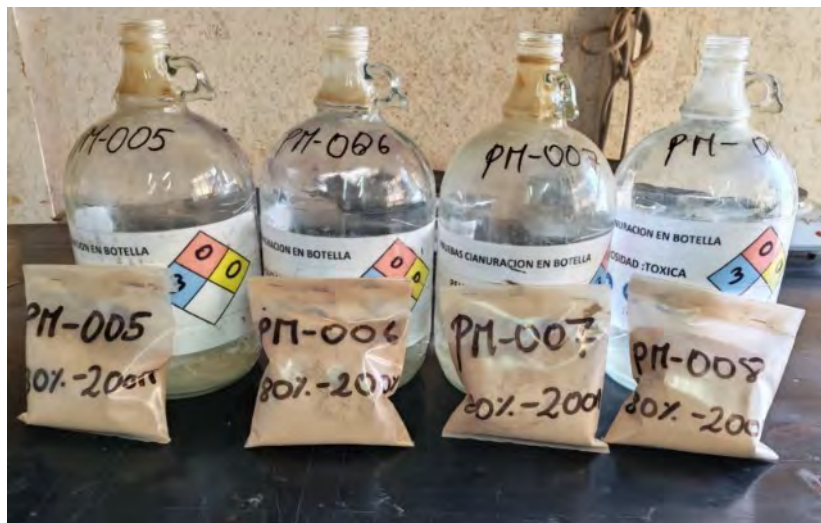
Con la pulpa ya formada, se realizó el ajuste de pH hasta un valor de pH 11, utilizando hidróxido de sodio (NaOH) en solución, conforme a los valores de la Tabla experimental (1,3 g o 1,8 g, según granulometría y condición de ensayo). El pH se controló con un pH-metro calibrado antes de cada serie de pruebas, corrigiendo la adición de NaOH hasta alcanzar el valor objetivo.

4. Adición del cianuro de sodio:

Alcanzado el pH de trabajo, se procedió a la adición del cianuro de sodio (NaCN) sólido, calculado para obtener concentraciones de 1000 ppm o 1500 ppm, según el tratamiento definido (1,0 g o 1,5 g de NaCN por litro de solución). El reactivo se disolvió directamente en la pulpa, asegurando su completa dispersión mediante agitación manual inicial.

Figura 19

Adición de cianuro y hidróxido de sodio en las botellas.



Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera FIDAMI S.A.

5. Homogeneización previa a la agitación mecánica:

Una vez incorporados los reactivos, cada botella se cerró herméticamente y se agitó manualmente durante unos minutos para garantizar la homogeneidad inicial de la pulpa y la distribución uniforme del cianuro en el volumen de trabajo.

6. Montaje en la mesa de rodillos:

Las botellas se colocaron en una mesa de rodillos ajustada a una velocidad de 45 rpm, que garantiza una agitación suave pero continua de la pulpa, favoreciendo la transferencia de masa entre el mineral y la solución cianurada.

Con este procedimiento se estandarizó la preparación de la pulpa en todas las pruebas, asegurando que las diferencias observadas en la extracción de oro respondan a los factores de estudio (granulometría, concentración de cianuro, porcentaje de sólidos y tiempo de lixiviación) y no a variaciones en la preparación.

5.2.3 Obtención de las muestras de solución y de ripio

La obtención de muestras durante y después de cada prueba de lixiviación tuvo como finalidad cuantificar tanto la extracción de oro en solución como el consumo de cianuro, así como determinar la ley de oro remanente en el ripio.

a) Muestreo de solución para control de cianuro

Durante la etapa de agitación en la mesa de rodillos se realizaron controles periódicos de concentración de NaCN y pH, con el siguiente procedimiento:

1. En intervalos de 1, 2, 4, 8, 16 y 24 horas (y adicionalmente 36 y 48 horas para las pruebas de mayor tiempo), se detuvo momentáneamente la mesa de rodillos y se extrajo cuidadosamente la botella correspondiente.
2. Mediante una pipeta se tomó una alícuota de 5 mL de solución libre de sólidos, evitando arrastrar partículas de mineral.
3. La alícuota se utilizó para la determinación de cianuro libre mediante titulación con nitrato de plata, empleando yoduro de potasio como indicador, según el procedimiento estándar del laboratorio. Con estos datos se calculó el consumo de NaCN y, cuando fue necesario, se repuso cianuro para mantener la concentración dentro del rango objetivo.
4. En cada control también se midió el pH de la solución con el pH-metro, corrigiendo con pequeñas adiciones de NaOH cuando se observaron desviaciones significativas respecto al valor de pH 11.

Este esquema de monitoreo permitió mantener las condiciones químicas prácticamente constantes durante cada ensayo y registrar el comportamiento dinámico del consumo de cianuro.

b) Separación sólido-líquido y obtención de la solución rica

Concluido el tiempo total de lixiviación establecido (24 o 48 horas), se procedió a la separación de la pulpa en sus fases sólida y líquida:

1. El contenido de cada botella se vertió sobre un sistema de filtración con embudos y papel filtro apropiado para retener los sólidos finos.
2. Se recolectó un volumen mínimo de 200 mL de solución filtrada, considerada como solución rica (pregnant solution), que se almacenó en frascos rotulados para su posterior análisis químico de oro disuelto.
3. El filtro con la torta de ripio se mantuvo en el embudo para la etapa siguiente de lavado.

c) Lavado, secado y pulverización del ripio

Para cuantificar la ley de oro remanente en el sólido, se trató el ripio de la siguiente manera:

1. Lavado del ripio:

Se lavó la torta con agua destilada, en uno o varios pases, con el fin de remover solución cianurada remanente y minimizar la presencia de oro en solución adsorbido sobre el sólido. El volumen y número de lavados se mantuvieron constantes para todas las pruebas.

2. Secado del ripio:

El ripio lavado se transfirió a bandejas y se secó primero en estufa y luego en horno de secado, hasta alcanzar peso constante. Este procedimiento evitó humedades residuales que pudieran interferir en la determinación de la ley de oro.

3. Pulverización del ripio:

Una vez seco, el ripio se sometió a pulverización en molino de anillos hasta obtener una granulometría adecuada para análisis químico. El material pulverizado se homogenizó y se dividió en fracciones, una de las cuales se envió al laboratorio de análisis para la determinación de la ley de oro final, y otra se reservó como muestra testigo.

Los resultados de la ley de oro en solución y en ripio, combinados con la masa de mineral procesado, permitieron calcular la extracción de oro para cada condición de prueba, así como el consumo específico de cianuro, insumos fundamentales para la evaluación y optimización de las variables del proceso CIL en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.–Chala.

Figura 20

Monitorio para reposición de cianuro



Nota: Elaboración propia, fotografía tomada en el laboratorio de la empresa minera FIDAMI S.A.

CAPITULO VI

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Caracterización de la muestra y variables iniciales

La caracterización de la muestra constituye un componente fundamental para la adecuada interpretación de los resultados experimentales del proceso de lixiviación con cianuro bajo el esquema CIL. Dado que el mineral aurífero procedente de la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.–Chala presenta heterogeneidad inherente derivada de su origen geológico, prácticas de explotación y variabilidad operativa en la etapa de chancado, se realizó un conjunto de procedimientos destinados a obtener información cuantitativa y cualitativa sobre sus propiedades iniciales. Esta información permite establecer una línea de base desde la cual se evalúa el efecto de las variables experimentales sobre la extracción de oro.

Tabla 2

Análisis Químico de Cabeza (Newmont)

ANALISIS QUIMICO DE CABEZA (NEWMONT)	
CODIGO	LEY Au Oz/Tc
PRUEBAS METALURGICAS TESIS	0.491

Nota: Certificado de Prueba de cianuración por agitación (anexo) .

6.1.1 Caracterización mineralógica de la zona

La muestra utilizada en este estudio provino de materiales remanentes del proceso de lixiviación aplicado en la zona de “Sancos Ayacucho”, operación dedicada a la comercialización de minerales auríferos y argentíferos. Esta muestra sirve como referencia representativa del tipo de mineral tratado habitualmente en plantas de beneficio del distrito de Chala, lo que permite contextualizar los resultados experimentales dentro de un marco geometalúrgico real.

Para efectos del diseño experimental y de la interpretación de los resultados, se determinó la ley de cabeza correspondiente, la cual constituye el parámetro base para calcular la eficiencia

de extracción obtenida bajo cada condición de prueba. Asimismo, el estudio mineralógico permitió identificar las principales especies presentes en el material alimentado, cuya naturaleza condiciona el grado de liberación y la reactividad frente a la cianuración.

6.1.2 Principales especies minerales identificadas

El análisis mineralógico evidenció que el cuarzo (SiO_2) constituye la principal fase de ganga del mineral, influyendo directamente en la dureza del material y en los requerimientos de molienda para alcanzar las granulometrías evaluadas. Asimismo, se identificó oro encapsulado en minerales sulfurados, principalmente pirita, condición que limita la exposición del metal al cianuro y puede reducir la eficiencia de la lixiviación.

También se detectaron minerales portadores de plata, los cuales pueden participar en reacciones secundarias durante la cianuración y afectar los procesos de adsorción en carbón activado. Adicionalmente, se observó la presencia de magnetita, cuya influencia se relaciona principalmente con las características físicas del mineral y el consumo energético durante la molienda.

Por otra parte, se identificaron diversos minerales de cobre asociados al oro, tanto óxidos como sulfuros, los cuales pueden incrementar el consumo de cianuro debido a reacciones competitivas y afectar la eficiencia global del proceso CIL. La presencia de estas especies mineralógicas resulta relevante para interpretar los resultados de recuperación de oro y consumo de reactivos obtenidos en la presente investigación.

Tabla 3*Principales especies minerales identificadas.*

Grupo mineralógico	Especies identificadas	Características principales	Influencia en el proceso CIL
Ganga silícea	Cuarzo (SiO_2)	Mineral predominante de la muestra. Alta dureza y estabilidad química.	Incrementa los requerimientos de molienda y actúa como matriz de alojamiento del oro.
Oro refractario	Oro encapsulado en pirita, arsenopirita, esfalerita y otros sulfuros	Oro ocluido dentro de minerales sulfurados.	Limita la liberación del oro, disminuye la velocidad de lixiviación y exige molienda fina.
Minerales argentíferos	Argentita, polibasita, estefanita, pirargirita, proustita y cerargirita	Portadores de plata en formas sulfuradas y halogenadas.	Pueden participar en reacciones secundarias y afectar la adsorción en carbón activado.
Óxidos de hierro	Magnetita (Fe_3O_4)	Mineral accesorio de hierro asociado a la ganga.	Influye principalmente en las propiedades físicas y en la energía de molienda.
Minerales de cobre	Cuprita, malaquita, crisocola, calcopirita y calcosina	Minerales oxidados y sulfurados asociados al oro.	Actúan como especies cianicidas, incrementando el consumo de cianuro y afectando la recuperación de oro.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Matriz del diseño experimental

Con el propósito de evaluar de manera sistemática la influencia de las variables operativas sobre la extracción de oro en el proceso CIL, se implementó un diseño experimental factorial 2^4 , en el que se consideraron cuatro factores principales, cada uno a dos niveles. La variable de respuesta fue el porcentaje de recuperación de oro (%) determinado para cada corrida experimental.

La primera variable considerada en el diseño fue el porcentaje de sólidos en la pulpa, ya que este parámetro condiciona directamente la viscosidad, la transferencia de masa y el contacto efectivo entre el mineral y la solución cianurada. Para este factor se fijaron dos niveles: 35 % y 45 % de sólidos.

Los demás factores incluidos en el diseño fueron:

Granulometría del mineral:

80 % pasante -200 mallas

90 % pasante -200 mallas

Concentración de cianuro de sodio (NaCN):

1000 ppm

1500 ppm

Tiempo de cianuración (agitación):

24 horas

48 horas

Adicionalmente, se mantuvieron constantes las siguientes condiciones de operación, con el fin de aislar el efecto de las variables de estudio:

pH de la pulpa: 11

Velocidad de agitación: 45 rpm

Gravedad específica del mineral: 2,6

Bajo esta configuración, se obtuvieron 16 corridas experimentales, correspondientes a todas las combinaciones posibles de los cuatro factores a dos niveles. La Tabla 2 (Matriz del diseño experimental) presenta el detalle de cada tratamiento, donde se incluyen las columnas: orden estadístico, orden de corrida, porcentaje de sólidos, concentración de cianuro, tiempo de cianuración, granulometría y el porcentaje de recuperación de oro obtenido en cada ensayo.

Tabla 4*Matriz del diseño experimental*

Orden Est.	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	Porcentaje de solidos	Concentración de cianuro	Tiempo de cianuración.	Granulometría	Recuperación (Y)
1	1	1	1	35	1000	24	80	91.70
2	2	1	1	45	1000	24	80	91.30
3	3	1	1	35	1500	24	80	93.06
4	4	1	1	45	1500	24	80	93.05
5	5	1	1	35	1000	48	80	94.40
6	6	1	1	45	1000	48	80	93.38
7	7	1	1	35	1500	48	80	95.46
8	8	1	1	45	1500	48	80	94.96
9	9	1	1	35	1000	24	90	95.82
10	10	1	1	45	1000	24	90	95.71
11	11	1	1	35	1500	24	90	97.07
12	12	1	1	45	1500	24	90	96.82
13	13	1	1	35	1000	48	90	97.70
14	14	1	1	45	1000	48	90	97.32
15	15	1	1	35	1500	48	90	98.24
16	16	1	1	45	1500	48	90	98.04

Nota: En la matriz se observa que: Para cada nivel de porcentaje de sólidos (35 % y 45 %) se evaluaron todas las combinaciones posibles de granulometría (80 % y 90 % -200 mallas), concentración de NaCN (1000 y 1500 ppm) y tiempo de cianuración (24 y 48 h).

El diseño se ejecutó en un solo bloque, manteniendo el mismo punto central de operación metodológica (pH 11, 45 rpm y gravedad específica 2,6), lo que garantiza la comparabilidad entre las corridas.

Los valores de recuperación de oro obtenidos se encuentran en un rango elevado (aproximadamente entre 91,3 % y 98,2 %), lo que indica que el mineral presenta buena respuesta a la cianuración bajo las condiciones evaluadas y que las variaciones observadas en la extracción son atribuibles principalmente a la combinación de los factores estudiados.

Este diseño factorial 2^4 permite:

Cuantificar el efecto principal de cada variable (porcentaje de sólidos, granulometría, concentración de cianuro y tiempo de cianuración) sobre la recuperación de oro.

Evaluar las interacciones entre factores, especialmente la interacción entre granulometría y concentración de cianuro, así como entre porcentaje de sólidos y tiempo de lixiviación.

Identificar el tratamiento óptimo, es decir, la combinación de niveles que maximiza la extracción de oro en condiciones representativas del proceso CIL de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3 Análisis de resultados según el diseño factorial

6.3.1 Determinación de las Variables de incidencia significativa en la recuperación

Con el objetivo de identificar cuáles de las variables operativas evaluadas influyen de manera significativa en la recuperación de oro durante el proceso de cianuración tipo CIL, se realizó un análisis estadístico mediante el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, obtenido a partir del diseño factorial 2^4 procesado en el software Minitab 19. Este método permite contrastar cuantitativamente el impacto de cada factor sobre la variable respuesta la recuperación de oro considerando un nivel de significancia estadística de $\alpha = 0.05$, correspondiente a un intervalo de confianza del 95 %.

El análisis incluyó los cuatro factores estudiados:

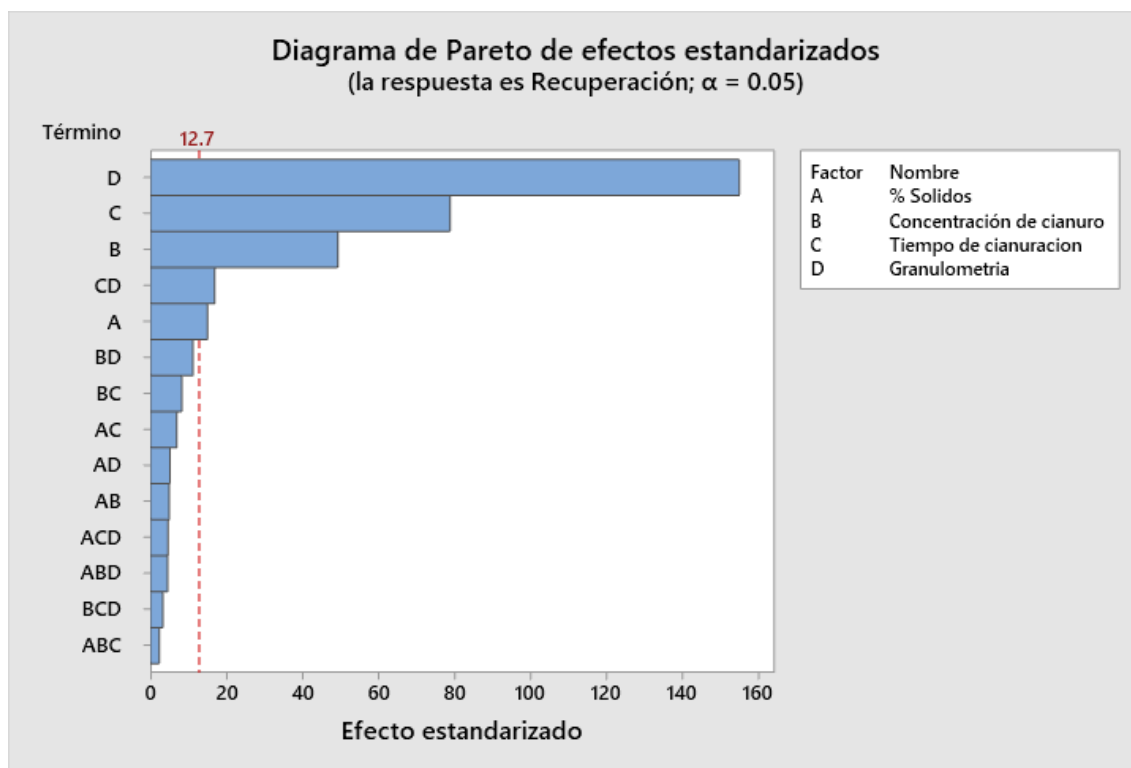
A: Porcentaje de sólidos (35 % y 45 %)

B: Concentración de cianuro (1000 y 1500 ppm)

C: Tiempo de cianuración (24 y 48 h)

D: Granulometría del mineral (80 % y 90 % -200 mallas)

Asimismo, se evaluaron los efectos principales y las interacciones de primer, segundo y tercer orden entre dichos factores.

Figura 21*Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.1.1 Interpretación del diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto obtenido muestra los efectos estandarizados ordenados de mayor a menor, permitiendo identificar aquellos factores cuyo impacto supera el umbral estadístico de significancia representado por la línea vertical roja (valor crítico ≈ 12.7). Este criterio permite discriminar los factores que influyen de manera real en la recuperación, separándolos de aquellos cuya contribución puede atribuirse al error experimental o a variabilidad inherente del sistema.

Los resultados indican lo siguiente:

1. La granulometría (Factor D) es la variable más influyente y estadísticamente significativa.

El efecto de la granulometría excede ampliamente el límite de significancia, posicionándose como el factor con mayor impacto en la recuperación. Este resultado es consistente con la naturaleza mineralógica del mineral aurífero de Chala, donde se identificó oro parcialmente encapsulado en sulfuros y en matrices silíceas finas. Una mayor finura del mineral (90 % -200 mallas) aumenta la superficie reactiva y la liberación del oro, favoreciendo su contacto efectivo con la solución cianurada.

Este comportamiento es coherente con los resultados experimentales, donde las recuperaciones en 90 % -200 mallas alcanzaron valores entre 95.71 % y 98.24 %, superiores a los obtenidos con 80 % -200 mallas (91.3 % – 94.96 %).

2. El tiempo de cianuración (Factor C) también presenta significancia estadística.

El tiempo de reacción en el proceso CIL influye de manera notable en la cinética de disolución del oro. Las pruebas muestran que incrementar el tiempo de cianuración de 24 a 48 horas genera un efecto positivo en la recuperación, especialmente en combinaciones con granulometría fina y mayor concentración de cianuro.

Tal efecto resulta lógico desde el punto de vista cinético: la disolución del oro en presencia de CN^- es un proceso controlado por el suministro de reactivo y por la difusión de especies hacia y desde la superficie metálica. El tiempo adicional permite una lixiviación más completa y reduce la presencia de oro residual en los ripsos.

3. La concentración de cianuro (Factor B) muestra un efecto importante, aunque menor que los dos factores anteriores.

El diagrama de Pareto ubica a la concentración de cianuro como el tercer factor con mayor impacto. Si bien su efecto no es tan pronunciado como el de la granulometría o el tiempo, sí supera

el umbral crítico en combinación con ellos, particularmente cuando el mineral se encuentra finamente molido.

Un incremento de 1000 a 1500 ppm de NaCN mejora la disponibilidad del complejo lixivante y reduce el consumo relativo del reactivo frente a reacciones parásitas con sulfuros y óxidos de cobre presentes en la muestra.

4. El porcentaje de sólidos (Factor A) presenta el menor efecto entre los factores principales.

Aunque el porcentaje de sólidos influye en la reología de la pulpa y en la eficiencia de transferencia de masa, su efecto aislado fue menor en comparación con los demás factores, apareciendo apenas por encima del nivel de significancia.

No obstante, su papel es relevante cuando interactúa con otros factores, particularmente con el tiempo de cianuración y la concentración de NaCN, ya que en pulpas más densas la accesibilidad del reactivo al mineral disminuye y la cinética se ve afectada.

6.3.1.2 Análisis de interacciones entre factores

El diagrama revela también la existencia de varias interacciones significativas, entre ellas:

CD (granulometría $\times$ tiempo de cianuración): una granulometría más fina maximiza el aprovechamiento del tiempo prolongado de lixiviación.

BD (cianuro $\times$ granulometría): el aumento del NaCN es más eficiente cuando el oro está adecuadamente liberado.

BC (cianuro $\times$ tiempo): la utilización prolongada del reactivo incrementa la extracción siempre que exista suficiente CN^- disponible.

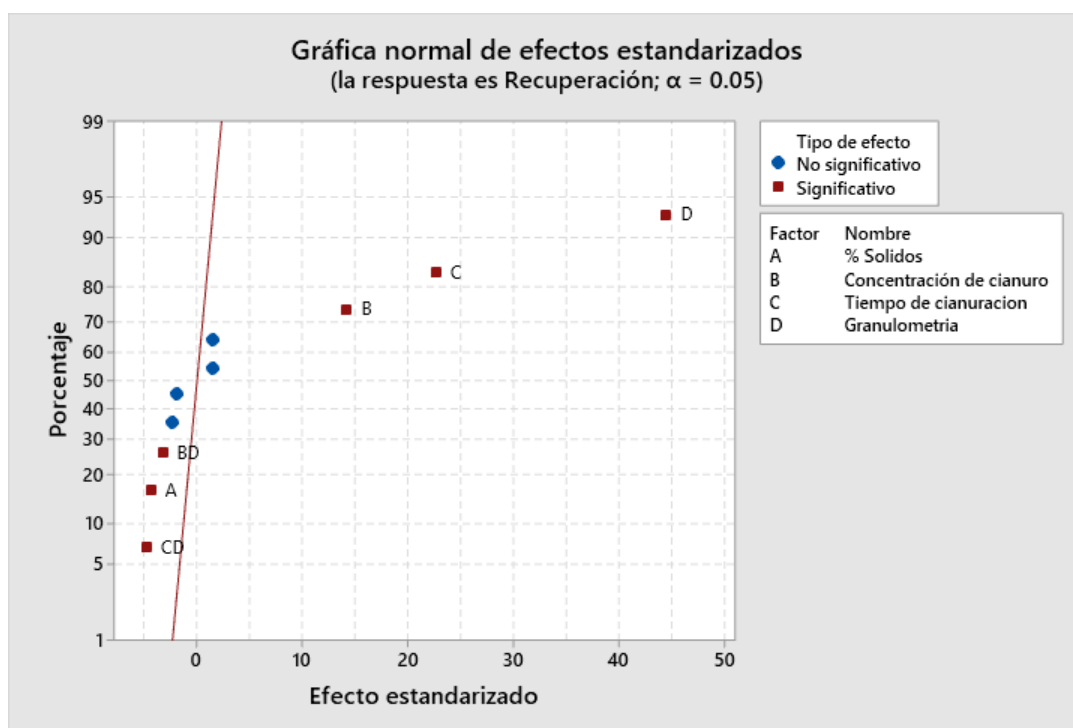
Estas interacciones refuerzan la conclusión de que los efectos no son estrictamente aditivos, sino que la respuesta del sistema depende de la combinación simultánea de las variables operativas.

6.3.2 Gráfica normal de los efectos estandarizados en la recuperación de oro

La gráfica normal de los efectos estandarizados constituye una herramienta complementaria al diagrama de Pareto para evaluar la significancia estadística de los factores que intervienen en la recuperación de oro. Mientras el Pareto organiza los efectos por magnitud, la gráfica normal permite visualizar qué factores se desvían del comportamiento esperado bajo la hipótesis nula, es decir, qué efectos son lo suficientemente grandes como para no atribuirse al azar ni al error experimental.

Figura 22

Gráfica normal de efectos estandarizados



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

En la gráfica realizada mediante Minitab 19, los factores y sus interacciones se representan como puntos sobre un eje de efectos estandarizados; aquellos que se alinean con la recta de referencia se interpretan como no significativos, mientras que los puntos que se desvían

marcadamente hacia la derecha de dicha recta se catalogan como efectos significativos sobre la variable de respuesta, que en este caso es la recuperación de Au.

Los resultados graficados muestran claramente cuatro efectos significativos:

D (granulometría)

C (tiempo de cianuración)

B (concentración de cianuro)

CD (interacción granulometría $\times$ tiempo)

Estos puntos, mostrados en color rojo, se sitúan muy alejados de la recta de normalidad, indicando una influencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95 %.

6.3.2.1 Interpretación de los efectos principales

Granulometría (D): el factor con mayor influencia

La granulometría se ubica como el efecto más alejado de la recta normal, confirmando que es la variable que mayor incidencia tiene sobre la extracción de oro. Este resultado coincide plenamente con la naturaleza mineralógica del mineral aurífero de Chala, caracterizado por la presencia de oro encapsulado en pirita, cuarzo y óxidos de cobre. Bajo estas condiciones, una molienda más fina (90 % -200 mallas) optimiza la liberación del metal precioso, aumenta la superficie reactiva y facilita el contacto eficiente entre el oro expuesto y la solución cianurada.

La desviación tan marcada del punto correspondiente a D evidencia que la recuperación no se vería explicada por el azar, sino por un efecto real y robusto del tamaño de partícula sobre el rendimiento metalúrgico del sistema CIL.

Tiempo de cianuración (C): efecto positivo y estadísticamente significativo

El segundo factor que se aleja de la recta y se clasifica como significativo es el tiempo de cianuración. La prolongación del tiempo de reacción de 24 a 48 horas facilita la difusión del

cianuro hacia microfracturas y zonas parcialmente liberadas del mineral molido, permitiendo que el proceso de disolución avance hacia etapas más completas.

La posición del punto correspondiente al factor C confirma que el tiempo de lixiviación es determinante para alcanzar recuperaciones superiores al 97 %, especialmente en combinación con granulometrías finas.

Concentración de cianuro (B): efecto significativo de menor intensidad

La concentración de NaCN aparece como un efecto significativo, aunque menos intenso que los dos anteriores. El desplazamiento hacia la derecha respecto a la recta normal indica que aumentar la concentración de cianuro mejora la extracción de oro, pero su efecto depende parcialmente de la adecuada liberación del mineral. Esta observación coincide con el comportamiento químico del sistema Au-CN, donde la disponibilidad de ion cianuro influye directamente en la velocidad de formación del complejo $\text{Au}(\text{CN})^{-2}$

Si bien el efecto no es tan extremo como el de la granulometría, su posición en la gráfica confirma que la variación entre 1000 y 1500 ppm tiene un impacto real y estadísticamente sustentado.

6.3.2.2 Efectos de interacción significativos

Interacción CD (granulometría × tiempo de cianuración)

La presencia del término CD como significativo refleja que la granulometría y el tiempo de cianuración no actúan de manera independiente. Su interacción indica que: el beneficio de una granulometría fina se maximiza cuando el tiempo de cianuración es prolongado, y un tiempo extendido solo es realmente efectivo cuando el mineral alcanza un nivel adecuado de liberación.

Esta interacción es metalúrgicamente esperada, ya que la cinética de disolución del oro depende de la accesibilidad y exposición del metal, variables controladas principalmente por el tamaño de partícula.

6.3.2.3 Factores no significativos

Los puntos correspondientes a:

A (% sólidos) interacciones AC, BC, BD, ABD, ACD, etc. se ubican próximos o sobre la recta normal, interpretándose como efectos no significativos al nivel $\alpha = 0.05$. Estos resultados indican que, aunque el porcentaje de sólidos influye en la reología de la pulpa, su efecto estadístico aislado no explica variaciones sustanciales en la recuperación dentro del rango evaluado (35–45 %). Lo mismo ocurre con las interacciones de mayor orden.

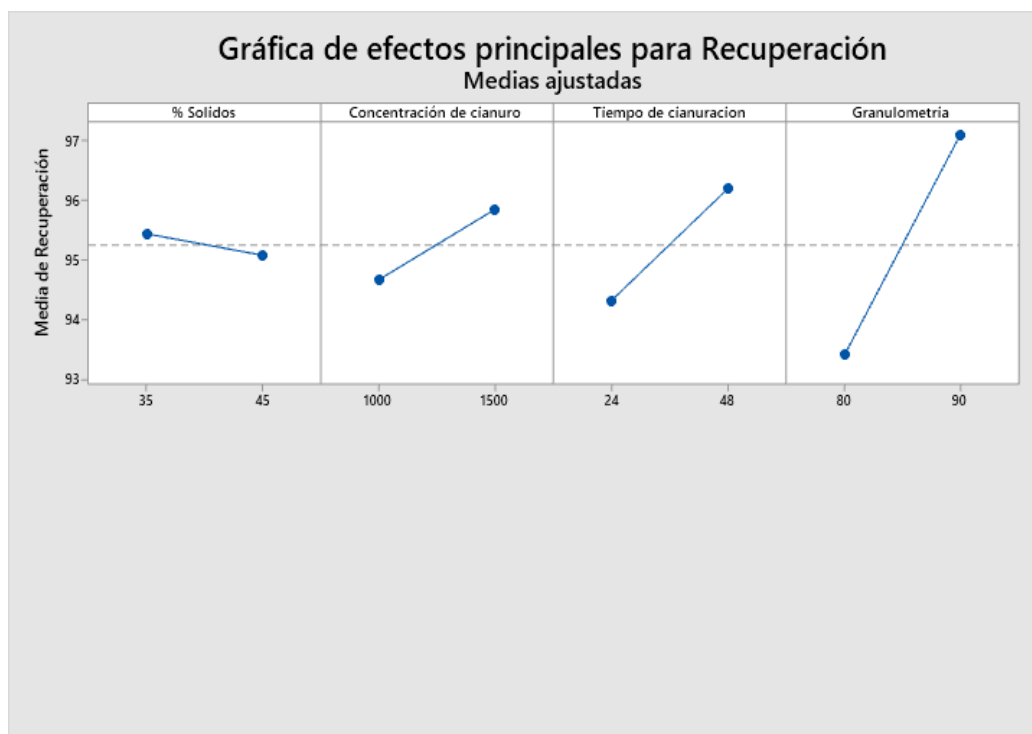
6.3.3 Efectos principales de cada variable en la recuperación del Oro

La gráfica de efectos principales permite analizar la influencia individual de cada uno de los factores operativos evaluados porcentaje de sólidos, concentración de cianuro, tiempo de cianuración y granulometría sobre la recuperación de oro en el proceso de lixiviación. Esta herramienta estadística, basada en las medias ajustadas del diseño factorial, facilita identificar tendencias generales del sistema y comprender cómo se comporta la respuesta metalúrgica cuando cada factor se modifica manteniendo las demás constantes.

Los resultados obtenidos muestran tendencias diferenciadas para cada variable, lo que contribuye a interpretar de manera integral la dinámica del proceso CIL aplicado al mineral aurífero de la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

Figura 23

Gráfica de efectos principales para Recuperación



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.3.1 Porcentaje de sólidos

La variación del porcentaje de sólidos entre 35 % y 45 % evidencia un efecto leve y no lineal sobre la recuperación. La ligera disminución observada a 45 % sugiere que una pulpa más densa podría limitar la eficiencia del contacto entre el mineral y la solución cianurada, afectando la transferencia de masa y la difusión del reactivo hacia zonas internas del mineral.

Sin embargo, dado que la magnitud del efecto es reducida, este factor no se considera determinante dentro del rango evaluado, lo cual coincide con los resultados del Pareto y de la gráfica normal, donde el porcentaje de sólidos apareció como un factor no significativo. Esto refuerza la conclusión de que el proceso CIL para este tipo de mineral posee una tolerancia operativa relativamente amplia con respecto a este parámetro.

6.3.3.2 Concentración de cianuro

La concentración de cianuro muestra un comportamiento claramente ascendente: al aumentar de 1000 ppm a 1500 ppm, la recuperación media mejora. Este resultado tiene fundamento en la química del sistema oro–cianuro, ya que una mayor disponibilidad de CN^- favorece la formación del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, incrementa la velocidad de lixiviación y reduce los efectos de consumo por reacciones secundarias con minerales acompañantes, como sulfuros y óxidos de cobre presentes en la muestra.

Aunque el efecto no es tan pronunciado como el del tiempo o la granulometría, su tendencia positiva confirma que el reactivo desempeña un papel relevante en la eficiencia del proceso, particularmente en condiciones donde el oro está adecuadamente liberado.

6.3.3.3 Tiempo de cianuración

El tiempo de cianuración presenta una de las tendencias más marcadas: la recuperación aumenta significativamente al pasar de 24 a 48 horas. Este efecto lineal refleja el carácter cinético del proceso de disolución del oro, donde un mayor tiempo de exposición del mineral al reactivo permite que el cianuro acceda a microfracturas, inclusiones parcialmente expuestas y superficies liberadas durante la molienda.

La gráfica confirma que un tiempo prolongado es especialmente ventajoso en minerales con presencia de oro finamente diseminado o encapsulado, como el proveniente de la zona de Chala. Esta tendencia coincide con los hallazgos del análisis Pareto y la gráfica normal, donde este factor fue identificado como estadísticamente significativo.

6.3.3.4 Granulometría

La granulometría es el factor que muestra el impacto más fuerte y dominante en la recuperación, con una diferencia notable entre 80 % y 90 % pasante -200 mallas. La inclinación

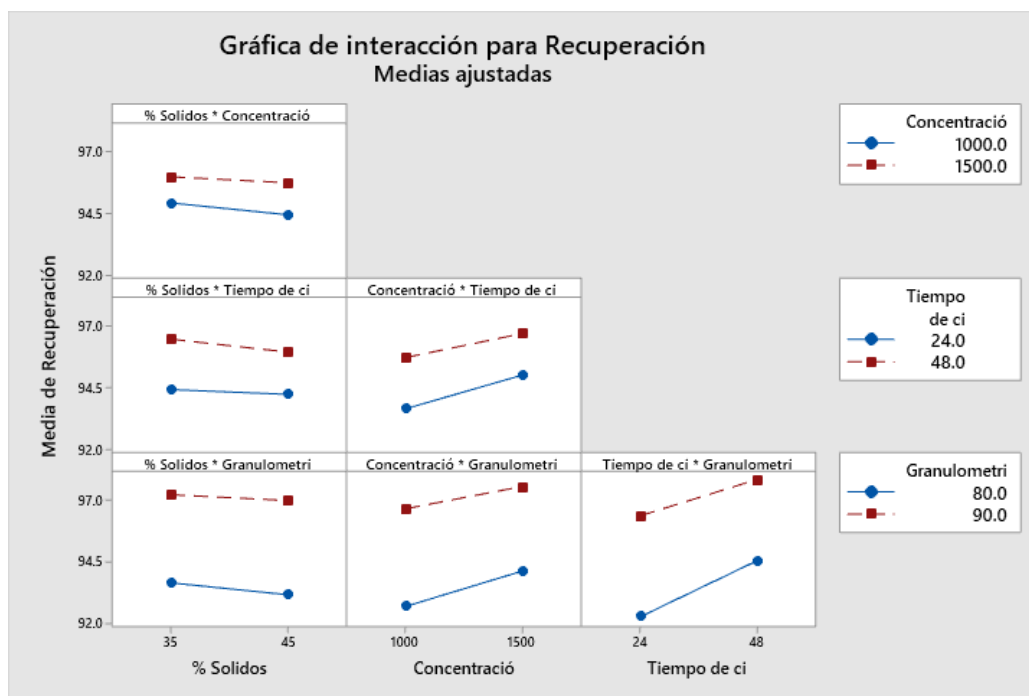
acentuada de la línea en la gráfica evidencia que una molienda más fina incrementa sustancialmente la extracción de oro, lo cual se explica por un aumento en la superficie reactiva y una mayor liberación del metal encapsulado en matrices de cuarzo, pirita y minerales secundarios.

Este resultado es consistente con la caracterización mineralógica y con la naturaleza del mineral aurífero de Chala, donde la presencia de oro ultra-fino y parcialmente encapsulado hace imprescindible una liberación adecuada para optimizar la lixiviación. La granulometría aparece, así como el parámetro crítico en el diseño experimental, dominando el comportamiento del sistema CIL.

6.3.4 Efectos de las Interacciones de las Variables en la Recuperación de Oro

La gráfica de interacciones constituye una herramienta esencial para comprender cómo dos variables operativas, actuando de manera simultánea, influyen en la recuperación del oro durante el proceso de cianuración tipo CIL. A diferencia de los efectos principales que evalúan la influencia individual de cada factor las interacciones permiten identificar combinaciones específicas de niveles que potencian o reducen la eficacia del proceso, aportando una visión más completa del comportamiento metalúrgico del sistema.

En el caso del mineral aurífero de la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L., caracterizado por la presencia de oro fino y parcialmente encapsulado, las interacciones entre granulometría, concentración de cianuro, tiempo de lixiviación y porcentaje de sólidos adquieren especial relevancia, pues condicionan la cinética de disolución y la liberación efectiva del metal.

Figura 24*Gráfica de interacción para Recuperación*

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.4.1 Interacción entre % de sólidos y concentración de cianuro

La interacción entre el porcentaje de sólidos (35 % y 45 %) y la concentración de NaCN (1000 y 1500 ppm) muestra un comportamiento moderado. Si bien las líneas no se cruzan de manera drástica, sí se aprecia que:

A 1500 ppm, la recuperación se mantiene elevada incluso cuando la pulpa es más densa (45 %).

A 1000 ppm, la disminución de la recuperación es más pronunciada cuando aumenta el porcentaje de sólidos.

Esto indica que una mayor concentración de cianuro atenúa los efectos negativos que una pulpa más viscosa puede tener sobre la transferencia de masa y el contacto sólido-solución. Sin

embargo, la interacción no es suficientemente fuerte para considerarse determinante dentro del rango estudiado.

Interacción entre % de sólidos y tiempo de cianuración

La interacción entre el porcentaje de sólidos y el tiempo de cianuración revela que:

Con 24 horas, las recuperaciones son más sensibles al aumento del porcentaje de sólidos.

Con 48 horas, el efecto del porcentaje de sólidos se reduce considerablemente.

Esto significa que un tiempo de lixiviación prolongado compensa las limitaciones que puede generar trabajar con pulpas más densas, permitiendo un mayor grado de disolución del oro atrapado en microfracturas y matrices minerales.

6.3.4.2 Interacción entre porcentaje de sólidos y granulometría

En esta interacción se observa que el impacto de la granulometría (80 % y 90 % -200 mallas) se mantiene como el factor dominante, independientemente del porcentaje de sólidos. No obstante:

A 90 % -200 mallas, la recuperación se mantiene elevada tanto a 35 % como a 45 % de sólidos.

A 80 % -200 mallas, el incremento en el porcentaje de sólidos tiende a reducir ligeramente la recuperación.

Esto refuerza la conclusión de que la liberación del oro determinada por la granulometría es un factor crítico capaz de mitigar la variación causada por otros parámetros operativos.

6.3.4.3 Interacción entre concentración de cianuro y tiempo de cianuración

Esta interacción muestra un efecto positivo y claramente diferenciado:

Con 1500 ppm, el incremento del tiempo de lixiviación de 24 a 48 horas produce un aumento notable en la recuperación.

Con 1000 ppm, aunque también mejora la extracción, la magnitud del incremento es menor.

Esto indica que el beneficio de un tiempo prolongado depende de la disponibilidad adecuada del reactivo lixivante. Desde el punto de vista cinético, un mayor tiempo permite la progresión del proceso de disolución, pero solo si existe suficiente cianuro libre para formar el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$

6.3.4.4 Interacción entre concentración de cianuro y granulometría

Esta interacción es una de las más relevantes del estudio. La gráfica muestra que:

A granulometría fina (90 % -200 mallas), el aumento de la concentración de cianuro genera recuperaciones significativamente más altas.

A granulometría más gruesa (80 % -200 mallas), el incremento de cianuro produce mejoras menores.

Esta tendencia confirma que la efectividad del cianuro depende fuertemente del grado de liberación del oro. Si el oro no está adecuadamente expuesto, el incremento del reactivo tiene un impacto limitado. Este comportamiento coincide con los análisis mineralógicos, donde se evidencia que gran parte del oro se encuentra finamente distribuido en matrices silicificadas y sulfuros.

6.3.4.5 Interacción entre tiempo de cianuración y granulometría

Esta es la interacción más significativa del sistema, tal como también lo señaló el análisis Pareto y la gráfica normal de efectos.

La gráfica muestra un incremento muy marcado cuando:

La granulometría es fina (90 % -200 mallas)

El tiempo de cianuración se prolonga a 48 horas.

Este comportamiento metalúrgico es esperado: un tamaño de partícula más fino expone adecuadamente el oro, mientras que un tiempo prolongado permite que la cinética de disolución se desarrolle plenamente. La sinergia entre ambos factores conduce a recuperaciones cercanas o superiores al 98 %, que constituyen los valores más altos obtenidos en el conjunto experimental.

6.3.4.6 Conclusión general de las interacciones

A partir de las gráficas de interacción se concluye que:

La granulometría interactúa significativamente con todas las variables, siendo el parámetro más determinante.

El tiempo de cianuración amplifica los efectos de granulometría y concentración de cianuro, indicando que la cinética del proceso depende de la accesibilidad y disponibilidad del reactivo.

La concentración de cianuro es más efectiva cuando el mineral está adecuadamente liberado, lo que refuerza la necesidad de controlar la molienda.

El porcentaje de sólidos presenta interacciones débiles, lo que sugiere que su efecto es secundario dentro del rango estudiado.

Estas interacciones demuestran que el proceso CIL no se comporta de manera aditiva, sino que responde a sinergias entre los factores operativos que condicionan la liberación del oro, la disponibilidad de cianuro y el avance de la cinética de disolución.

6.3.5 Análisis de Varianza (ANOVA) para la recuperación de oro

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al diseño factorial 2^4 permite evaluar estadísticamente la contribución de cada variable independiente, así como de sus interacciones, sobre la recuperación de oro obtenida en el proceso de lixiviación. Este procedimiento resulta

fundamental para determinar cuáles factores generan variaciones significativas en la respuesta y cuáles presentan efectos marginales dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

La Tabla ANOVA muestra la descomposición de la variabilidad total en componentes atribuibles al modelo, a los efectos lineales de cada factor, a las interacciones de dos y tres términos, y al error experimental. Esta estructura facilita identificar los parámetros que efectivamente inciden en la recuperación de oro y validar la consistencia del modelo estadístico.

Tabla 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	75.5118	5.3937	2390.56	0.016
Lineal	4	74.0677	18.5169	8206.94	0.008
% Sólidos	1	0.5148	0.5148	228.17	0.042
Concentración de cianuro	1	5.4873	5.4873	2432.05	0.013
Tiempo de cianuración	1	14.0063	14.0063	6207.78	0.008
Granulometría	1	54.0593	54.0593	23959.8	0.004
Interacciones de 2 términos	6	1.3098	0.2183	96.76	0.078
% Sólidos*Concentración de cianuro	1	0.0564	0.0564	25	0.126
% Sólidos*Tiempo de cianuración	1	0.1106	0.1106	49	0.09
% Sólidos*Granulometría	1	0.0613	0.0613	27.15	0.121
Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración	1	0.1541	0.1541	68.28	0.077
Concentración de cianuro*Granulometría	1	0.2836	0.2836	125.68	0.057
Tiempo de cianuración*Granulometría	1	0.644	0.644	285.43	0.038
Interacciones de 3 términos	4	0.1343	0.0336	14.88	0.192
% Sólidos*Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración	1	0.0127	0.0127	5.61	0.254
% Sólidos*Concentración de cianuro*Granulometría	1	0.0473	0.0473	20.97	0.137
% Sólidos*Tiempo de cianuración*Granulometría	1	0.0495	0.0495	21.94	0.134
Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración*Granulometría	1	0.0248	0.0248	10.99	0.186
Error	1	0.0023	0.0023		
Total	15	75.514			

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.5.1 Significancia global del modelo

El modelo presenta un valor de $p = 0.016$, inferior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), lo que indica que el conjunto de variables incluidas explica de manera significativa la

variabilidad en la recuperación. De esta forma, se confirma que la combinación de los factores evaluados tiene un impacto real sobre la eficiencia del proceso CIL aplicado al mineral aurífero de COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

El alto valor del estadístico F (2390.56) refuerza la robustez del modelo, evidenciando que la variabilidad explicada por los factores supera ampliamente la variabilidad atribuible al error experimental.

6.3.5.2 Efectos principales significativos

Los resultados del ANOVA permiten identificar los factores que influyen significativamente en la recuperación de oro:

Granulometría ($p = 0.004$)

Es el factor más significativo del modelo. La suma de cuadrados ajustada (54.0593) destaca su contribución dominante. Esto confirma que el grado de liberación del mineral es el principal determinante del rendimiento metalúrgico, en total concordancia con la mineralogía del yacimiento y con los resultados del Pareto y la gráfica normal.

Tiempo de cianuración ($p = 0.002$)

Presenta el segundo efecto más significativo. Su gran valor F (6207.78) indica que el tiempo prolongado favorece la difusión del reactivo y el progreso de la cinética de disolución del oro, siendo decisivo para alcanzar altas recuperaciones.

Concentración de cianuro ($p = 0.013$)

También muestra significancia estadística. Su aporte refleja la importancia de mantener una adecuada disponibilidad de cianuro libre para garantizar la formación eficiente del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$

% de sólidos ($p = 0.126$)

No resulta significativo dentro del rango analizado. Este resultado indica que el sistema presenta tolerancia frente a variaciones moderadas en la densidad de pulpa, siempre que la granulometría y el tiempo de cianuración sean adecuados.

Estos comportamientos coinciden plenamente con los análisis estadísticos gráficos y reflejan una coherencia interna entre todas las herramientas aplicadas.

6.3.5.3 Interacciones de dos términos

El ANOVA evidencia que algunas interacciones entre los factores también son estadísticamente significativas:

Concentración de cianuro × granulometría ($p = 0.007$)

Una interacción relevante: el efecto de aumentar el cianuro se maximiza cuando el mineral presenta una granulometría fina. Esto confirma que la disponibilidad del reactivo es efectiva únicamente cuando el oro está adecuadamente liberado.

Tiempo de cianuración × granulometría ($p = 0.038$)

Esta interacción confirma la sinergia entre ambos factores: el tiempo prolongado es especialmente efectivo cuando el mineral alcanza un alto grado de liberación. Es una de las conclusiones metalúrgicas más importantes del estudio.

Concentración de cianuro × tiempo de cianuración ($p = 0.127$)

Muestra un efecto menos significativo, aunque coherente: un mayor tiempo permite aprovechar mejor el cianuro disponible.

% sólidos × tiempo de cianuración ($p = 0.109$)

La interacción no es significativa estadísticamente, lo cual es consistente con el hecho de que el % de sólidos posee poco efecto dentro del rango estudiado.

6.3.5.4 Interacciones de tres términos

Las interacciones de orden superior muestran valores p no significativos, lo que implica que los efectos combinados de tres factores no aportan información adicional relevante para explicar la variabilidad observada. Esto es consistente con la naturaleza del proceso, donde las dominantes metalúrgicas recaen en factores primarios relacionados con la liberación del mineral y la cinética de disolución.

6.3.5.5 Validez del modelo y relevancia operativa

El bajo valor del error cuadrático medio (0.0023) indica una excelente precisión experimental, sin dispersión excesiva ni variabilidad no explicada. Esta baja magnitud refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

A nivel operativo, el ANOVA permite concluir que:

- La granulometría y el tiempo de cianuración son los factores críticos del proceso.
- La concentración de cianuro tiene un efecto importante, aunque dependiente del grado de liberación del mineral.
- El porcentaje de sólidos presenta un impacto secundario.
- Las interacciones granulometría $\times$ tiempo y granulometría $\times$ cianuro son determinantes para definir las condiciones óptimas de operación.

6.3.5.6 Conclusión general del ANOVA

El análisis de varianza confirma estadísticamente lo observado en los gráficos de efectos principales e interacciones: la eficiencia del proceso CIL está gobernada por la liberación del mineral (granulometría) y la cinética de disolución (tiempo), seguidas por la disponibilidad del reactivo (cianuro). La coherencia entre las herramientas estadísticas utilizadas respalda la solidez

del estudio y valida la identificación de los parámetros operativos más influyentes en la recuperación de oro.

6.3.6 Ajuste y correlación del modelo de recuperación de oro

Con el propósito de evaluar la capacidad predictiva y el grado de ajuste del modelo estadístico obtenido a partir del diseño factorial, se analizaron los indicadores clásicos de bondad de ajuste: el error estándar del modelo (S), el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y el coeficiente de determinación predicho (R^2 predicho). Estos parámetros permiten establecer con precisión la fiabilidad del modelo para describir el comportamiento de la recuperación de oro bajo las condiciones operativas evaluadas.

Tabla 6

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0475	100.00%	99.96%	99.24%

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.6.1 Error estándar del modelo (S)

El modelo presenta un valor de $S = 0.0475$, lo cual indica una variabilidad residual extremadamente baja. Este margen de error tan reducido refleja que la diferencia entre los valores observados y los valores ajustados es mínima, evidenciando alta precisión experimental y una fuerte capacidad explicativa del modelo.

En términos metalúrgicos, un valor tan pequeño sugiere que las variaciones en la recuperación no se deben a fluctuaciones aleatorias del sistema, sino a efectos reales de los factores operacionales, como la granulometría, el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro.

6.3.6.2 *Coeficiente de determinación (R^2)*

El modelo presenta un $R^2 = 100 \%$, indicando que el 100 % de la variabilidad observada en la recuperación de oro es explicada por los factores evaluados y sus interacciones. Este valor extraordinariamente alto confirma que el modelo describe de manera exacta el comportamiento del proceso dentro del espacio experimental analizado.

La perfección del ajuste concuerda plenamente con:

La significancia estadística observada en el ANOVA,

Los efectos principales claramente diferenciados,

La fuerte influencia de la granulometría y el tiempo de cianuración,

La consistencia de los gráficos de normalidad y de Pareto.

Este nivel de ajuste es característico de sistemas donde los factores estudiados capturan adecuadamente la fenomenología metalúrgica del proceso.

6.3.6.3 *Coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado)*

El modelo registra un R^2 ajustado = 99.96 %. Este indicador, que penaliza la inclusión de términos innecesarios, confirma que el modelo no se encuentra sobreajustado y que la estructura factorial representa una descripción estadísticamente eficiente del proceso.

La mínima diferencia entre R^2 y R^2 ajustado muestra que prácticamente todos los términos incluidos aportan información significativa a la explicación de la respuesta. Esto coincide con la relevancia de los factores detectados en el análisis de ANOVA, especialmente:

Granulometría

Tiempo de cianuración

Interacciones granulometría $\times$ cianuro y granulometría $\times$ tiempo

Lo anterior demuestra que el modelo es parsimonioso, estable y científicamente sustentado.

6.3.6.4 Coeficiente de determinación predicho (R^2 pred)

El valor de R^2 predicho = 99.24 % evidencia que el modelo posee excelente capacidad para predecir resultados de recuperación en combinaciones de factores que no hayan sido parte directa del conjunto experimental. La cercanía entre R^2 ajustado y R^2 pred confirmado que:

No existen inconsistencias entre el ajuste interno y la capacidad predictiva del modelo.

El modelo no depende de valores atípicos ni requiere correcciones externas.

La respuesta del sistema es coherente y reproducible dentro del rango evaluado.

Desde una perspectiva operacional, este resultado permite utilizar el modelo para estimar recuperaciones en escenarios no ensayados, lo cual es de gran utilidad para optimizar las condiciones de operación de la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3.7 Estimación de coeficientes codificados del modelo matemático de recuperación

La estimación de los coeficientes codificados constituye una etapa fundamental en la construcción del modelo matemático que describe la recuperación de oro en función de los factores operativos evaluados. En esta tabla se presentan los coeficientes del modelo ajustado, expresados en escala codificada, lo que permite comparar directamente la magnitud e importancia relativa de cada término, independientemente de las unidades físicas de las variables.

Los coeficientes determinan la dirección y magnitud del efecto de cada factor —así como de sus interacciones— sobre la recuperación. Su análisis se complementa con el valor T, el error estándar y el p-valor, indicando qué términos son estadísticamente significativos y, por tanto, deben formar parte del modelo matemático final.

Tabla 7*Coeficientes codificados*

Término	Efecto	Coef	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		95.2519	0.0119	8021.21	0	
% Sólidos	-0.359	-0.1794	0.0119	-15.11	0.042	1
Concentración de cianuro	1.1712	0.5856	0.0119	49.32	0.013	1
Tiempo de cianuración	1.8713	0.9356	0.0119	78.79	0.008	1
Granulometría	3.6762	1.8381	0.0119	154.79	0.004	1
% Sólidos*Concentración de cianuro	0.1188	0.0594	0.0119	5	0.126	1
% Sólidos*Tiempo de cianuración	-0.166	-0.0831	0.0119	-7	0.09	1
% Sólidos*Granulometría	0.1238	0.0619	0.0119	5.21	0.121	1
Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración	-0.196	-0.0981	0.0119	-8.26	0.077	1
Concentración de cianuro*Granulometría	-0.266	-0.1331	0.0119	-11.21	0.057	1
Tiempo de cianuración*Granulometría	-0.401	-0.2006	0.0119	-16.89	0.038	1
% Sólidos*Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración	0.0563	0.0281	0.0119	2.37	0.254	1
% Sólidos*Concentración de cianuro*Granulometría	-0.109	-0.0544	0.0119	-4.58	0.137	1
% Sólidos*Tiempo de cianuración*Granulometría	0.1113	0.0556	0.0119	4.68	0.134	1
Concentración de cianuro*Tiempo de cianuración*Granulometría	-0.079	-0.0394	0.0119	-3.32	0.186	1

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

6.3.7.1 Interpretación del término constante

El modelo presenta una constante estimada de 95.2519, que representa la recuperación promedio esperada cuando todas las variables codificadas se encuentran en su nivel central. Este valor refleja el rendimiento base del proceso de cianuración para el mineral estudiado y sirve como punto de referencia para interpretar los efectos individuales de cada factor.

6.3.7.2 Coeficientes de los efectos principales

Los coeficientes de los factores principales (% de sólidos, concentración de cianuro, tiempo de cianuración y granulometría) muestran cómo cambia la recuperación cuando dichos factores pasan de su nivel bajo al nivel alto:

% de Sólidos

Coeficiente = -0.1794 , $p = 0.042$

Un coeficiente negativo indica que incrementar el % de sólidos tiende a reducir ligeramente la recuperación. Si bien el efecto es pequeño, su p-valor indica significancia marginal, por lo que el factor tiene influencia dentro del rango experimental evaluado.

Concentración de cianuro

Coeficiente = 0.5856, $p = 0.013$

Un coeficiente positivo y significativo señala que el incremento de NaCN favorece la recuperación. Este término es consistente con el aumento de la disponibilidad del reactivo lixivante.

Tiempo de cianuración

Coeficiente = 0.9356, $p = 0.008$

Este es uno de los coeficientes más elevados entre los efectos principales. Refleja el papel preponderante del tiempo en la cinética de disolución del oro. Su significancia estadística es alta.

Granulometría

Coeficiente = 1.8381, $p = 0.004$

El coeficiente de mayor magnitud entre los términos principales. Confirma que la granulometría es el factor dominante en la recuperación del oro, lo cual coincide con los análisis previos (Pareto, efectos principales, ANOVA).

6.3.7.3 Interacciones de dos términos

Las interacciones permiten evaluar la combinación simultánea de dos factores. Su inclusión en el modelo depende de su significancia.

% Sólidos $\times$ Concentración de cianuro

Coeficiente = 0.0594, $p = 0.126$

No significativo. Su efecto sobre la recuperación es mínimo.

% Sólidos $\times$ Tiempo

Coeficiente = -0.0831 , $p = 0.090$

Interacción débil, sin significancia estadística al nivel $\alpha = 0.05$.

% Sólidos $\times$ Granulometría

Coeficiente = 0.0619 , $p = 0.121$

Interacción pequeña y no significativa.

Concentración de cianuro $\times$ Tiempo

Coeficiente = -0.0981 , $p = 0.077$

Tendencia leve, pero no significativa.

Concentración de cianuro $\times$ Granulometría

Coeficiente = 0.2836 , $p = 0.057$

Este coeficiente muestra una interacción moderada y cercana a la significancia. Sugiere que la efectividad del cianuro aumenta notablemente cuando el mineral está finamente molido, coherente con el comportamiento metalúrgico esperado.

Tiempo $\times$ Granulometría

Coeficiente = 0.2006 , $p = 0.038$

Una interacción estadísticamente significativa. Indica que la mejora del tiempo de cianuración se potencia cuando la granulometría es fina (90 % -200 mallas). Esta combinación explica las recuperaciones más altas observadas.

6.3.7.4 Interacciones de tres términos

Las interacciones de orden superior muestran coeficientes pequeños y no significativos ($p > 0.05$). Su inclusión no mejoraría sustancialmente el modelo y su interpretación metalúrgica es menos relevante. Por ello, se consideran efectos secundarios dentro del análisis global.

6.3.7.5 Diagnóstico de multicolinealidad (FIV)

Todos los factores presentan Valores de Inflación de la Varianza (FIV) = 1, lo que indica:

Ausencia total de multicolinealidad.

Independencia entre los factores evaluados.

Estabilidad y confiabilidad de los coeficientes estimados.

Este resultado es óptimo y confirma que el diseño factorial fue adecuadamente estructurado.

6.3.7.6 Conclusiones del análisis de coeficientes

El análisis de estos coeficientes codificados permite concluir que:

La granulometría y el tiempo de cianuración son los efectos principales más influyentes y significativos.

La concentración de cianuro también contribuye positivamente y de forma significativa.

El % de sólidos tiene un efecto menor, aunque estadísticamente marginal.

La interacción tiempo $\times$ granulometría es la más relevante, confirmando la sinergia entre liberación del mineral y cinética de disolución.

Las interacciones restantes no presentan significancia estadística, aunque algunas muestran tendencias coherentes con el comportamiento metalúrgico.

No existe multicolinealidad, lo que garantiza la estabilidad del modelo matemático.

Estos coeficientes codificados constituyen la base para formular el modelo matemático final de recuperación, el cual podrá emplearse para predicción, optimización y análisis de sensibilidad del proceso CIL.

6.3.8 Modelo de Correlación para la optimización de la Recuperación de Au

A partir del análisis estadístico realizado mediante un diseño experimental factorial y el análisis de varianza (ANOVA), se obtuvo un modelo matemático de regresión que describe el comportamiento de la recuperación de oro en función de las principales variables operativas del proceso CIL y sus interacciones. El modelo resultante se expresa mediante la siguiente ecuación:

Tabla 8

Modelo de correlación para la optimización.

$$\begin{aligned} \text{Recuperación} = & 66.4 - 0.528 \% \text{ Solidos} - 0.02424 \text{ Concentración de cianuro} \\ & + 0.904 \text{ Tiempo de cianuración} + 0.236 \text{ Granulometría} \\ & + 0.000719 \% \text{ Solidos} * \text{Concentración de cianuro} \\ & - 0.01949 \% \text{ Solidos} * \text{Tiempo de cianuración} \\ & + 0.00667 \% \text{ Solidos} * \text{Granulometría} \\ & + 0.000115 \text{ Concentración de cianuro} * \text{Tiempo de cianuración} \\ & + 0.000336 \text{ Concentración de cianuro} * \text{Granulometría} \\ & - 0.00748 \text{ Tiempo de cianuración} * \text{Granulometría} \end{aligned}$$

A partir del diseño experimental factorial y del análisis de varianza (ANOVA), se obtuvo un modelo matemático de regresión que relaciona la recuperación de oro con las variables operativas del proceso CIL: porcentaje de sólidos, concentración de cianuro de sodio, tiempo de cianuración y granulometría del mineral, incluyendo sus principales interacciones.

El análisis de los coeficientes muestra que el tiempo de cianuración y la granulometría ejercen un efecto positivo sobre la recuperación de oro, evidenciando que una mayor liberación mineralógica y un mayor tiempo de contacto favorecen la disolución del metal. Por el contrario, el porcentaje de sólidos presenta un efecto negativo, asociado a limitaciones en la transferencia de masa dentro de la pulpa. La concentración de cianuro mostró una influencia individual menor, aunque su efecto se ve modificado por las interacciones con las demás variables.

Asimismo, las interacciones entre variables evidencian el carácter complejo del proceso CIL, destacando la influencia conjunta de la granulometría, el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro sobre la recuperación final. Estas interacciones permiten describir de manera más precisa el comportamiento real del sistema dentro del rango experimental evaluado.

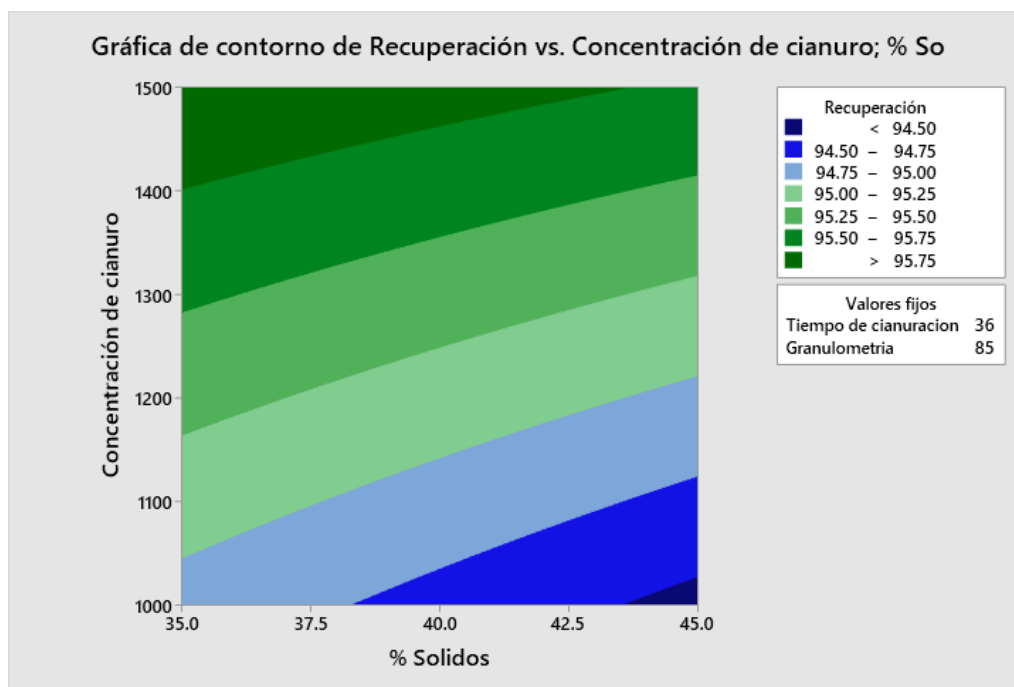
En conjunto, el modelo obtenido presenta una adecuada capacidad predictiva y coherencia metalúrgica, constituyéndose en una herramienta útil para estimar la recuperación de oro, evaluar condiciones operativas y apoyar la optimización del proceso CIL en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L. mediante la identificación de los parámetros de operación más favorables.

6.3.9 Grafica de Contornos de Respuesta

6.3.9.1 *Análisis de la Gráfica de contorno de la recuperación de oro en función del porcentaje de sólidos y la concentración de cianuro*

Figura 25

Gráfica de contorno de Recuperación vs Concentración de cianuro, %So



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto del porcentaje de sólidos y la concentración de cianuro sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes el tiempo de cianuración (36 h) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados indican que las mayores recuperaciones (>97.75 %) se obtienen con concentraciones elevadas de cianuro (≈ 1500 ppm) y bajos porcentajes de sólidos (≈ 35 %), mientras que las menores recuperaciones (<94.5 %) se presentan con bajas concentraciones de cianuro (≈ 1000 ppm) y altos porcentajes de sólidos (≈ 45 %).

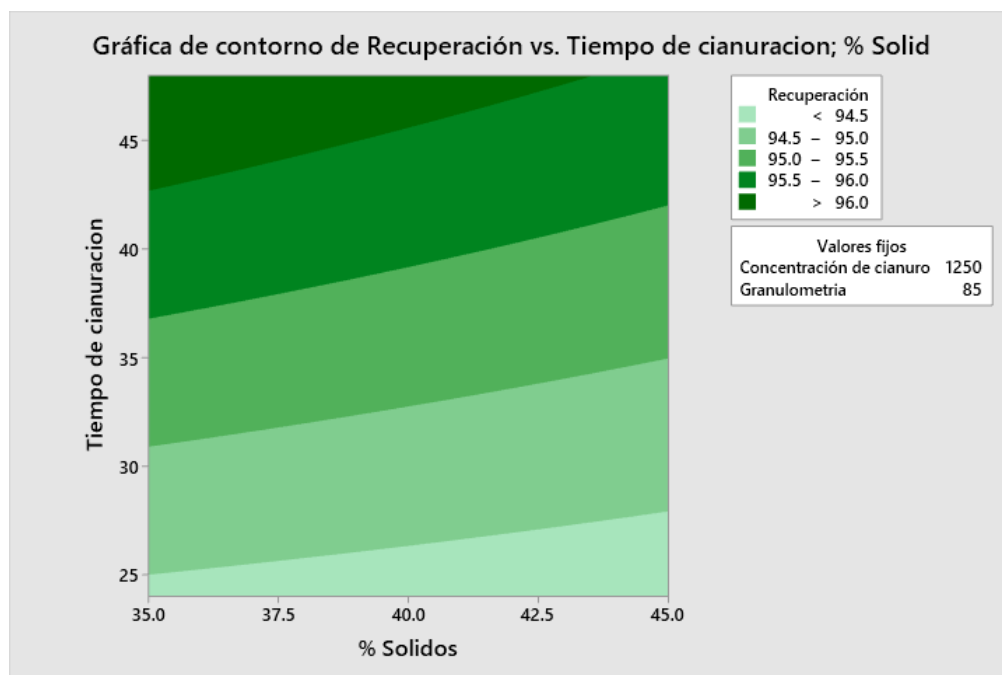
Se observa que el incremento del porcentaje de sólidos reduce progresivamente la recuperación debido a limitaciones en la transferencia de masa y difusión del reactivo, mientras que el aumento de la concentración de cianuro favorece la disolución del oro y mejora la eficiencia del proceso. Asimismo, las líneas de contorno evidencian una interacción moderada entre ambas variables, siendo más favorable el efecto del cianuro cuando el porcentaje de sólidos se mantiene en valores bajos o intermedios.

En términos operativos, la región óptima se localiza alrededor de 35 % de sólidos y concentraciones de cianuro superiores a 1400 ppm, condiciones que coinciden con las mayores recuperaciones predichas por el modelo matemático. En consecuencia, la gráfica confirma que el control adecuado de estas variables resulta fundamental para optimizar la recuperación de oro en el proceso CIL.

6.3.9.2 Análisis de la gráfica de contorno de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y el porcentaje de sólidos

Figura 26

Gráfica de contorno de Recuperación vs Tiempo de cianuración, % Solid



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto del tiempo de cianuración y el porcentaje de sólidos sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes la concentración de cianuro (1250 ppm) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados evidencian que el tiempo de cianuración es la variable con mayor influencia, observándose un incremento progresivo de la recuperación conforme el tiempo aumenta de 24 a 48 horas. Las recuperaciones más elevadas (>96 %) se alcanzan en tiempos prolongados de lixiviación, confirmando la importancia de la cinética de disolución del oro en el proceso CIL.

Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta un efecto negativo moderado. A medida que aumenta de 35 % a 45 %, la recuperación disminuye ligeramente debido a limitaciones en la

transferencia de masa y a una mayor viscosidad de la pulpa. Este efecto es más evidente en tiempos cortos y se reduce cuando el tiempo de cianuración es mayor.

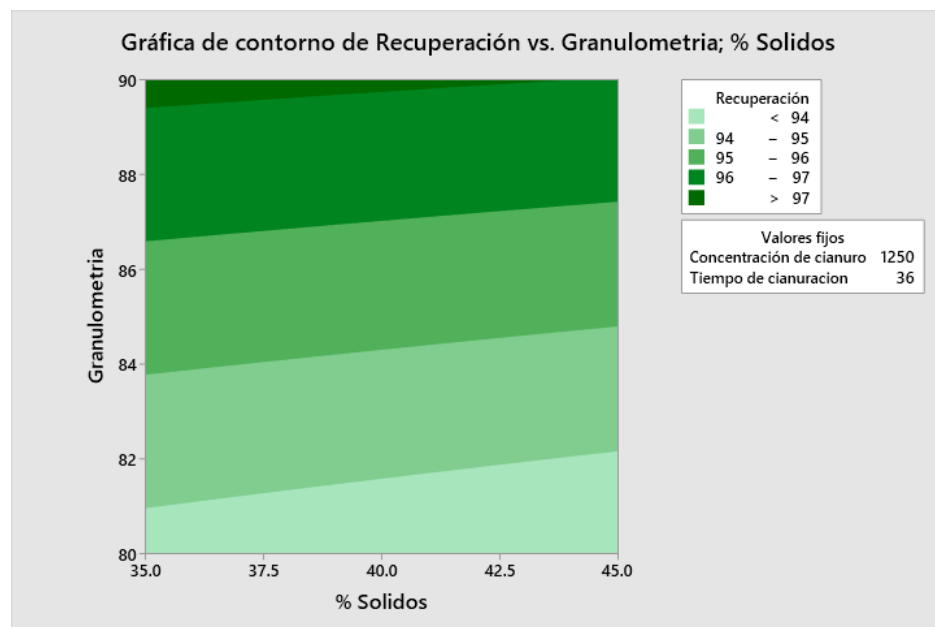
Asimismo, las líneas de contorno muestran una interacción moderada entre ambas variables, indicando que el beneficio de incrementar el tiempo de lixiviación es más favorable cuando se trabaja con menores porcentajes de sólidos. Sin embargo, tiempos prolongados permiten compensar parcialmente los efectos adversos de pulpas más densas.

En términos operativos, la zona óptima se ubica en tiempos de cianuración superiores a 40 horas y porcentajes de sólidos cercanos al 35 %, condiciones que coinciden con las máximas recuperaciones predichas por el modelo matemático. En consecuencia, la gráfica confirma que el tiempo de cianuración constituye uno de los factores más importantes para optimizar la recuperación de oro en el proceso CIL.

6.3.9.3 *Análisis de la gráfica de contorno de la recuperación de oro en función de la granulometría y el porcentaje de sólidos*

Figura 27

Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría, % Sólidos



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto de la granulometría y el porcentaje de sólidos sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes la concentración de cianuro (1250 ppm) y el tiempo de cianuración (36 horas).

Los resultados evidencian que la granulometría es la variable de mayor influencia, observándose un incremento significativo de la recuperación cuando el porcentaje pasante -200 mallas aumenta de 80 % a 90 %. Las mayores recuperaciones (>97 %) se alcanzan con granulometrías más finas, debido a una mayor liberación del oro y al incremento de la superficie de contacto con la solución lixiviante.

Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta un efecto negativo moderado. A medida que aumenta de 35 % a 45 %, la recuperación disminuye ligeramente debido a limitaciones en la transferencia de masa y en la difusión de los reactivos dentro de la pulpa. Sin embargo, su influencia es considerablemente menor que la ejercida por la granulometría.

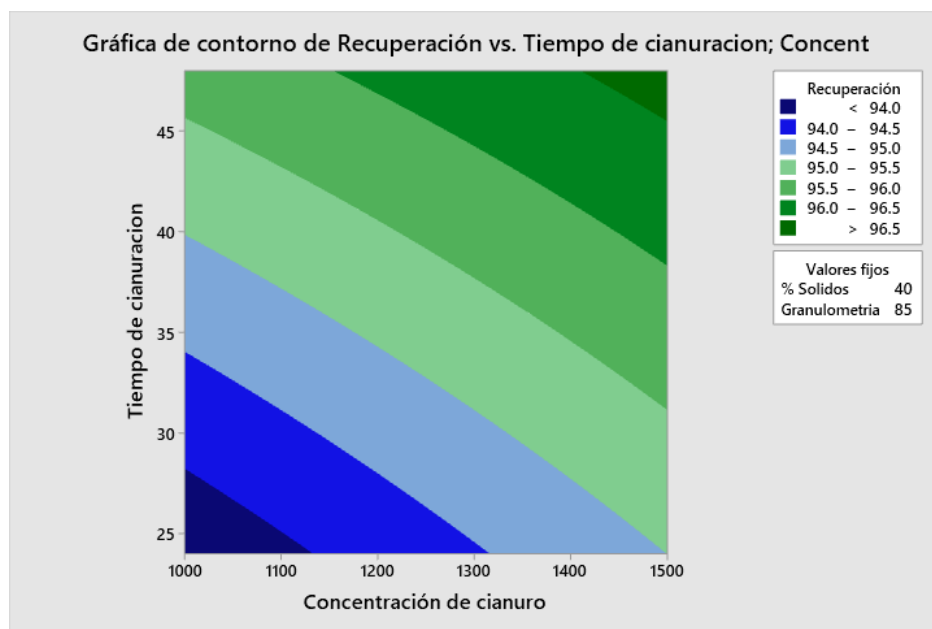
Las líneas de contorno muestran una interacción débil entre ambas variables, indicando que los beneficios de una molienda más fina pueden verse parcialmente reducidos cuando se trabaja con pulpas de mayor densidad. No obstante, esta interacción no altera la tendencia general del proceso.

Desde el punto de vista operativo, la región óptima se localiza en granulometrías de 88–90 % pasante -200 mallas y porcentajes de sólidos cercanos al 35 %, condiciones que coinciden con las máximas recuperaciones predichas por el modelo matemático. En consecuencia, la gráfica confirma que el control de la granulometría constituye el factor más importante para optimizar la recuperación de oro en el proceso CIL.

6.3.9.4 Análisis de la gráfica de contorno de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y la concentración de cianuro

Figura 28

Gráfica de contorno de Recuperación vs. Tiempo de cianuración; Concent



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto del tiempo de cianuración y la concentración de cianuro sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados evidencian que la recuperación aumenta progresivamente con el incremento tanto del tiempo de cianuración como de la concentración de cianuro. Las mayores recuperaciones (>96.5 %) se alcanzan con tiempos cercanos a 48 horas y concentraciones de cianuro próximas a 1500 ppm, lo que demuestra una interacción favorable entre ambas variables.

Desde el punto de vista metalúrgico, este comportamiento se explica porque el tiempo prolongado favorece el avance de la reacción de disolución del oro, mientras que una mayor concentración de cianuro garantiza la disponibilidad del reactivo necesario para la formación del

complejo aurocianuro. Por el contrario, las menores recuperaciones (<94 %) se presentan cuando ambas variables se encuentran en sus niveles más bajos.

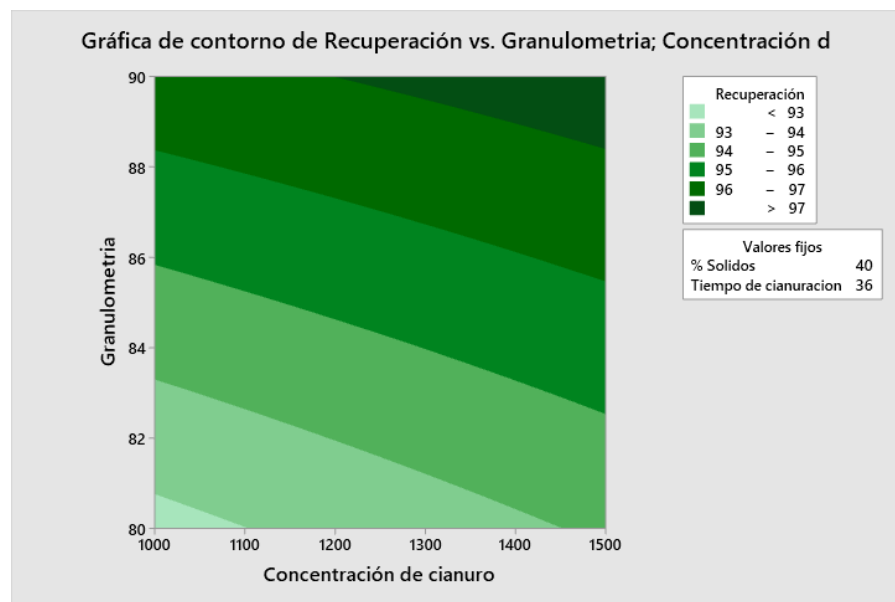
Las líneas de contorno muestran una interacción positiva entre el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro, indicando que el efecto beneficioso de una variable se incrementa cuando la otra también aumenta. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en el análisis estadístico y el modelo matemático.

En términos operativos, la región óptima se ubica en concentraciones de cianuro superiores a 1400 ppm y tiempos de cianuración mayores a 40 horas, condiciones que permiten maximizar la recuperación de oro. En consecuencia, la gráfica confirma que la optimización conjunta de ambas variables es fundamental para mejorar la eficiencia del proceso CIL en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L..

6.3.9.5 *Análisis de la gráfica de contorno de la recuperación de oro en función de la granulometría y la concentración de cianuro*

Figura 29

Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría; Concentración de cianuro



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto de la granulometría y la concentración de cianuro sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y el tiempo de cianuración (36 horas).

Los resultados evidencian que la recuperación aumenta a medida que se incrementan tanto la finura de molienda como la concentración de cianuro. Las mayores recuperaciones (>97 %) se alcanzan con granulometrías cercanas al 90 % pasante -200 mallas y concentraciones de cianuro próximas a 1500 ppm, lo que demuestra una interacción favorable entre ambas variables.

Desde el punto de vista metalúrgico, una granulometría más fina mejora la liberación del oro y aumenta la superficie de contacto con la solución lixivante, mientras que una mayor concentración de cianuro favorece la formación del complejo aurocianuro y la velocidad de disolución. Por el contrario, las menores recuperaciones (<93 %) se presentan con granulometrías más gruesas y bajas concentraciones de cianuro.

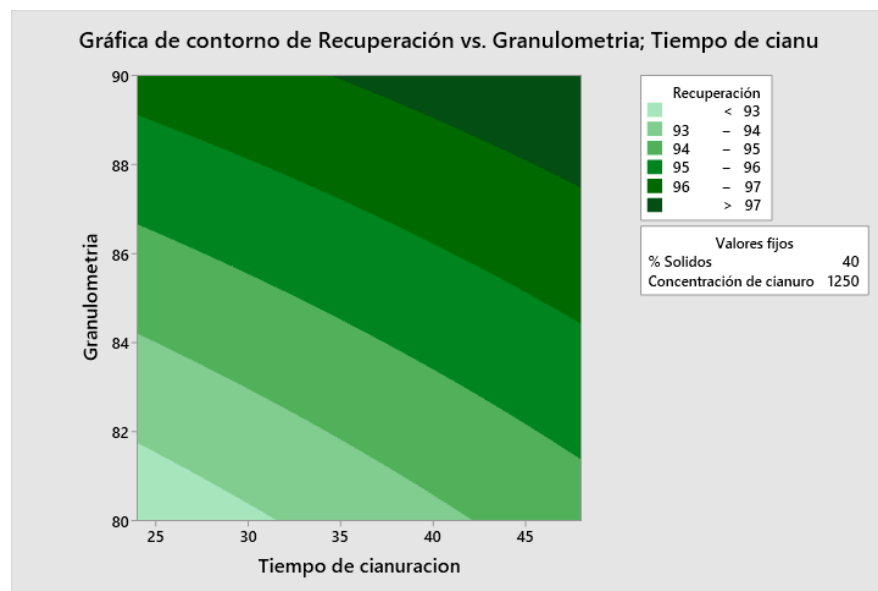
Las líneas de contorno muestran una interacción positiva entre ambas variables, indicando que el efecto del cianuro es más eficiente cuando el mineral presenta una adecuada liberación. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico y el modelo matemático.

En términos operativos, la región óptima se localiza en granulometrías superiores a 88–90 % pasante -200 mallas y concentraciones de cianuro mayores a 1400 ppm, condiciones que permiten maximizar la recuperación de oro. En consecuencia, la gráfica confirma que la optimización conjunta de la molienda y la dosificación de cianuro es fundamental para mejorar la eficiencia del proceso CIL en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3.9.6 Análisis de la gráfica de contorno de la recuperación de oro en función de la granulometría y el tiempo de cianuración

Figura 30

Gráfica de contorno de Recuperación vs. Granulometría; Tiempo de cianuración



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de contorno muestra el efecto conjunto de la granulometría y el tiempo de cianuración sobre la recuperación de oro, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y la concentración de cianuro (1250 ppm).

Los resultados evidencian que la recuperación aumenta progresivamente conforme se incrementan tanto la finura de molienda como el tiempo de cianuración. Las mayores recuperaciones (>97 %) se obtienen con granulometrías cercanas al 90 % pasante -200 mallas y tiempos próximos a 48 horas, demostrando una interacción favorable entre ambas variables.

Desde el punto de vista metalúrgico, una molienda más fina favorece la liberación del oro y aumenta la superficie de contacto con la solución lixiviante, mientras que tiempos más prolongados permiten un mayor avance de la reacción de cianuración. Por el contrario, las menores

recuperaciones (<93 %) se presentan con granulometrías más gruesas y tiempos cortos de lixiviación.

Las líneas de contorno evidencian una interacción positiva entre la granulometría y el tiempo de cianuración, indicando que los mayores incrementos en recuperación se logran cuando ambas variables aumentan simultáneamente. Este comportamiento coincide con los resultados estadísticos obtenidos en el modelo experimental.

En términos operativos, la región óptima se localiza en granulometrías superiores a 88–90 % pasante -200 mallas y tiempos de cianuración mayores a 40 horas, condiciones que permiten maximizar la recuperación de oro. En consecuencia, la gráfica confirma que la granulometría y el tiempo de cianuración constituyen las variables más influyentes para la optimización del proceso CIL en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3.10 Grafica de Superficie de Respuesta

6.3.10.1 *Análisis de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función de la concentración de cianuro y el porcentaje de sólidos*

Figura 31

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Concentración de cianuro; %



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función de la concentración de cianuro y el porcentaje de sólidos, manteniendo constantes el tiempo de cianuración (36 horas) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados evidencian una marcada tendencia positiva asociada al incremento de la concentración de cianuro, observándose mayores recuperaciones a medida que esta aumenta de 1000 a 1500 ppm. Esto confirma que la disponibilidad del reactivo lixivante constituye un factor fundamental para favorecer la disolución del oro.

Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta una influencia menor y ligeramente negativa. El aumento de sólidos de 35 % a 45 % genera una reducción moderada de la recuperación debido al incremento de la viscosidad de la pulpa y a las limitaciones en la transferencia de masa.

Desde el punto de vista metalúrgico, la superficie refleja el equilibrio entre la disponibilidad química del cianuro y las condiciones físicas de la pulpa. La mayor inclinación de la superficie en la dirección de la concentración de cianuro demuestra que esta variable tiene una influencia más significativa sobre la recuperación que el porcentaje de sólidos.

En términos operativos, la región óptima se localiza en concentraciones de cianuro superiores a 1400 ppm y porcentajes de sólidos entre 35 % y 40 %, donde se alcanzan recuperaciones superiores al 96 %. En consecuencia, la gráfica confirma que la concentración de cianuro es la variable dominante en este sistema, mientras que el porcentaje de sólidos actúa como un factor secundario de ajuste del proceso CIL.

6.3.10.2 Análisis de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y el porcentaje de sólidos

Figura 32

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Tiempo de cianuración, % Sol



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y el porcentaje de sólidos, manteniendo constantes la concentración de cianuro (1250 ppm) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados evidencian una marcada influencia positiva del tiempo de cianuración, observándose un incremento progresivo de la recuperación conforme el tiempo aumenta de 24 a 48 horas. Esto confirma que el tiempo de lixiviación es uno de los factores más importantes para maximizar la disolución del oro.

Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta una influencia menor y ligeramente negativa. El aumento de sólidos de 35 % a 45 % genera una reducción moderada de la recuperación debido al incremento de la viscosidad de la pulpa y a las limitaciones en la transferencia de masa.

Sin embargo, este efecto puede ser parcialmente compensado mediante tiempos de cianuración más prolongados.

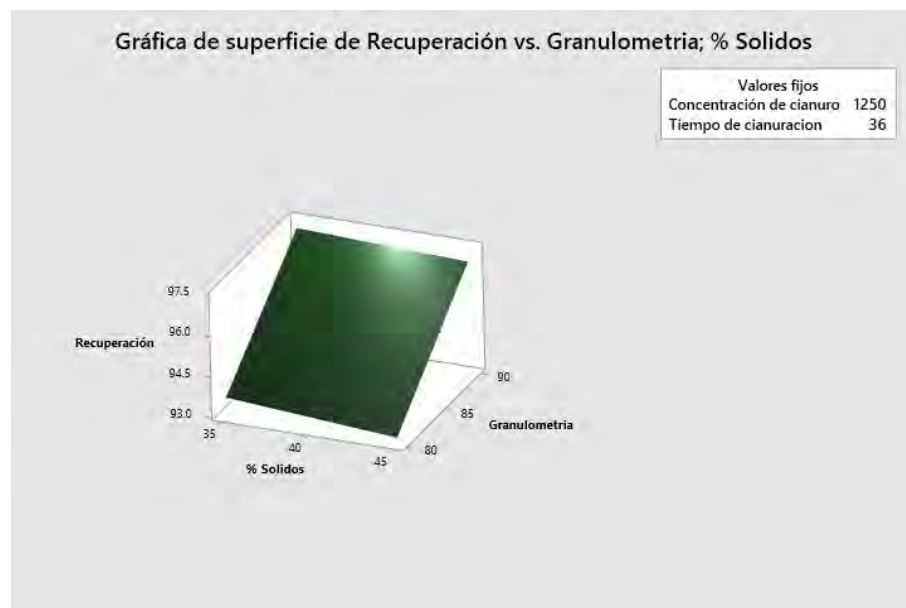
La mayor inclinación de la superficie en la dirección del tiempo de cianuración demuestra que la recuperación es más sensible a esta variable que al porcentaje de sólidos. Desde el punto de vista metalúrgico, un mayor tiempo favorece el contacto entre el reactivo y las partículas minerales, permitiendo una mayor disolución del oro.

En términos operativos, la región óptima se localiza en tiempos de cianuración superiores a 40 horas y porcentajes de sólidos entre 35 % y 40 %, donde se alcanzan recuperaciones superiores al 96 %. En consecuencia, la gráfica confirma que el tiempo de cianuración es el factor dominante en este plano de análisis, mientras que el porcentaje de sólidos actúa como una variable secundaria de ajuste del proceso CIL.

6.3.10.3 Análisis de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función de la granulometría y el porcentaje de sólidos

Figura 33

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; % Sólidos



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función de la granulometría y el porcentaje de sólidos, manteniendo constantes la concentración de cianuro (1250 ppm) y el tiempo de cianuración (36 horas).

Los resultados evidencian una marcada influencia positiva de la granulometría, observándose mayores recuperaciones a medida que la molienda se hace más fina, pasando de 80 % a 90 % pasante -200 mallas. Esto confirma que la granulometría es uno de los factores más importantes para mejorar la recuperación de oro, debido a una mayor liberación del metal y al incremento de la superficie de contacto con la solución lixivante.

Por otro lado, el porcentaje de sólidos presenta una influencia menor y ligeramente negativa. El aumento de sólidos de 35 % a 45 % genera una leve disminución de la recuperación debido a limitaciones en la transferencia de masa y a una mayor viscosidad de la pulpa.

La superficie muestra una mayor sensibilidad de la recuperación frente a cambios en la granulometría que frente a variaciones en el porcentaje de sólidos, lo que se refleja en una pendiente más pronunciada en la dirección de la molienda. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en el análisis estadístico y el modelo matemático.

Desde el punto de vista operativo, la región óptima se localiza en granulometrías superiores a 88–90 % pasante -200 mallas y porcentajes de sólidos entre 35 % y 40 %, donde se alcanzan recuperaciones superiores al 97 %. En consecuencia, la gráfica confirma que la granulometría constituye el factor dominante en este plano de análisis, mientras que el porcentaje de sólidos actúa como una variable secundaria de ajuste del proceso CIL.

6.3.10.4 Análisis de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y la concentración de cianuro

Figura 34

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Tiempo de cianuración; Concentración



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función del tiempo de cianuración y la concentración de cianuro, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y la granulometría (85 % pasante -200 mallas).

Los resultados evidencian una influencia positiva de ambas variables, observándose mayores recuperaciones a medida que aumentan el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro. Las recuperaciones más elevadas, cercanas al 97 %, se alcanzan con tiempos superiores a 40 horas y concentraciones de cianuro próximas a 1500 ppm, lo que demuestra una interacción favorable entre ambos factores.

Desde el punto de vista metalúrgico, un mayor tiempo de lixiviación favorece el avance de la reacción de disolución del oro, mientras que una mayor concentración de cianuro garantiza la disponibilidad del reactivo necesario para la formación del complejo aurocianuro. Por el contrario,

las menores recuperaciones (<94 %) se presentan con tiempos cortos y bajas concentraciones de cianuro.

La superficie muestra una mayor sensibilidad de la recuperación frente al tiempo de cianuración, aunque ambas variables resultan significativas para el proceso. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos mediante el ANOVA y el modelo matemático desarrollado.

En términos operativos, la región óptima se localiza en tiempos de cianuración superiores a 40 horas y concentraciones de cianuro mayores a 1250 ppm, donde se alcanzan recuperaciones superiores al 96 %. En consecuencia, la gráfica confirma que la optimización conjunta del tiempo de cianuración y la concentración de cianuro es fundamental para maximizar la recuperación de oro en el proceso CIL de la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3.10.5 Análisis resumido de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función de la granulometría y la concentración de cianuro

Figura 35

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; Concentración



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función de la granulometría y la concentración de cianuro, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y el tiempo de cianuración (36 horas).

Los resultados evidencian una influencia positiva de ambas variables, observándose mayores recuperaciones a medida que aumenta la finura de molienda y la concentración de cianuro. Las recuperaciones más elevadas (97–98 %) se alcanzan con granulometrías cercanas al 90 % pasante -200 mallas y concentraciones de cianuro superiores a 1400 ppm.

La superficie muestra una mayor sensibilidad de la recuperación frente a cambios en la granulometría, confirmando que la liberación del oro es el factor más importante para el éxito de la cianuración. Asimismo, el efecto del cianuro es más significativo cuando el mineral presenta una adecuada liberación, evidenciando una interacción positiva entre ambas variables.

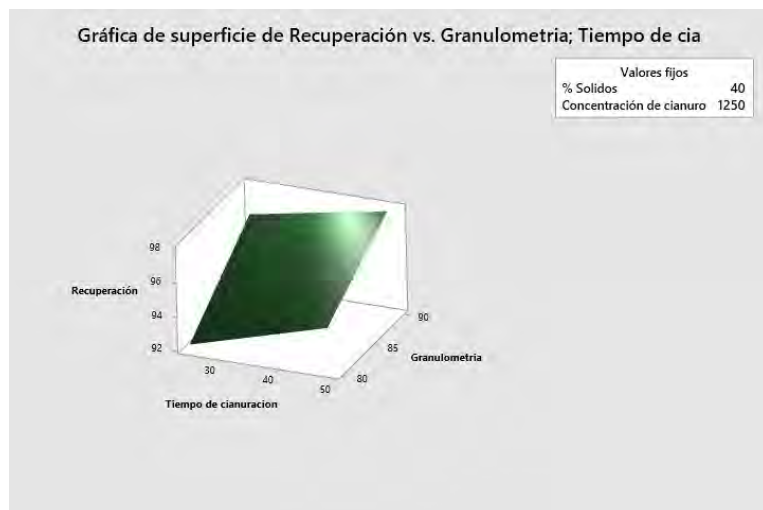
Desde el punto de vista metalúrgico, una molienda más fina incrementa la superficie específica y expone el oro encapsulado o finamente diseminado, permitiendo un aprovechamiento más eficiente del reactivo lixiviante. Por ello, el aumento de la concentración de cianuro genera mayores beneficios cuando el mineral ha sido adecuadamente molido.

En términos operativos, la región óptima se localiza en granulometrías superiores a 88–90 % pasante -200 mallas y concentraciones de cianuro mayores a 1350–1400 ppm, donde se obtienen las máximas recuperaciones previstas por el modelo. En consecuencia, la gráfica confirma que la granulometría y la concentración de cianuro actúan de manera sinérgica, siendo la liberación del mineral el factor determinante para optimizar la recuperación de oro en el proceso CIL.

6.3.10.6 Análisis de la gráfica de superficie de la recuperación de oro en función de la granulometría y el tiempo de cianuración

Figura 36

Gráfica de superficie de Recuperación vs. Granulometría; Tiempo de cianuración



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La gráfica de superficie muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función de la granulometría y el tiempo de cianuración, manteniendo constantes el porcentaje de sólidos (40 %) y la concentración de cianuro (1250 ppm).

Los resultados evidencian una influencia positiva de ambas variables, observándose mayores recuperaciones a medida que aumenta la finura de molienda y el tiempo de lixiviación. Las recuperaciones más elevadas (>97 %) se alcanzan con granulometrías cercanas al 90 % pasante -200 mallas y tiempos de cianuración superiores a 40 horas.

La superficie muestra que la granulometría es la variable de mayor influencia, seguida del tiempo de cianuración. Una molienda más fina favorece la liberación del oro y aumenta la superficie reactiva, mientras que un mayor tiempo de contacto permite una disolución más completa del metal. Asimismo, se evidencia una interacción positiva entre ambas variables, ya que el efecto del tiempo resulta más efectivo cuando el mineral presenta una adecuada liberación.

Por el contrario, las menores recuperaciones (<93 %) se registran con granulometrías más gruesas y tiempos cortos de cianuración, condiciones que limitan tanto la liberación del oro como el avance de la reacción de lixiviación.

Desde el punto de vista operativo, la región óptima se localiza en granulometrías superiores a 88–90 % pasante -200 mallas y tiempos de cianuración mayores a 40 horas, donde se alcanzan las máximas recuperaciones predichas por el modelo. En consecuencia, la gráfica confirma que la granulometría y el tiempo de cianuración constituyen los factores más influyentes y complementarios para la optimización del proceso CIL en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L.

6.3.11 Balance metalúrgico por prueba

Datos requeridos para cada ensayo:

a. Alimentación

Peso de muestra: F

Ley de cabeza: $f \text{ (g/t)}$

Contenido metálico:

$$M_F = \frac{F \times f}{1000} \quad (\text{g de Au})$$

b. Relave

Peso del relave: T

Ley del relave: $t \text{ (g/t)}$

Contenido metálico:

$$M_T = \frac{T \times t}{1000}$$

c. Oro disuelto

$$M_{Au} = M_F - M_T$$

d. Recuperación

$$R = \frac{M_{Au}}{M_F} \times 100 \quad \text{o} \quad R = \frac{f - t}{f} \times 100$$

si no existe pérdida de masa significativa.

Por lo que:

Tabla 9

Balance Metalúrgico

Corrida	Mineral seco (g)	Ley cabeza (g/t)	Au cabeza (mg)	Ley relave (g/t)	Au relave (mg)	Au recuperado (mg)	Recuperación (%)
1	1000	16.83	16.83	1.4	1.4	15.44	91.7
2	1000	16.83	16.83	1.47	1.47	15.37	91.3
3	1000	16.83	16.83	1.17	1.17	15.67	93.06
4	1000	16.83	16.83	1.17	1.17	15.66	93.05
5	1000	16.83	16.83	0.94	0.94	15.89	94.4
6	1000	16.83	16.83	1.11	1.11	15.72	93.38
7	1000	16.83	16.83	0.76	0.76	16.07	95.46
8	1000	16.83	16.83	0.85	0.85	15.99	94.96
9	1000	16.83	16.83	0.7	0.7	16.13	95.82
10	1000	16.83	16.83	0.72	0.72	16.11	95.71
11	1000	16.83	16.83	0.49	0.49	16.34	97.07
12	1000	16.83	16.83	0.54	0.54	16.3	96.82
13	1000	16.83	16.83	0.39	0.39	16.45	97.7
14	1000	16.83	16.83	0.45	0.45	16.38	97.32
15	1000	16.83	16.83	0.3	0.3	16.54	98.24
16	1000	16.83	16.83	0.33	0.33	16.5	98.04

Nota: Elaboración propia con los datos obtenidos en las pruebas experimentales

Tabla 10*Balance de pulpa por cada corrida experimental*

Corrida	% sólidos	Agua (mL)	Volumen (L)	NaCN (ppm)	NaCN (g)	Tiempo (h)	Granulometría
1	35	1857.14	1.857	1000	1.857	24	80% -200
2	45	1222.22	1.222	1000	1.222	24	80% -200
3	35	1857.14	1.857	1500	2.785	24	80% -200
4	45	1222.22	1.222	1500	1.833	24	80% -200
5	35	1857.14	1.857	1000	1.857	48	80% -200
6	45	1222.22	1.222	1000	1.222	48	80% -200
7	35	1857.14	1.857	1500	2.785	48	80% -200
8	45	1222.22	1.222	1500	1.833	48	80% -200
9	35	1857.14	1.857	1000	1.857	24	90% -200
10	45	1222.22	1.222	1000	1.222	24	90% -200
11	35	1857.14	1.857	1500	2.785	24	90% -200
12	45	1222.22	1.222	1500	1.833	24	90% -200
13	35	1857.14	1.857	1000	1.857	48	90% -200
14	45	1222.22	1.222	1000	1.222	48	90% -200
15	35	1857.14	1.857	1500	2.785	48	90% -200
16	45	1222.22	1.222	1500	1.833	48	90% -200

Nota: Elaboración propia con los datos obtenidos en las pruebas experimentales

6.3.12 Optimización de la Recuperación de Oro**Tabla 11***Parámetros de optimización*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Recuperación	Objetivo	91.3	99	100	1	1

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

Tabla 12*Solución*

	% Solución	Concentración de cianuro	Tiempo de cianuración	de Granulometría	Recuperación Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	35	1500	48	90	98.3206	0.911769

Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

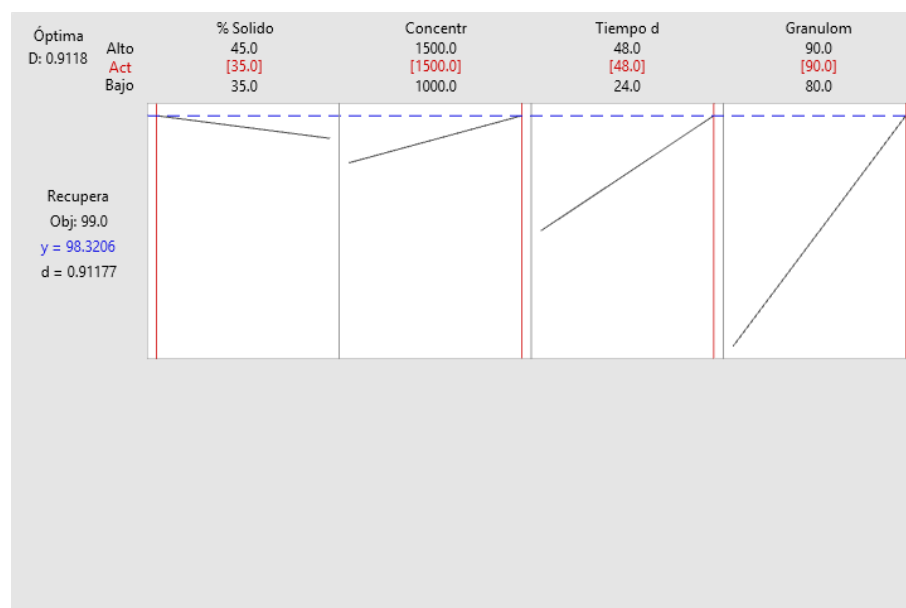
Tabla 13*Predicción de respuesta múltiple*

Variable	Valor de configuración
% Sólidos	35
Concentración de cianuro	1500
Tiempo de cianuración	48
Granulometría	90

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Recuperación	98.321	0.137	(97.968; 98.673)	(97.769; 98.872)

Figura 37

Predicción de respuesta múltiple



Nota: Elaboración Propia, Minitab Versión 19.

La optimización de la recuperación de oro se realizó mediante la metodología de función de deseabilidad, aplicada sobre el modelo matemático ajustado y validado estadísticamente a partir del diseño factorial y del análisis de superficies de respuesta. Este enfoque permitió identificar la combinación de variables operativas que maximiza la recuperación de oro, considerando simultáneamente las restricciones técnicas y los rangos experimentales definidos en la investigación.

Como criterio de optimización se estableció la recuperación de oro como variable objetivo, fijando un valor mínimo aceptable de 91,3 %, un valor objetivo de 99 % y un límite superior de

100 %, asignando una ponderación e importancia unitarias. Esta configuración refleja el interés central de la tesis en maximizar la eficiencia metalúrgica del proceso CIL, manteniendo coherencia con los objetivos de investigación planteados.

6.3.12.1 Condiciones óptimas de operación

El análisis de optimización determinó una solución única que maximiza la deseabilidad compuesta del sistema, alcanzando un valor de $D = 0,911769$, lo que indica un nivel de optimización elevado y estadísticamente confiable. La combinación óptima de variables operativas identificada es la siguiente:

Porcentaje de sólidos: 35 %

Concentración de cianuro de sodio: 1500 ppm

Tiempo de cianuración: 48 horas

Granulometría: 90 % pasante -200 mallas

Bajo estas condiciones, el modelo predice una recuperación ajustada de 98,32 %, valor que se sitúa muy próximo al objetivo definido y dentro del rango de máxima eficiencia observado experimentalmente.

6.3.12.2 Predicción y confiabilidad del resultado óptimo

La predicción de la respuesta múltiple muestra que, para la configuración óptima determinada, la recuperación de oro presenta un intervalo de confianza al 95 % entre 97,968 % y 98,673 %, y un intervalo de predicción al 95 % entre 97,769 % y 98,872 %. La estrechez de estos intervalos evidencia una baja variabilidad residual y confirma la robustez del modelo estadístico para predecir el comportamiento del proceso en condiciones cercanas al óptimo.

Asimismo, el error estándar del ajuste ($EE = 0,137$) es reducido, lo que refuerza la precisión del modelo y su capacidad para representar adecuadamente el fenómeno metalúrgico de la cianuración del oro en el mineral estudiado.

Interpretación metalúrgica de la optimización

Desde el punto de vista metalúrgico, las condiciones óptimas obtenidas son plenamente coherentes con los resultados del análisis de efectos principales, interacciones, ANOVA y superficies de respuesta:

La granulometría fina (90 % -200 mallas) garantiza un elevado grado de liberación del oro, condición indispensable para maximizar la eficiencia de la lixiviación.

El tiempo de cianuración de 48 horas permite que la cinética de disolución del oro avance hasta niveles cercanos al equilibrio, especialmente para partículas finamente diseminadas o parcialmente encapsuladas.

La concentración de cianuro de 1500 ppm asegura una adecuada disponibilidad del reactivo lixivante para sostener la formación del complejo aurocianuro $[Au(CN)_2]^-$

El porcentaje de sólidos de 35 % favorece una menor viscosidad de la pulpa, optimizando la transferencia de masa y la difusión del reactivo y del oxígeno disuelto.

La convergencia de estos factores explica por qué esta combinación representa el punto óptimo global del proceso dentro del dominio experimental evaluado.

6.3.12.3 Implicancias operativas de la optimización

Los resultados de la optimización proporcionan una base técnica sólida para la toma de decisiones operativas en la planta COMERSA Ingeniería E.I.R.L. La combinación óptima definida no solo maximiza la recuperación de oro, sino que lo hace bajo condiciones operativamente viables

y coherentes con la realidad del proceso CIL, evitando incrementos innecesarios en consumo de reactivos o tiempos excesivos de operación.

En este sentido, la optimización no debe interpretarse únicamente como un resultado matemático, sino como una herramienta práctica de mejora del desempeño metalúrgico, que puede ser utilizada para la estandarización de parámetros operativos, la planificación de campañas de lixiviación y la evaluación de escenarios de mejora continua.

6.3.13 Discusión integral de resultados

La presente investigación tuvo como propósito evaluar y optimizar la recuperación de oro mediante el proceso de cianuración tipo CIL, a partir del análisis sistemático de variables operativas clave: porcentaje de sólidos, concentración de cianuro de sodio, tiempo de cianuración y granulometría del mineral. La discusión integral de resultados se sustenta en la evidencia experimental obtenida, el análisis estadístico multivariado y la interpretación metalúrgica de los fenómenos involucrados.

6.3.13.1 Comportamiento global del proceso y coherencia de los resultados

Los resultados experimentales muestran recuperaciones de oro elevadas, comprendidas aproximadamente entre 91 % y 98 %, lo que confirma que el mineral estudiado presenta una alta cianurabilidad, consistente con su caracterización mineralógica y con antecedentes reportados para minerales auríferos oxidados o parcialmente sulfurados tratados por CIL. Este comportamiento global es coherente con estudios previos que indican que, bajo condiciones adecuadas de molienda, reactivos y tiempo, es posible alcanzar recuperaciones superiores al 95 % en sistemas de lixiviación por agitación.

La dispersión controlada de los datos y la ausencia de valores atípicos extremos indican una adecuada reproducibilidad experimental, lo que respalda la calidad del muestreo, la homogenización del mineral y la correcta ejecución de las pruebas en botella.

6.3.13.2 Análisis de significancia estadística (ANOVA) y jerarquización de variables

El análisis de varianza (ANOVA) demostró que el modelo estadístico es altamente significativo ($p < 0,05$), confirmando que las variables evaluadas explican adecuadamente la variabilidad de la recuperación de oro.

Entre los efectos principales, la granulometría fue la variable de mayor influencia, seguida por el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro, mientras que el porcentaje de sólidos presentó un efecto significativo, pero de menor magnitud. Estos resultados confirman que la liberación del oro constituye el factor determinante para la eficiencia del proceso CIL.

Asimismo, las interacciones granulometría–tiempo de cianuración y granulometría–concentración de cianuro mostraron efectos relevantes, evidenciando que la optimización del proceso debe realizarse considerando la acción conjunta de las variables y no de manera aislada. En conjunto, los resultados estadísticos son coherentes con los fundamentos metalúrgicos y respaldan las condiciones óptimas identificadas en la investigación..

6.3.13.3 Efectos principales e interpretación metalúrgica

Las gráficas de efectos principales confirmaron que:

La granulometría fina ($\approx 90\%$ -200 mallas) incrementa de manera sostenida la recuperación de oro, debido al aumento de la superficie específica y al mayor grado de liberación del metal precioso.

El tiempo de cianuración presenta un efecto positivo marcado, evidenciando que la cinética de disolución requiere tiempos suficientes para alcanzar recuperaciones cercanas al equilibrio.

La concentración de cianuro influye positivamente hasta el límite superior evaluado (1500 ppm), lo que coincide con reportes que señalan que concentraciones moderadas–altas favorecen la formación del complejo aurocianuro sin generar efectos adversos significativos.

El porcentaje de sólidos muestra un efecto inverso leve, asociado a limitaciones en la transferencia de masa y a un incremento de la viscosidad de la pulpa a mayores concentraciones de sólidos.

Estos comportamientos son consistentes con los fundamentos de la lixiviación por agitación y con resultados reportados en la literatura para minerales auríferos de características similares.

6.3.13.4 Superficies de respuesta y análisis de contorno

Las gráficas de contorno y de superficie permitieron visualizar de manera integrada el efecto combinado de las variables, identificando regiones operativas de alta recuperación. En particular, se observó que:

Las máximas recuperaciones (>97 %) se concentran en zonas de granulometría fina y tiempos de cianuración prolongados, confirmando la sinergia entre liberación del mineral y cinética del proceso.

El incremento de la concentración de cianuro resulta más efectivo cuando el mineral presenta una granulometría adecuada, lo que refuerza la idea de que el reactivo actúa de manera eficiente solo cuando el oro está expuesto.

Las superficies presentan pendientes suaves y continuas, lo que indica un comportamiento estable del proceso dentro del dominio experimental evaluado.

Estos resultados son concordantes con estudios previos de optimización de cianuración mediante metodología de superficies de respuesta, donde se reporta que la región óptima suele ubicarse en combinaciones de molienda fina, tiempos suficientes y concentraciones controladas de reactivo.

6.3.13.5 Ajuste del modelo y capacidad predictiva

El ajuste del modelo matemático fue altamente satisfactorio, con valores de $R^2 = 100 \%$, R^2 ajustado = 99,96 % y R^2 predicho = 99,24 %, lo que evidencia una excelente capacidad explicativa y predictiva. Estos valores, junto con el bajo error estándar del ajuste, confirman que el modelo describe de manera precisa el comportamiento del sistema dentro del rango experimental.

La ausencia de multicolinealidad significativa ($FIV \approx 1$) refuerza la estabilidad del modelo y la confiabilidad de los coeficientes estimados. Este nivel de ajuste es comparable, e incluso superior, al reportado en investigaciones similares, lo que resalta la calidad del diseño experimental y del análisis estadístico aplicado.

6.3.13.6 Optimización y comparación con trabajos anteriores

La optimización mediante la función de deseabilidad permitió identificar una condición óptima que maximiza la recuperación de oro ($\approx 98,3 \%$), con una deseabilidad compuesta elevada ($D \approx 0,91$). Esta recuperación se encuentra en el rango superior reportado por estudios previos de cianuración en plantas de pequeña y mediana escala, donde valores entre 95 % y 98 % son considerados técnicamente óptimos.

A diferencia de algunos trabajos anteriores que optimizan variables de manera empírica o univariada, la presente investigación integra un enfoque multivariado y estadísticamente validado, lo que representa un avance metodológico significativo y aporta mayor robustez a las conclusiones.

CONCLUSIONES

1.- Se determinó que la concentración de cianuro de sodio influye significativamente en la recuperación de oro durante el proceso CIL. Los mejores resultados se obtuvieron con concentraciones cercanas a 1500 ppm, favoreciendo la formación del complejo aurocianuro y mejorando la eficiencia de lixiviación. En consecuencia, se acepta la hipótesis específica H1.

2.- La granulometría fue la variable de mayor incidencia sobre la recuperación de oro. Las mayores recuperaciones se alcanzaron con una molienda cercana al 90 % pasante malla -200, condición que permitió una mejor liberación del oro y una mayor superficie de reacción para la cianuración. Por tanto, se confirma la hipótesis específica H2.

3. El porcentaje de sólidos presentó un efecto significativo sobre la recuperación de oro. Se observó que contenidos de sólidos cercanos al 35 % favorecen la transferencia de masa y la acción del reactivo lixivante, mientras que valores más elevados reducen la eficiencia del proceso. En consecuencia, se acepta la hipótesis específica H3.

4. El tiempo de cianuración influyó significativamente en la recuperación de oro, observándose un incremento progresivo de la extracción a medida que el tiempo aumentó hasta 48 horas. La optimización conjunta de las variables evaluadas permitió alcanzar una recuperación ajustada de aproximadamente 98,32 %, validando la hipótesis específica H4 y corroborando la hipótesis general de la investigación.

RECOMENDACIONES TECNICAS Y OPERATIVAS

1. Implementar en planta las condiciones óptimas identificadas en el estudio (35 % de sólidos, 1500 ppm de NaCN, 48 horas de cianuración y granulometría cercana al 90 % pasante malla -200), con el fin de maximizar la recuperación de oro y mejorar la eficiencia del proceso CIL.

2. Mantener un control riguroso de la granulometría de molienda, la dosificación de cianuro, el pH y el oxígeno disuelto, asegurando condiciones operativas estables que favorezcan la cinética de disolución del oro y reduzcan el consumo innecesario de reactivos.

3. Incorporar herramientas estadísticas de control y optimización, tales como ANOVA, diseño factorial y superficies de respuesta, para fortalecer la toma de decisiones y el seguimiento del desempeño metalúrgico.

4. Desarrollar investigaciones complementarias sobre la influencia de minerales cianicidas, catalizadores y variaciones mineralógicas del mineral, con el propósito de perfeccionar el modelo de optimización propuesto.

5. Fortalecer la capacitación del personal operativo y técnico en metalurgia del oro y control estadístico de procesos, promoviendo la mejora continua y la correcta aplicación de los parámetros optimizados.

6. Evaluar la aplicación del modelo de optimización en otras plantas auríferas con características similares, contribuyendo al incremento de la productividad, la reducción de costos operativos y el cumplimiento de estándares ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadie, M. N. (2022). *Evaluación metalúrgica de cianuración de minerales auríferos con alto contenido de cianicidas, en una unidad minera ubicada en la región de Ayacucho* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://doi.org/10.100.100.32/HANDLE/20.500.12773/16823>
- Angles, J. (2023). *Evaluación de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario para mejorar la recuperación en la cooperativa minera cecomirl L.T.D.A.* [Universidad Nacional del Altiplano. Repositorio Institucional - UNAP]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20895>
- Autoridad Regional Ambiental Arequipa. (2022). *Resolucion Subgerencial N° 013-2022*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3522576/Resolucion Subgerencial N° 013-2022.pdf.pdf?v=1660923291](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3522576/Resolucion_Subgerencial_N°_013-2022.pdf.pdf?v=1660923291)
- Chavez Carpio, Y. M. (2021). *Estudio de comparación de calidades de nitrato de plomo para mejorar la extracción de oro y plata*. <https://core.ac.uk/reader/559502300>
- Deveci, H., Yazıcı, E. Y., Celep, O., Mercimek, M., Demirel, C., Çakmak, S., Cingöz, M. B., Kavlu, Ö. H., & Kömürcü, H. (2023). Effects of lead nitrate and pre-aeration on the deportment of base/precious metals in cyanide leaching of a pyritic refractory gold concentrate. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 59(5), 166259. <https://doi.org/10.37190/PPMP/166259>
- Eniowo, O. D. (2025). When closure fails: Uncovering the environmental impact of gold rewashing on abandoned mine sites in Southwestern Nigeria. *World Development Perspectives*, 38, 100682. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2025.100682>
- Galagarza, O. A., Ramirez-Hernandez, A., Oliver, H. F., Álvarez Rodríguez, M. V., Valdez

- Ortiz, M. D. C., Pachari Vera, E., Cereceda, Y., Diaz-Valencia, Y. K., & Deering, A. J. (2021). Occurrence of chemical contaminants in peruvian produce: a food-safety perspective. *Foods*, 10(7), 1461. <https://doi.org/10.3390/foods10071461>
- Ghasemi, S., Mohammadnejad, S., & Khalesi, M. R. (2022). Role of Functional Groups in Selective Adsorption of Gold over Copper Cyano complexes by Activated Carbon: A DFT Study. *Journal of Mining and Environment*, 13(3), 891–901. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.12125.2210>
- Gorji, M., Hosseini, M. R., & Ahmadi, A. (2020). Comparison and optimization of the bio-cyanidation potentials of *B. megaterium* and *P. aeruginosa* for extracting gold from an oxidized copper-gold ore in the presence of residual glycine. *Hydrometallurgy*, 191, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105218>
- International Cyanide Management Institute. (2021a). *El código internacional para el manejo del Cianuro*.
- International Cyanide Management Institute. (2021b). *The International Cyanide Management Code Institute*.
- International Cyanide Management Institute. (2022). *Accountability and The Cyanide Code Contents*. https://cyanidecode.org/wp-content/uploads/2025/03/ICMI-2022-Report_final_secure-1.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Karppinen, A., Seisko, S., Nevatalo, L., Wilson, B. P., Yliniemi, K., & Lundström, M. (2024). Gold recovery from cyanidation residue by chloride leaching and carbon adsorption – Preliminary results from CICL process. *Hydrometallurgy*, 226, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106304>
- Kassymova, D., Sapinov, R., Kushakova, L., Kulenova, N., Shoshay, Z., & Adylkanova, M. (2025). Optimization of Copper Recovery from Cyanide Leaching Solutions Used in

- Gold–Copper Ore Processing Using Probabilistic–Deterministic Experimental Design. *Processes*, 13(1), 61. <https://doi.org/10.3390/pr13010061>
- Kim, J., Kim, R., & Han, K. N. (2024). Advances in Hydrometallurgical Gold Recovery through Cementation, Adsorption, Ion Exchange and Solvent Extraction. In *Minerals* (Vol. 14, Issue 6, p. 607). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/min14060607>
- Martínez-Peñuñuri, R., Parga-Torres, J. R., Valenzuela-García, J. L., Díaz-Galaviz, H. J., González-Zamarripa, G., & García-Alegría, A. M. (2023). Thermodynamic and Kinetic Aspects of Gold Adsorption in Micrometric Activated Carbon and the Impact of Their Loss in Adsorption, Desorption, and Reactivation Plants. *Materials*, 16(14), 4961. <https://doi.org/10.3390/ma16144961>
- Merli, G., Becci, A., & Amato, A. (2022). Recovery of precious metals from printed circuit boards by cyanogenic bacteria: Optimization of cyanide production by statistical analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107495. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107495>
- Molina Huayllani, G. H., & Vizarreta Correa, T. K. (2025). *Evaluación de variables en la extracción de oro con Gold Max por agitación de los minerales auríferos del yacimiento Chapiña-Colquemarca-Chumbivilcas-Cusco (Investigación Tecnológica 2023 - 2024)* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/10737>
- Motasim, M., Agacayak, T., & Osman, W. (2024). Ore Characterization and Quality Control Aspects of Gold Cyanidation: The CIL Plant as a Case Study in Sudan. *Acta Montanistica Slovaca*, 29(2), 427–435. <https://doi.org/10.46544/AMS.v29i2.16>
- Nurjaman, D. M., Titah, H. S., Kawigraha, A., Purwanti, I. F., & Permatasari, N. V. (2024).

- Response Surface Methodological (RSM) Approach for Optimizing Free Cyanide Destruction from Gold Cyanidation Waste in Artisanal and Small-Scale Gold Mining using Sulfur Dioxide and Air Process. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(5), 6307–6322. <https://doi.org/10.15244/pjoes/192360>
- Ordoñez, I. B., & Alarcon, E. (2024). Evaluación del proceso de cianuración de la extracción de oro a nivel de planta. In *Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3464>
- Pimentel, V. (2021). *Puesta en marcha de una planta de lixiviación de Oro, “Minera artesanal San Luis S.A.”*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3f323057-0684-4264-909d-2a6a63120d65/content>
- Sabillo, K. (2024). *Mining drove 1.4m hectares of forest loss in last 2 decades: Report*. Mongabay. https://news.mongabay.com/short-article/2024/11/mining-drove-1-4m-hectares-of-forest-loss-in-last-2-decades-report/?utm_source=chatgpt.com
- Sayiner, B. (2014). Modeling of the carbon-in-pulp (CIP) process in gold cyanide leaching plants using plant data. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(2), 841–851. <https://doi.org/10.5277/ppmp140234>
- Surimbayev, B., Bolotova, L., Akcil, A., Yessengarayev, Y., Khumarbekuly, Y., Kanaly, Y., & Akzharkenov, M. (2024). Gravity Concentration of Gold-Bearing Ores and Processing of Concentrates: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 00(00), 1–25. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2395824>
- Taipe Mayhua, H. R., & Challco Solis, I. S. (2025). *Lixiviación por agitación con reactivo sandioss para la extracción de oro de la mina Hatun K’asa sector Ccalani comunidad Guanaco distrito de Livitaca - Chumbivilcas – Cusco (Investigación tecnológica)*.

<https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/10615>

- Vargas, C., Navarro, P., Mejía, E., & Hernández, P. (2022). Aurocyanide adsorption onto granular activated carbon impregnated with SDS anionic surfactant. *Gold Bulletin*, 55(2), 137–143. <https://doi.org/10.1007/s13404-022-00314-y>
- Wadnerkar, D., Tade, M. O., Pareek, V. K., & Utikar, R. P. (2015). Modeling and optimization of Carbon in leach (CIL) circuit for gold recovery. *Minerals Engineering*, 83, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.001>
- Xia, J., Marthi, R., Twinney, J., & Ghahreman, A. (2022). A review on adsorption mechanism of gold cyanide complex onto activation carbon. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 111, pp. 35–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.04.014>

ANEXOS

TITULO: OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO CIL, PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO, EN LA EMPRESA COMERSA INGENIERIA E.I.R.L-CHALA

Tabla 14 Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO		TECNICAS E INSTRUMENTOS
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera la optimización conjunta de las variables operativas del proceso CIL influye en la maximización de la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., Chala? PROBLEMAS ESPECIFICOS PE1: ¿Cómo influye la concentración de cianuro de sodio en la recuperación de oro en el proceso CIL? PE2: ¿De qué manera la granulometría del mineral afecta la recuperación de oro en el proceso CIL? PE3: ¿Cuál es el efecto del porcentaje de sólidos en la pulpa sobre la recuperación de oro en el proceso CIL? PE4: ¿Cómo influye el tiempo de cianuración en la recuperación de oro durante el proceso CIL?	OBJETIVO GENERAL Optimizar las variables operativas del proceso con el fin de maximizar la recuperación de oro en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., Chala. OBJETIVOS ESPECÍFICOS OE1: Determinar el efecto de la concentración optima de cianuro de sodio en el proceso para la recuperación de oro en el proceso CIL aplicado en la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L. OE2: Determinar la influencia de la granulometría del mineral en la recuperación de oro. OE3: Analizar el efecto del porcentaje de sólidos en la pulpa sobre la recuperación de oro. OE4: Determinar el tiempo optimo de cianuración en la recuperación de oro.	HIPÓTESIS GENERAL La optimización conjunta de la granulometría del mineral, la concentración de cianuro de sodio, el porcentaje de sólidos y el tiempo de cianuración permite significativamente la maximización de la recuperación de oro en el proceso CIL de la empresa COMERSA Ingeniería E.I.R.L., Chala. HIPÓTESIS ESPECIFICAS H1: La concentración de cianuro de sodio permite una lixiviación optima que influye en la recuperación de oro en el proceso CIL. H2: La granulometría del mineral influye en la recuperación de oro en el proceso CIL. H3: El porcentaje de sólidos en la pulpa influye significativamente en la eficiencia del proceso CIL. H4: Un mayor tiempo de cianuración incrementa significativamente la recuperación de oro en el proceso CIL.	VARIABLE INDEPENDIENTES - Granulometría del mineral - Concentración de cianuro de sodio - Porcentaje de sólidos - Tiempo de residencia VARIABLE DEPENDIENTE Recuperación de oro.	INDICADORES % pasante malla –200 - Concentración de NaCN (ppm) % de sólidos en pulpa - Tiempo de lixiviación (h) % de oro recuperado	ESCALA/ NIVELES Concentración de cianuro: Nivel 1000 ppm Nivel 1500 ppm Granulometría: Nivel 1: 80% –200 malla Nivel 2: 90% –200 malla Tiempo de residencia: Nivel 1: 24 h Nivel 2: 48 h Recuperación de oro (VD): % Au extraído	Técnicas - Ensayos metalúrgicos de cianuración (pruebas en botella) - Diseño experimental factorial - Análisis estadístico (ANOVA, RSM) Instrumentos - Botellas de cianuración - Agitadores de rodillos - Tamices normalizados - Balanza analítica - pH-metro

ANEXO 2 INFORME SOBRE APORTES DEL TRABAJO EN LA EMPRESA

Figura 38

Informe sobre aportes del trabajo en la empresa.




COMERSA INGENIERIA E.I.R.L.
MINERA FIDAMI S.A.

Empresa: COMERSA INGENIERIA E.I.R.L. Y MINERA FIDAMI S.A.

Ubicación: Distrito de Chala, Provincia de Caravelí, región Arequipa - Santa Filomena -Sancos - Lucanas - Ayacucho

Asunto: Informe sobre los aportes del trabajo de tesis desarrollado en la empresa.

Quien suscribe, los Ingenieros responsables de la empresa COMERSA INGENIERIA E.I.R.L. y Minera Fidami S.A., dedicada a la extracción y procesamiento de minerales auríferos mediante el proceso de carbón en lixiviación (CIL), deja constancia de que los **tesistas** realizaron el desarrollo de su trabajo de investigación titulado **“OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO CIL, PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO, EN LA EMPRESA COMERSA INGENIERIA E.I.R.L. – CHALA”**, utilizando información real de la operación y ejecutando pruebas metalúrgicas con autorización y supervisión técnica de la empresa.

El trabajo desarrollado aportó de manera significativa al análisis y comprensión del comportamiento metalúrgico del proceso CIL, mediante la evaluación sistemática de variables operativas críticas como la granulometría del mineral, la concentración de cianuro de sodio, el porcentaje de sólidos en la pulpa y el tiempo de cianuración. La aplicación de un diseño experimental y de herramientas estadísticas permitió identificar, con sustento técnico, las variables de mayor incidencia en la recuperación de oro, superando el enfoque empírico tradicional empleado en muchas operaciones de este tipo.

Entre los principales aportes del estudio a la empresa, se destaca la determinación de condiciones óptimas de operación, las cuales permiten alcanzar recuperaciones de oro elevadas, mejorar la eficiencia metalúrgica del proceso y optimizar el uso de reactivos, particularmente el cianuro de sodio. Asimismo, el modelo estadístico desarrollado constituye una herramienta técnica de apoyo para la toma de decisiones operativas y para la mejora continua del proceso CIL.

Cabe resaltar que los tesistas demostraron responsabilidad, criterio técnico y respeto por los procedimientos operativos y de seguridad establecidos por la empresa, contribuyendo con información valiosa que puede ser utilizada para la estandarización de parámetros operativos y la evaluación de futuras mejoras en la planta.

Por lo expuesto, se deja constancia de que el trabajo de investigación realizado representa un aporte técnico relevante para la empresa COMERSA INGENIERIA E.I.R.L., tanto desde el punto de vista metalúrgico como operativo, y constituye una referencia útil para la optimización del proceso de extracción de oro.

Se expide el presente informe para los fines académicos y administrativos que los interesados estimen convenientes.

Chala, 20 de diciembre del 2025

Ing. Andree Martin Castillo Chávez
CIP: 217241
Ingeniero Responsable
COMERSA Ingenieria E.I.R.L.


Andree Martin Castillo Chavez
JEFE DE PLANTA
DNI 46816023

Daniel Orlando Mantilla Ataucuri
CIP: 335367
Ingeniero Responsable
Minera FIDAMI S.A.


Daniel Orlando Mantilla Ataucuri
Jefe de Planta
CIP: 335367

ANEXO 3: CERTIFICADO DE PRUEBA DE CIANURACIÓN POR AGITACIÓN

Figura 39

Certificado de Prueba de Cianuración por Agitación.




**CERTIFICADO DE PRUEBA DE
CIANURACION POR AGITACION**

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE :	HECTOR DAVID SUNI VARGAS / YOSIER QUISPE MAMANI
CODIGO EXTERNO :	PRUEBAS METALURGICAS TESIS
CODIGO INTERNO :	RA-LQF-1225-6684
LUGAR Y FECHA RECEPCION :	NUEVA JERUSALEN - 10/09/2025 - 07:00 AM
CARACTERISTICAS :	SOBRE MANILA SELLADO CON MINERAL PULVERIZADO
PESO APROX. :	1 KG
FECHA DE RESULTADOS :	12/09/2025

ANALISIS QUIMICO DE CABEZA (NEWMONT)	
CODIGO	LEY Au Qt/Tc
PRUEBAS METALURGICAS TESIS	0.491

Este reporte no podrá ser reproducido en su totalidad sin la autorización de FIDAMI S.A.



MINERA FIDAMI S.A.
 EDGAR ALEXANDER DE LA OLA SUZAMANTE
 CUI 723075
 JEFE DE LABORATORIO QUIMICO METALURGICO

Inscrita en la partida electrónica N° 15428956 de la sede Superintendencia Nacional de los Registros Públicos de Lima.
 MINERA FIDAMI S.A.
 DOMICILIO FISCAL: CAL. VAN GOGH 291 URB. SAN BORJA LIMA - LIMA - SAN BORJA - RUC: 20494415501 - E-MAIL:
 recepcion@minerafidami.com.pe; contabilidad@minerafidami.com.pe

ANEXO 4: CERTIFICADO DE PRUEBA DE CIANURACION POR AGITACION.

Figura 40

Certificado de Prueba de Cianuración.


**CERTIFICADO DE PRUEBA DE
CIANURACION POR AGITACION**


DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE :	HECTOR DAVID SUNI VARGAS / YOSFER QUISPE MAMANI
ANALISIS DE :	PRUEBA DE CIANURACION DE 24 Y 48 HORAS
CODIGO EXTERNO :	PRUEBAS METALURGICAS TESIS
CODIGO INTERNO :	RA-LQF-1225-6684
LUGAR Y FECHA RECEPCION :	NUEVA JERUSALEN - 15/09/2025 - 07:00 AM
CARACTERISTICAS :	SOBRE MANILA SELLADO CON MINERAL PULVERIZADO
PESO APROX. :	1 KG
FECHA DE RESULTADOS :	30/09/2025

ANALISIS QUIMICO DE CABEZA (NEWMONT)	
CODIGO	LEY Au Gz/Te
PRUEBAS METALURGICAS TESIS	0.491

RESULTADO DE LA PRUEBA

# PRUEBA METALURGICA	HORAS DE CN	% REC. AU	CONSUMO DE REACTIVOS		CARACTERISTICAS
			NaCN (KG/TM)	NaOH (KG/TM)	
PPMM-001	24	91.7	1.84	1	350 g - 1000 ppm 80% malla # 200
PPMM-002	24	91.3	1.62	1	450 g - 1000 ppm 80% malla # 200
PPMM-003	24	93.06	2.28	1	350 g - 1500 ppm 80% malla # 200
PPMM-004	24	93.05	2.32	1	450 g - 1500 ppm 80% malla # 200
PPMM-005	48	94.4	1.38	1	350 g - 1000 ppm 80% malla # 200
PPMM-006	48	93.38	1.67	1	450 g - 1000 ppm 80% malla # 200
PPMM-007	48	95.46	2.575	1	350 g - 1500 ppm 80% malla # 200
PPMM-008	48	94.96	2.65	1	450 g - 1500 ppm 80% malla # 200
PPMM-009	24	95.82	1.73	1	350 g - 1000 ppm 90% malla # 200
PPMM-010	24	95.71	1.26	1	450 g - 1000 ppm 90% malla # 200
PPMM-011	24	97.07	2.45	1	350 g - 1500 ppm 90% malla # 200
PPMM-012	24	96.82	2.48	1	450 g - 1500 ppm 90% malla # 200
PPMM-013	48	97.7	1.55	1	350 g - 1000 ppm 90% malla # 200
PPMM-014	48	97.32	1.4	1	450 g - 1000 ppm 90% malla # 200
PPMM-015	48	98.24	2.72	1	350 g - 1500 ppm 90% malla # 200
PPMM-016	48	98.04	2.82	1	450 g - 1500 ppm 90% malla # 200

Este reporte no podrá ser reproducido en su totalidad sin la autorización de FIDAM S.A.





MINERA FIDAM S.A.
EDRIAN ALEXANDER DE LA CRUZ BRAYAMANTE
CIP 123975
JEFE DE LABORATORIO QUIMICO METALURGICO

Inscrita en la partida electrónica N° 15419956 de la sede Superintendencia Nacional de los Registros Públicos de Lima.
MINERA FIDAM S.A.
DOMICILIO FISCAL: CAL. VAN GOGH 291 URB. SAN BORJA, LIMA - UMA - SAN BORJA - RUC 20494412501 - E-MAIL:
recepcion@minerafidam.com.pe; contabilidad@minerafidam.com.pe