



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



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.

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JUAN CARLOS ANGLES BETANCURT

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA CIANURACIÓN CON
ADICIÓN DE NITRATO DE PLOMO EN MI
NERAL DE ORO REFRACTARIO PARA ME
JO**

AUTOR

JUAN CARLOS ANGLES BETANCURT

RECUENTO DE PALABRAS

39562 Words

RECUENTO DE CARACTERES

194288 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

153 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.7MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 3, 2023 8:03 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 3, 2023 8:05 PM GMT-5

● **17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos:

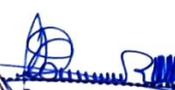
- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)


Julio ALBERTO MACQUERO
Asesor




Dra. Darssy Argélida Carpio Ramos
Directora de la Unidad de Investigación
EPIM



DEDICATORIA

A mis padres

No hay palabras suficientes para expresar mi agradecimiento por todo lo que han hecho por mí a lo largo de los años. Me han enseñado el valor del trabajo duro y el poder de la perseverancia.

Fueron mi guía, mi apoyo y mi mayor motivación.

Gracias por su amor incondicional y por estar siempre a mi lado incluso cuando las cosas se ponen difíciles, gracias por su paciencia y sabiduría y por todas las lecciones que me han enseñado a lo largo del camino en mi vida estudiantil.



AGRADECIMIENTOS

- Quiero comenzar agradeciendo a mis padres Alex Angles y Natalia Betancurt por su constante aliento y apoyo emocional a lo largo de mi vida estudiantil.
- Al ingeniero Andy Aquino a quien agradezco por ayudarme a dar mis primeros pasos en los diferentes campos laborales en el mundo minero-metalurgico.
- Al ingeniero Olger Ccari quien me abrió las puertas de una empresa importante del cual forma parte mediante el cual adquirí basta experiencia de primera mano con un staff de ingenieros muy notables
- A mi pareja Nicol Jasmin que durante momentos difíciles de mi vida me ayudo y supo comprenderme, a ti mi eterno amor y gratitud



ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|----------------------------|-----------|
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTOS | |
| ÍNDICE GENERAL | |
| ÍNDICE DE FIGURAS | |
| ÍNDICE DE TABLAS | |
| ÍNDICE DE ACRÓNIMOS | |
| RESUMEN | 17 |
| ABSTRACT..... | 18 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

| | |
|--|-----------|
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 21 |
| 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 22 |
| 1.1.1 Problema general..... | 22 |
| 1.1.2 Problema específico | 22 |
| 1.2 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN | 22 |
| 1.2.1 Hipótesis General | 22 |
| 1.2.2 Hipótesis Específicas..... | 23 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO | 23 |
| 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 24 |
| 1.4.1 Objetivo General | 24 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 25 |

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.1 | ANTECEDENTES | 26 |
| 2.1.1 | Cianuración del oro | 28 |
| 2.1.2 | Teorías de la cianuración..... | 30 |
| 2.1.3 | Resumen del proceso de cianuración | 37 |
| 2.1.4 | Termodinámica de la lixiviación del oro..... | 39 |
| 2.1.5 | Cinética química en la cianuración..... | 43 |
| 2.1.6 | Factores principales que influyen en la cianuración..... | 53 |
| 2.2 | Teorías y conceptos del efecto de la adición de $Pb(NO_3)_2$..... | 75 |
| 2.2.1 | Proceso de cianuración de Au | 75 |
| 2.2.2 | Termodinámica de las reacciones de cianuración de oro sin y con nitrato de plomo..... | 76 |
| 2.2.3 | Termodinámica de las reacciones de cianuración de plata y del sulfuro de plata sin y con nitrato de plomo | 77 |
| 2.2.4 | Efecto del $Pb(NO_3)_2$ sobre la extracción de Au Y Ag..... | 78 |
| 2.3 | EFFECTO DEL PLOMO Y LOS IONES SULFUROS SOBRE LA VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN DEL ORO EN SOLUCIONES CIANURADAS ALCALINAS | 79 |
| 2.3.1 | Control de adición de nitrato de plomo | 80 |
| 2.3.2 | Efecto de nitrato de plomo en la cianuración de una muestra de mineral oro | 83 |
| 2.4 | DISEÑO EXPERIMENTAL..... | 85 |
| 2.4.1 | Principios Básicos de un Diseño Experimental..... | 86 |
| 2.4.2 | Ventajas y desventajas del Diseño Experimental..... | 87 |
| 2.4.3 | Etapas del Diseño Experimental | 87 |
| 2.4.4 | Diseño Factorial | 88 |



| | | |
|--------|---|----|
| 2.4.5 | Diseño Factorial 2^k | 88 |
| 2.4.6 | Diseño Factorial $2k$ con réplicas en el punto central del diseño | 90 |
| 2.4.7 | Cálculo de efectos | 91 |
| 2.4.8 | Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores | 92 |
| 2.4.9 | Formulación del modelo matemático | 93 |
| 2.4.10 | Análisis de residuales | 94 |

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.1 | PRUEBAS EVALUATIVAS | 95 |
| 3.1.1 | Caracterización química | 95 |
| 3.1.2 | Características del mineral | 97 |
| 3.2 | CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO | 98 |
| 3.2.1 | Preparación de muestras para análisis | 98 |
| 3.2.2 | Determinación de metales | 99 |
| 3.2.3 | Análisis de oro por ensayo al fuego | 100 |
| 3.2.4 | Determinación de oro en solución método CHIDDY | 101 |
| 3.2.5 | Determinación del cianuro libre | 101 |
| 3.2.6 | Determinación de álcali libre (CaO) o protector | 101 |
| 3.3 | MATERIAS PRIMAS PARA LAS PRUEBAS DE CIANURACIÓN | 101 |
| 3.3.1 | Minerales de oro | 101 |
| 3.3.2 | Cianuro de sodio | 102 |
| 3.3.3 | Cal | 103 |
| 3.3.4 | Nitrato de Plomo | 103 |
| 3.3.5 | Materiales y equipos | 104 |
| 3.4 | DISEÑO DE LAS PRUEBAS METALÚRGICAS | 106 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 3.4.1 | Preparación de muestras | 106 |
| 3.4.2 | Parámetros constantes para las pruebas | 108 |
| 3.5 | PRUEBAS DE CIANURACIÓN:..... | 109 |
| 3.5.1 | Cianuración en botella..... | 110 |
| 3.5.2 | Codificación de las botellas..... | 112 |
| 3.5.3 | Condiciones de operación de las pruebas..... | 113 |
| 3.5.4 | Monitoreo de las botellas | 113 |
| 3.5.5 | Ajuste del volumen..... | 114 |
| 3.5.6 | Final de la prueba | 115 |
| 3.6 | DESCRIPCION DE LA PRUEBA | 115 |
| 3.6.1 | Procedimiento y control de botellas | 116 |
| 3.7 | RESULTADOS DE LAS PRUEBAS..... | 118 |
| 3.7.1 | Pruebas de cianuración..... | 118 |
| 3.7.2 | Observaciones | 130 |
| 3.7.3 | Resultados de las pruebas de cianuración | 131 |
| 3.7.4 | Análisis resultado de pruebas de cianuración en botella..... | 133 |
| 3.8 | DISEÑO EXPERIMENTAL | 135 |
| 3.8.1 | Introducción | 135 |
| 3.8.2 | Tipos de experimentos | 136 |
| 3.8.3 | Diseño experimental 2^k | 138 |
| 3.8.4 | Evaluación y cálculo efectos de variables experimentales..... | 142 |
| 3.8.5 | Análisis residual del modelo | 144 |
| 3.8.6 | Representación del modelo matemático..... | 146 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



| | | |
|--------------------|---|------------|
| 4.1 | RECUPERACIÓN DE ORO | 148 |
| 4.2 | ANÁLISIS ESTADÍSTICOS | 152 |
| 4.2.1 | Estimación de efectos..... | 153 |
| 4.2.2 | Análisis de varianza | 155 |
| 4.2.3 | Formulación del Modelo Matemático | 158 |
| 4.2.4 | Análisis de residuos..... | 160 |
| 4.3 | ANÁLISIS COSTO BENEFICIO CON NITRATO DE PLOMO | 163 |
| 4.3.1 | Cuadro de costos de la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario | 163 |
| 4.3.2 | Cálculo de costo de servicio..... | 164 |
| 4.3.3 | Ventas proyectadas..... | 164 |
| V. | CONCLUSIONES..... | 166 |
| VI. | RECOMENDACIONES | 167 |
| VII. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 168 |
| ANEXOS..... | | 171 |

Área:

Tema:

Fecha de sustentación:



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Diagramas Eh-pH para los sistemas Au-CN-H ₂ O y Ag- CN-H ₂ O a 25°C, concentración de todas las especies solubles = 10 ⁻⁴ M, [CN ⁻]=10 ⁻³ M, PO ₂ =1atm | 35 |
| Figura 2. Diagrama Eh-pH sistema Au-CN-H ₂ O a 25°C. | 41 |
| Figura 3. Diagrama Eh-pH sistema Au-SCN-H ₂ O a 25°C. | 42 |
| Figura 4. Interpretación de la cinética de cianuración de oro por el intermedio de las curvas de polarización. | 43 |
| Figura 5. Representación esquemática de las etapas en una reacción química heterogénea. | 45 |
| Figura 6. Disolución de oro. Celda de corrosión local en la superficie del oro en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno, <i>i_a</i> = corriente anódica, <i>i_b</i> = corriente catódica. | 48 |
| Figura 7. Velocidad de disolución del oro a diferentes presiones de oxígeno en función de la concentración de NaCN, a 24 °C. | 55 |
| Figura 8. Efecto de la concentración de cianuro. | 58 |
| Figura 9. Equilibrio entre HCN y CN ⁻ en función del pH. | 62 |
| Figura 10. Efecto de temperatura - velocidad de disolución del oro. | 67 |
| Figura 11. Contenido de Cu, Fe, Zn en solución a diferentes concentraciones de cianuro. | 72 |
| Figura 12. Disolución de oro con 0.1 % de NaCN en presencia de nitrato de plomo. | 73 |
| Figura 13. Termodinámica de las reacciones de cianuración de oro sin y con nitrato de plomo | 77 |
| Figura 14. Efecto del Nitrato de Plomo y Temperatura Sobre la Reacción de Cianuración del Sulfuro de Plata..... | 78 |
| Figura 15. Efecto de la Temperatura Sobre la Reacción de Cianuración de Oro y Plata. | 78 |



| | |
|--|-----|
| Figura 16. Niveles: Diseño Factorial 2k0Fuente | 89 |
| Figura 17. Diseño factorial para 2k con tres factores y réplicas centrales. | 91 |
| Figura 18. Diagrama de Bloques, proceso de análisis químico para Au. | 100 |
| Figura 19. Tiempo de Molienda. | 109 |
| Figura 20. Flujograma de cianuración directa experimental. | 117 |
| Figura 21. Comparación de las curvas de Cianuración en botella | 133 |
| Figura 22. Representación espacial de un diseño factorial 2 ³ | 140 |
| Figura 23. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO ₃) ₂ ; 1 g/L NaCN. | 148 |
| Figura 24. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO ₃) ₂ ; 2 g/L NaCN. | 149 |
| Figura 25. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO ₃) ₂ ; 1 g/L NaCN. | 150 |
| Figura 26. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO ₃) ₂ ; 2 g/L NaCN. | 151 |
| Figura 27. Representación Geométrica de 2 ³ (medias de los datos)..... | 152 |
| Figura 28. Grafica de Efectos principales. | 153 |
| Figura 29. Grafica de Interacción..... | 154 |
| Figura 30. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados. | 156 |
| Figura 31. Normalidad de efectos estandarizados. | 158 |
| Figura 32. Residuos vs orden observación. | 161 |
| Figura 33. Preparando la muestra de mineral..... | 185 |
| Figura 34. Realizando la colada para análisis por ensayo al fuego. | 185 |
| Figura 35. Canal por donde pasa el relave. | 186 |
| Figura 36. Riego con solución de NaCN y NaOH. | 186 |



| | |
|---|-----|
| Figura 37. Toma de muestra de carbón activado..... | 187 |
| Figura 38. Cosecha de Carbón Activado..... | 187 |
| Figura 39. Cosecha de lana de Acero. | 188 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Efecto de concentración de oxígeno en la velocidad de disolución..... | 56 |
| Tabla 2. pH en función a la concentración de cianuro..... | 58 |
| Tabla 3. Valores de las variables codificadas | 89 |
| Tabla 4. Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F0 hasta llegar al valor-p. | 92 |
| Tabla 5. Composición química del mineral. | 98 |
| Tabla 6. Condiciones de Molienda..... | 109 |
| Tabla 7. Resultados de Tiempo de Molienda..... | 109 |
| Tabla 8. Porcentaje extracción de oro y consumo de reactivos. | 131 |
| Tabla 9. Efecto de las variables sobre el porcentaje de recuperación de oro..... | 132 |
| Tabla 10. Comparación de porcentaje de Recuperación de oro, con y sin adición Nitrato de Plomo. | 133 |
| Tabla 11. Datos naturales y codificadas para las pruebas experimentales..... | 141 |
| Tabla 12. Variables en escala natural y codificada con réplicas centrales..... | 141 |
| Tabla 13. Cálculo de los efectos del diseño 2^3 para el Au. | 144 |
| Tabla 14. Resumen de los efectos estimados:..... | 144 |
| Tabla 15. Análisis residual del modelo matemático para el Au..... | 145 |
| Tabla 16. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) $Pb(NO_3)_2$; 1 g/L NaCN. | 148 |
| Tabla 17. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) $Pb(NO_3)_2$; 2 g/L NaCN. | 149 |
| Tabla 18. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) $Pb(NO_3)_2$; 1 g/L NaCN. | 150 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 19. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) $Pb(NO_3)_2$; 2 g/L NaCN. | 150 |
| Tabla 20. Resultado de variable respuesta en el diseño factorial..... | 152 |
| Tabla 21. Resultado del cálculo de efectos. | 153 |
| Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA). | 156 |
| Tabla 23. Análisis de T-Student..... | 158 |
| Tabla 24. Análisis de varianza de factores principales. | 159 |
| Tabla 25. Estimación de residuos..... | 161 |
| Tabla 26. Combinación de los niveles de los factores. | 163 |
| Tabla 27. Cuadro de costos de la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario. | 163 |
| Tabla 28. Cálculos de Costo de Servicio con Nitrato de Plomo. | 164 |
| Tabla 29. Ventas Proyectadas con la adición de nitrato de plomo..... | 165 |



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

| | | |
|----------------------------|---|--|
| % | : | Porcentaje |
| °C | : | Grados centígrados |
| µm | : | Micra |
| Bar | : | Unidad de presión |
| Cal | : | Caloría |
| cal/°K | : | Caloría por grado kelvin |
| Cal/g | : | Caloría por gramo |
| cm² | : | Centímetro cuadrado |
| cm²/seg | : | Centímetro cuadrado por segundo |
| cm³ | : | Centímetro cúbico |
| Eh | : | Potencial rédox |
| g | : | Gramo |
| g/ cm³ | : | gramo por centímetro cubico |
| g/lt | : | Gramo por litro |
| g/TM | : | Gramo por tonelada métrica |
| g/Tn | : | Gramo por tonelada |
| K cal | : | kilo caloría |
| Kg | : | Kilogramo |
| Kg/h | : | Kilogramos por hora |
| L/S | : | Relación líquido-sólido |
| m³/h | : | Metros cúbicos por hora |
| mg/cm² | : | Miligramo por centímetro cuadrado |
| mg/cm².h | : | Miligramo por centímetro cuadrado por hora |
| mg/lt | : | Miligramo por litro |
| min | : | Minuto |
| ml | : | Mililitro |
| mm | : | Milímetro |
| NP | : | Nitrato de plomo |



| | | |
|--------------|---|---------------------------|
| Oz/TM | : | Onza por tonelada métrica |
| p.p.b | : | Partes por billón |
| p.p.m | : | Partes por millón |
| pH | : | Potencial de Hidrógeno |
| t/h | : | Toneladas por hora |
| TM | : | Toneladas métricas |



RESUMEN

La investigación titulada "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.", se llevó a cabo en los laboratorios de la cooperativa minera, donde se pudo determinar la gravedad específica, el análisis granulométrico y la comparación de las pruebas de Cianuración con adición de Nitrato de Plomo. Por otro lado, las muestras se tomaron de los minerales generados por la cooperativa minera CECOMIRL L.T.D.A., que está ubicada en el Distrito de Ananea, en la provincia de San Antonio de Putina, de la región de Puno; El objetivo general de esta tesis fue evaluar la Cianuración con adición de Nitrato de Plomo minerales de oro refractario para mejorar el porcentaje de recuperación; evaluando y determinando los parámetros de operación óptimos para las variables consideradas las cuales fueron la concentración de Nitrato de Plomo, Cianuro de Sodio y el pH. La metodología utilizada fue experimental con un diseño factorial 2^3 , para lo cual se ha realizado 8 pruebas experimentales con tres réplicas en el punto central a nivel laboratorio, se evaluaron tres factores y dos niveles: la concentración de Nitrato de Plomo con un nivel mínimo de 150 g/Tn a un nivel máximo de 250 g/Tn, Cianuro de Sodio con nivel mínimo de 1 g/L a un nivel máximo de 2 g/L y pH de 10.5 a 11.5, para obtener finalmente un modelo matemático completo del proceso de Cianuración con adición de Nitrato de Plomo, los resultados obtenidos en estas pruebas mostraron que el porcentaje de recuperación de oro en solución en el proceso por diseño experimental alcanza un máximo del 97, 24 % a una concentración de Nitrato de Plomo de 250 (g/Tn), Cianuro de Sodio de 2 g/L y pH de 10.5, así mismo se determinó los parámetros óptimos y un modelo matemático que describa la recuperación de oro, a partir del efecto del uso de nitrato de plomo, como catalizador en el proceso de cianuración, sin embargo, el porcentaje de disolución se encuentra dentro del rango esperado de aproximadamente 95-98%, obteniendo mayores beneficios económicos.

Palabras Clave: Cianuración, cianuro de sodio, nitrato de plomo, recuperación de oro, refractario.



ABSTRACT

The research titled "Evaluation of cyanidation with the addition of lead nitrate in refractory gold ore to improve gold recovery in the mining cooperative CECOMIRL L.T.D.A.-Puno.", was carried out in the laboratories of the mining cooperative, where was able to determine the specific gravity, the granulometric analysis and the comparison of the Cyanidation tests with the addition of Lead Nitrate. On the other hand, the samples were taken from the tailings generated by the mining cooperative CECOMIRL L.T.D.A., which is located in the Ananea District, in the province of San Antonio de Putina, in the Puno region; The objective of this thesis was to evaluate Cyanidation with the addition of Lead Nitrate refractory gold minerals to improve the percentage of gold recovery; evaluating and determining the optimal operating parameters for the variables considered which were the concentration of Lead Nitrate, Sodium Cyanide and pH. The methodology used was experimental with a 23 factorial design, for which 8 experimental tests were carried out with three replications at the central point at the laboratory level, three factors and two levels were evaluated: the concentration of Lead Nitrate with a minimum level of 150 g/Tn to a maximum level of 250 g/Tn, Sodium Cyanide with a minimum level of 1 g/L to a maximum level of 2 g/L and pH of 10.5 to 11.5, to finally obtain a complete mathematical model of the process of Cyanidation with the addition of Lead Nitrate, the results obtained in these tests showed that the percentage of recovery of gold in solution in the process by experimental design reaches a maximum of 97.24% at a Lead Nitrate concentration of 250 (g /Tn), Sodium Cyanide of 2 g/L and pH of 10.5, likewise the optimal parameters and a mathematical model that describes the recovery of gold were determined, from the effect of the use of lead nitrate, as a catalyst in the cyanidation process, however, the dissolution percentage is within the expected range of approximately 95-98%, obtaining greater economic benefits.

Keywords: Cyanidation, gold recovery, lead nitrate, refractory, Sodium cyanide.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro ha sido una actividad de gran importancia económica y social a lo largo de la historia. Sin embargo, en la actualidad, el agotamiento de yacimientos de oro de alta ley ha llevado a la explotación de minerales de oro refractarios, que presentan dificultades en su procesamiento debido a la presencia de minerales asociados y características físico-químicas particulares.

La cianuración es el método convencional utilizado para la extracción de oro en minerales refractarios, pero su eficiencia se ve limitada debido a la baja solubilidad del oro y la presencia de minerales como la pirita, que consume cianuro y reduce la recuperación de oro. En la búsqueda de soluciones para mejorar la recuperación de oro en estos minerales, se ha investigado la adición de nitrato de plomo como agente oxidante. El objetivo de este estudio es evaluar la efectividad de la cianuración con adición de nitrato de plomo en la mejora de la recuperación de oro en minerales refractarios. Para ello, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las propiedades físicas y químicas del mineral de oro refractario, así como pruebas de laboratorio utilizando diferentes concentraciones de nitrato de plomo y condiciones de cianuración. Se espera que los resultados de este estudio proporcionen información valiosa sobre la viabilidad y eficiencia de la cianuración con adición de nitrato de plomo como método para mejorar la recuperación de oro en minerales refractarios. Esto podría tener un impacto significativo en la industria minera, permitiendo una mayor rentabilidad y sostenibilidad en la extracción de oro.

La cianuración es un proceso común para extraer oro de minerales. Sin embargo, si el oro está acompañado de minerales sulfurados, la cianuración puede ser menos



efectiva. La adición de nitrato de plomo a los lodos de cianuración puede ayudar a mejorar la extracción de oro y reducir el consumo de cianuro. Esta práctica se ha utilizado en las plantas de cianuración desde la década de 1930. Otros aditivos, como mercurio, talio y bismuto, también pueden tener efectos similares.(Chimenos et al., 1997)

Aunque se ha sugerido que el plomo precipita del oro en forma de plomo metálico (Rose & Newman, 1898), el mecanismo por el que el plomo mejora la recuperación de oro en la cianuración aún no se conoce por completo. Sin embargo, se cree que el plomo puede actuar de dos maneras:

- **Como catalizador de la disolución del oro.** El plomo metálico se une al oro, formando una superficie más activa que facilita la disolución del oro en el cianuro.
- **Como capa protectora contra la pasivación.** El hidróxido de plomo puede formar una capa protectora sobre el oro, que evita que se forme una capa de sulfuro que pasiva el oro.

Un estudio electroquímico realizado por Jeffrey y otros en 1997 encontró evidencia de ambas formas de acción del plomo. El estudio también encontró que el plomo puede formar pequeños cristales "embrionarios" en la superficie del oro. Estos cristales pueden actuar como catalizadores para la disolución del oro.

La adición de compuestos de plomo a una solución de cianuro facilita la recuperación de oro. Los compuestos como el $Pb(NO_3)_2$, el PbS y el $PbSO_3$ reaccionan con el oro para formar compuestos de oro-plomo $AuPb_2$, $AuPb_3$, que son más solubles en cianuro que el oro puro. Esto acelera la disolución del oro, lo que facilita su extracción.



1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo principal de la investigación es evaluar la efectividad de la cianuración con la adición de nitrato de plomo en el proceso de extracción de oro a partir de minerales de oro refractarios. El problema es el siguiente:

- Bajo rendimiento de oro en minerales refractarios: Los minerales de oro refractarios tienen un bajo rendimiento de oro usando métodos de cianuración convencionales. Esto se debe a la presencia de minerales acompañantes que dificultan la disolución del oro.
- Adición de nitrato de plomo como posible solución: Se sugiere la adición de nitrato de plomo durante el proceso de cianuración como una posible solución para mejorar la recuperación de oro de minerales refractarios. El nitrato de plomo puede actuar como oxidante y estabilizador de sulfuros, facilitando la disolución del oro encapsulado.
- Falta de evaluación y caracterización: A pesar de la propuesta de utilizar nitrato de plomo, no se han realizado suficientes investigaciones y evaluaciones para determinar la efectividad y viabilidad de esta técnica en la práctica. Se necesita una investigación exhaustiva para comprender mejor los efectos de la adición de nitrato de plomo en la extracción de oro y su impacto en el medio ambiente.
- Necesidad de optimización del proceso: Si se determina que la adición de nitrato de plomo es efectiva, el proceso de cianuración debe optimizarse en consecuencia para determinar las condiciones ideales para la adición de nitrato de plomo, la concentración, el tiempo de reacción y otras variables.



En resumen, el problema es la baja recuperación de oro en minerales refractarios y la falta de evaluación y caracterización de la cianuración con nitrato de plomo como posible solución. Este estudio tiene como objetivo abordar este problema mediante la evaluación integral de la efectividad y viabilidad de agregar nitrato de plomo y optimizar el proceso de cianuración para mejorar la recuperación de oro de minerales refractarios.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Problema general

¿Cómo evaluar la cianuración con adición de nitrato de plomo en minerales de oro refractarios para mejorar la recuperación en la minera Cecomirl L,t.d.a?

1.1.2 Problema específico

- ¿Como evaluar los efectos de la concentración de Nitrato de Plomo en la cianuración de mineral de oro refractario?
- ¿Como determinar la concentración de cianuro óptimo para mejorar la recuperación de Oro refractario?
- ¿Como determinar el pH más óptimo y así mejorar la recuperación de Oro en el proceso de cianuración de mineral de oro refractario?

1.2 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 Hipótesis General

Evaluando la adición de Nitrato de Plomo en el proceso de cianuración de mineral de oro refractario mejora la recuperación en la minera Cecomirl l.t.d.a.



1.2.2 Hipótesis Específicas

- Evaluando los efectos de la concentración de Nitrato de Plomo en la cianuración de mineral de oro refractario, mejora la recuperación de oro.
- Determinando la concentración de cianuro óptimo, mejora la recuperación de oro refractario.
- Determinando el pH más óptimo, incrementa la recuperación de oro refractario.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio de la evaluación de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario es de gran importancia debido a varias razones. A continuación, se presentan algunas justificaciones clave para llevar a cabo este estudio:

- Mejora de la eficiencia de la extracción de oro: El mineral de oro refractario es aquel que presenta una baja recuperación de oro mediante métodos convencionales de cianuración. La adición de nitrato de plomo en la cianuración puede mejorar significativamente la extracción de oro, lo que resulta en una mayor eficiencia del proceso de recuperación.
- Optimización de los recursos: El oro es un recurso natural valioso y limitado. La evaluación de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario permite optimizar la utilización de los recursos existentes al mejorar la recuperación del oro presente en este tipo de minerales.
- Reducción de impactos ambientales: La cianuración es un método ampliamente utilizado en la extracción de oro, pero también puede tener impactos negativos en



el medio ambiente. La adición de nitrato de plomo puede reducir la cantidad de cianuro necesario para la extracción de oro, lo que a su vez disminuye los riesgos asociados con la liberación de cianuro en el medio ambiente.

- **Aplicación en operaciones mineras existentes:** Muchas operaciones mineras ya están tratando con mineral de oro refractario y enfrentan desafíos en la extracción de oro. El estudio de la cianuración con adición de nitrato de plomo proporcionará información y conocimientos prácticos que pueden ser aplicados en estas operaciones existentes, mejorando así su eficiencia y rentabilidad.
- **Potencial de desarrollo de nuevas tecnologías:** La evaluación de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario puede abrir nuevas oportunidades para el desarrollo de tecnologías innovadoras en el campo de la extracción de oro. Estos avances podrían tener un impacto significativo en la industria minera y conducir a mejoras en los procesos de producción.
- **En resumen,** el estudio de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario es fundamental para mejorar la eficiencia de la extracción de oro, optimizar el uso de recursos, reducir impactos ambientales y fomentar el desarrollo de nuevas tecnologías en la industria minera.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la efectividad de la adición de nitrato de plomo en el proceso de cianuración para mejorar la recuperación de oro en el mineral de la cooperativa minera CECOMIRL.



1.4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los efectos de la concentración de Nitrato de Plomo en la cianuración de mineral de oro refractario.
- Determinar la concentración de cianuro óptimo para mejorar la recuperación de Oro refractario
- Determinar el pH más óptimo en el proceso de cianuración con adición de Nitrato de Plomo mineral de oro refractario.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

Se ha constatado que la presencia de nitrato de plomo ejerce un impacto sumamente beneficioso en la velocidad de extracción del oro y la cantidad total recuperada, especialmente cuando se trata del procesamiento de minerales parcialmente oxidados. La investigación sobre la inclusión del nitrato de plomo en el proceso de cianuración busca profundizar en la comprensión de su influencia tanto en la superficie del oro como en los minerales sulfurosos, como la pirita, la pirrotita y la calcopirita, con un enfoque particular en las mejoras que aporta a la cianuración (Nagy et al., 1993).

En una solución de cianuro, el nitrato de plomo, el sulfuro de plomo y el sulfito de plomo interactúan con el oro para generar compuestos químicos como AuPb_2 , AuPb_3 y plomo metálico, lo que da como resultado una aceleración sustancial en la disolución del oro. La naturaleza intrínseca de los minerales sulfurosos desempeña un papel crucial en la formación de plomo o aleaciones de plomo en la superficie del oro. A través de análisis microscópicos detallados, se ha observado que en presencia de pirita o pirrotita, no se encuentra evidencia visible de la presencia de plomo en la superficie del oro. Sin embargo, se ha detectado una delgada capa, con un espesor inferior a 50 Ångströms, en casos donde la calcopirita está presente. No obstante, se requiere de una investigación más exhaustiva para comprender a cabalidad el efecto de otros sulfuros en este proceso (Nagy et al., 1993).

Resulta interesante señalar que en ocasiones, cuando los minerales sulfurosos están presentes, el plomo no se detecta en el oro debido a la propensión del plomo a



adherirse a estos minerales, lo que genera reacciones contrapuestas. En el caso específico de la pirita, la calcopirita y la pirrotita, estas exhiben diferentes mecanismos de reacción en respuesta al nitrato de plomo. Por ejemplo, en la pirita, la adición de nitrato de plomo provoca la formación de una capa de hidróxido en sus partículas, lo cual disminuye la velocidad de reacción con el cianuro. Además, la disolución de la pirita conlleva a la formación de una capa de azufre en el oro, si bien esta capa resulta ser menos significativa cuando el plomo está presente en la mezcla.

En lo que respecta a la calcopirita y la pirrotita, el efecto del nitrato de plomo es menos notorio, dado que su inclusión tiene un impacto menor en la ralentización de la reacción de los sulfuros con el cianuro, así como en la reacción del hierro con el oxígeno. Sin embargo, cuando se examina el comportamiento del oro en contacto con calcopirita, se observa que la adición de nitrato de plomo tiene un efecto similar al observado en la pirrotita, donde se inhibe parcialmente la formación de una capa de azufre. Sin embargo, este fenómeno no se manifiesta en el oro cuando interactúa con calcopirita.

Los resultados de estas investigaciones apuntan hacia una conclusión fundamental: la estrategia de añadir nitrato de plomo al proceso de cianuración debe adaptarse meticulosamente a la composición mineralógica específica del mineral en cuestión para alcanzar resultados óptimos. La formación de una capa pasiva en las partículas de oro tiene un impacto sumamente significativo en las etapas iniciales de la lixiviación, y la inclusión de nitrato de plomo reduce considerablemente este efecto inhibitorio. El resultado de esta optimización es un aumento sustancial en la cantidad total de oro extraído y una disminución significativa en el consumo de cianuro, lo que representa un avance importante en la eficiencia y sostenibilidad del proceso de extracción de oro en minerales refractarios (Nagy et al., 1993).



2.1.1 Cianuración del oro

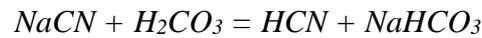
El método ampliamente adoptado para la extracción de metales preciosos involucra el proceso de lixiviación mediante cianuro en un entorno alcalino, con el cianuro sirviendo como agente lixivante. Esta técnica se ha convertido en una práctica común desde que J.S. MacArthur y los hermanos R. y W. Forrest patentaron la metodología en 1889. La cianuración es un proceso hidrometalúrgico que se basa en la utilización de soluciones alcalinas de cianuro como agentes químicos para extraer el oro y la plata presentes en minerales que contienen estos metales preciosos. Los tipos de cianuro más relevantes empleados en este proceso son el de potasio y el de sodio. Cuando una solución acuosa de cianuro alcalino se encuentra con el material a lixiviar, ocurre una hidrólisis de la siguiente manera:



La extensión de la hidrólisis en las soluciones comerciales de cianuro en agua se encuentra directamente vinculada a la cantidad de álcali libre que contenga el cianuro. Si existe una cantidad sustancial de álcali libre, es posible que la descomposición del cianuro sea poco significativa. En contraposición, cuando no se detecta álcali libre apreciable, se puede retardar la hidrólisis mediante la inclusión de cal en la mezcla. La práctica habitual de añadir cal a la combinación de cianuro y mineral tiene un doble propósito: no solo evita la pérdida de cianuro debido a la hidrólisis, sino que también neutraliza cualquier componente ácido presente en el mineral, que, de lo contrario, podría liberar ácido cianhídrico. El ácido carbónico, que es más fuerte que el ácido cianhídrico, induce la



descomposición de las soluciones de cianuro alcalino de acuerdo con la siguiente reacción química:



También es posible evitar esta reacción mediante el empleo de cal y otras sustancias alcalinas.

Para que el proceso de lixiviación tenga lugar, es fundamental que la solución de lixiviación contenga tres componentes químicos esenciales:

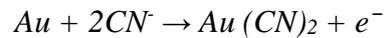
- El ion cianuro (CN^-).
- El oxígeno disuelto en la solución (O_2).
- El ion hidroxilo (OH^-).

Los dos primeros son los reactantes químicos responsables de disolver los metales preciosos, mientras que el último componente es esencial para conferir un carácter alcalino a la solución, lo que permite que el ion cianuro funcione de manera eficiente y segura, al tiempo que se optimiza la eficiencia operativa debido a varios aspectos beneficiosos:

- La lixiviación en un ambiente alcalino es más selectiva en cuanto a la eliminación de los materiales no deseados.
- Las soluciones alcalinas tienen un menor efecto corrosivo sobre los materiales utilizados en los equipos, como el acero, la madera y el hormigón, entre otros.
- Facilita la disposición de los residuos y mejora el control de la contaminación ambiental.



El oro se puede disolver en una solución de cianuro. La reacción química que ocurre es la siguiente:



El oro se disuelve en el cianuro porque el cianuro es un agente oxidante. El cianuro oxida el oro, lo que significa que le quita electrones. Cuando el oro pierde electrones, se convierte en un compuesto de oro-cianuro, que es soluble en agua. La solución de cianuro debe estar diluida para que la reacción ocurra. Si la solución de cianuro está concentrada, el oro puede precipitarse de la solución.

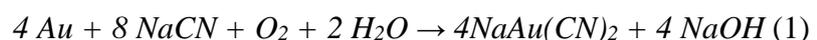
Disolución de metales preciosos. En su forma más simple, la reacción paradisolución de oro metálico en una solución diluida de cianuro es:

2.1.2 Teorías de la cianuración

La cianuración es un proceso metalúrgico que se utiliza para extraer oro y plata de los minerales. El proceso se basa en la disolución del oro y la plata en una solución de cianuro.

Existen algunas teorías principales propuestas sobre cómo ocurre la cianuración:

- a) **Teoría del Oxígeno.** En 1846 Elsner (Marsden & House, 2006) determinó que el oxígeno era vital para la disolución de oro en solución de cianuro. Tal como se presenta en la siguiente ecuación:



- b) **Teoría del Hidrógeno.** (Janin, 1892) entre 1888 y 1892 patentaron la ecuación siguiente, la cual muestra que se genera gas hidrógeno durante el proceso de cianuración del oro, y es un convencido de que el hidrógeno

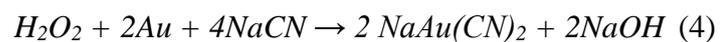


está involucrado durante el proceso de acuerdo a la reacción. (Diez Canseco, 1974)



Posteriormente Maclaurin (1893) y Christy (1896) concluyeron que la teoría de Janin es termodinámicamente imposible y ratificaron la teoría de Elsner experimentalmente.

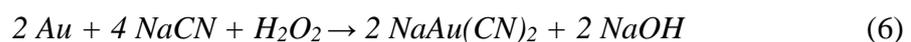
c) **Teoría del Peroxido de Hidrógeno.** (Deitz, 1952) en 1952 sugirió que la disolución del oro con cianuro procede a través de dos etapas, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:



La suma de estas dos reacciones da la ecuación de Elsner.



El peróxido de Hidrógeno se forma como producto intermedio, (Deitz, 1952) encontró experimentalmente que se formó H_2O_2 y pudo calcular que se formó un 70% de la cantidad teórica de H_2O_2 , que debería formarse de acuerdo a la ecuación. Muchos experimentos mostraron que la disolución del oro y la plata en NaCN y H_2O_2 en ausencia de oxígeno es un proceso lento, por lo tanto, entonces la segunda reacción de Bodlaender, (Deitz, 1952)

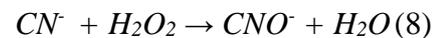


La cual es una etapa de reducción,





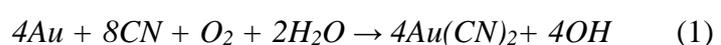
La oxidación del cianuro a cianato inhibe la disolución del oro. El cianato es un compuesto inerte que no disuelve el oro.



Barsky et al. (1934) determinaron la energía libre de formación de los iones complejos de oro-cianuro y plata-cianuro. Basándose en los datos recopilados, llevaron a cabo cálculos para determinar las alteraciones en la energía libre en diversas reacciones propuestas, identificando cuáles de ellas son potencialmente viables en las condiciones típicas de cianuración. En el caso de la energía libre del ion aurocianuro $Au(CN)_2$, obtuvieron un valor de -69.064 calorías. Con otros datos disponibles fueron calculadas las constantes de equilibrio para las ecuaciones propuestas anteriormente. (Peñate Zúñiga, 2004)

- Para la ecuación de Elsner $K = 10^{66}$
- Para la ecuación de Jannin $K = 10^{-9.9}$
- Para la ecuación de Bodlaender $K = 10^{16}$ y 10^{50}

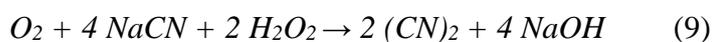
Los resultados que obtuvieron indicaron que en el contexto de la ecuación de Elsner (Marsden & House, 2006), la reacción se lleva a cabo de manera completa, es decir, se extiende hasta que prácticamente todo el cianuro se ha agotado o todo el metal ha sido disuelto por completo. Por lo tanto, se puede concluir que la ecuación de Elsner es la que verdaderamente describe la reacción de la disolución del oro en soluciones de cianuro.



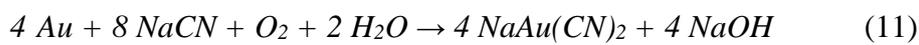
Las constantes de equilibrio en la ecuación de Jannin son tan poco favorables que la producción de hidrógeno se puede considerar prácticamente

imposible en condiciones normales. En contraste, en las ecuaciones de Bodlaender, las constantes de equilibrio son favorables, lo que indica que las reacciones propuestas son factibles y pueden tener lugar en tales condiciones.

- a) **Formación de Cianógeno.** (Pietsch et al., 1983) sugirió, también en 1896, que el oxígeno era necesario para la formación de gas cianógeno, el cual creyó que era el reactivo activo para la disolución del oro de acuerdo a estas reacciones: (Vargas Gallardo, 1981)



La suma de estas dos reacciones da la ecuación de Elsner. (Deschênes et al., 2009)

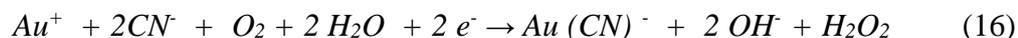
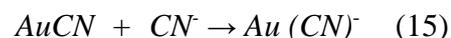
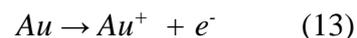
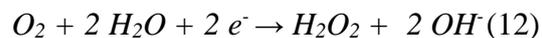


Al año siguiente *Skey y Park* (1898) concluyeron en que las soluciones acuosas de cianógeno no ejercían la más mínima acción solvente sobre el oro y la plata.

- b) **Teoría de la Corrosión.** En 1934, B. Boonstra realizó un importante avance al demostrar que el proceso de disolución del oro en una solución de cianuro guarda una notable similitud con un proceso de corrosión del metal. En esta analogía, el oxígeno presente en la solución cianurada se reduce para dar lugar a la formación de peróxido de hidrógeno e iones oxidrilos. Este descubrimiento marcó un hito en la comprensión de los mecanismos involucrados en la lixiviación de oro y enfatizó la necesidad de desglosar la ecuación de Bodlaender (como mencionado por Deitz en 1952) en una serie de etapas claramente definidas.

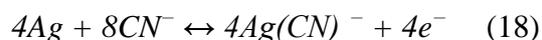
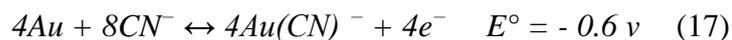


Esta teoría de la corrosión en la lixiviación de oro proporcionó un marco conceptual sólido para entender cómo se lleva a cabo la disolución del metal precioso en soluciones de cianuro. Se reconocía que el oxígeno actuaba como agente oxidante en este proceso, y su reducción a peróxido de hidrógeno y iones oxidrilos era esencial para la liberación del oro contenido en el mineral. Como resultado de esta comprensión, se pudo abordar de manera más precisa y eficiente la optimización de las condiciones de lixiviación y se destacó la importancia de descomponer la ecuación de Bodlaender en diversas etapas, lo que permitió un control más efectivo del proceso y una mayor eficiencia en la recuperación de oro.



- **REACCIONES ANÓDICAS:**

Las reacciones anódicas involucran la oxidación del oro y la plata (⁰) a oro y plata (^I) a través de dos etapas: la reacción del metal con un ion de cianuro para formar un film superficial AuCN en el caso del oro y AgCN en el caso de la plata, luego la formación del complejo de cianuro de oro (I) y plata (I) Au(CN)₂⁻ y Ag(CN)₂⁻



- **REACCIONES CATÓDICAS:**

Las reacciones 19 y 20 están acompañadas por la reducción catódica del oxígeno en la superficie del metal (Rojas Reyes, 2003).



Los diagramas pH–potencial para los sistemas Au-CN-H₂O y Ag-CN-H₂O se muestran en la Figura 2.1 (Xue & Osseo-Asare, 1985).

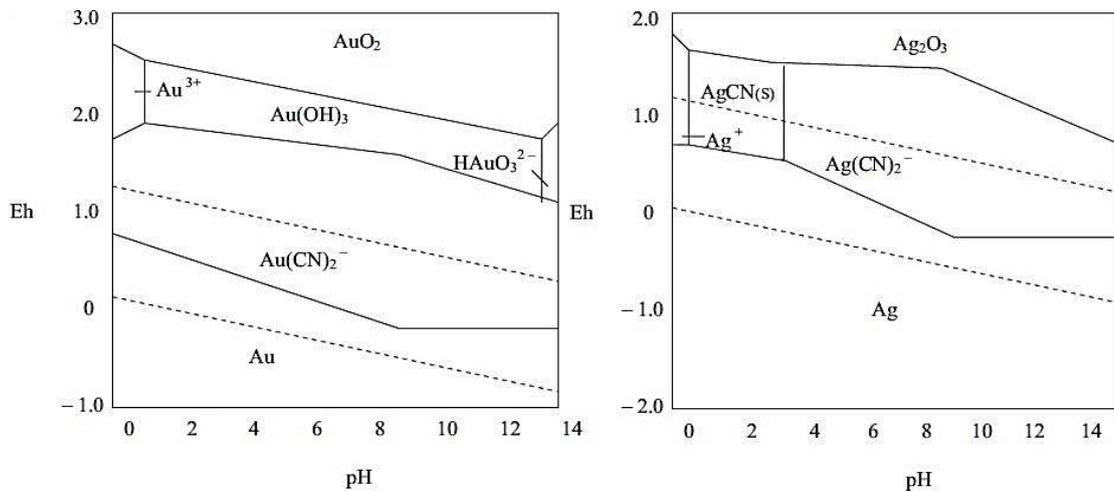


Figura 1. Diagramas Eh–pH para los sistemas Au-CN-H₂O y Ag-CN-H₂O a 25°C, concentración de todas las especies solubles = 10⁻⁴M, [CN⁻]=10⁻³M, P_{O₂}=1atm

Fuente: (Xue & Osseo-Asare, 1985)

A partir de los diagramas de estabilidad acuosa presentados en el estudio de (Rojas Reyes, 2003), se pueden destacar las siguientes observaciones:

- El oro y la plata exhiben un comportamiento notablemente similar en soluciones cianuradas.
- Los principales complejos iónicos involucrados son el Au(CN)₂⁻ y Ag(CN)₂⁻, que muestran un amplio rango de estabilidad en la solución.



- La formación de AgCN sólido solo se produce en condiciones de pH bajos, generalmente por debajo de 3.5.
- La fuerza motriz electroquímica que impulsa la disolución de ambos metales alcanza su máxima eficiencia cuando el pH se encuentra por encima de 9.4.

Estos hallazgos ofrecen información crucial sobre el comportamiento de oro y plata en presencia de cianuro, lo que puede ser de gran utilidad en la optimización de procesos de extracción y lixiviación de metales preciosos.

A partir de los diagramas de estabilidad en soluciones acuosas, se pueden observar las siguientes conclusiones (Rojas Reyes, 2003):

- El comportamiento del oro y la plata en soluciones con cianuro es similar.
- Los principales complejos iónicos son el $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y el $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, y estos tienen un rango extenso de estabilidad.
- La formación del sólido AgCN solo ocurre en condiciones de pH bajos (< 3.5).
- La fuerza motriz electroquímica para la disolución de ambos metales se maximiza cuando el pH supera los 9.4.

a) **Postulado de Habashi.** En 1966-1967 (Habashi, 1967) apoya a la primera ecuación de Bodlaender, considera que el proceso de disolución del oro es de naturaleza electroquímica:





2.1.3 Resumen del proceso de cianuración

La cianuración es un proceso hidrometalúrgico utilizado para extraer metales preciosos, como el oro y la plata, de sus minerales. Este proceso se basa en la formación de un complejo cianuro-metal, que es soluble en agua. El complejo se puede recuperar por precipitación, electrodeposición o extracción con solvente.

El proceso de cianuración se divide en las siguientes etapas:

- 1) Preparación del mineral: El mineral se tritura y se muele para aumentar la superficie de contacto entre el mineral y el cianuro. Esto facilita la disolución del oro y la plata.
- 2) Lixiviación: El mineral molido se mezcla con una solución de cianuro. El oro y la plata se disuelven en forma de complejos cianuro-metal. Los complejos cianuro-metal son estables en un rango de pH de 10 a 12.
- 3) Separación del complejo cianuro-metal: El complejo cianuro-metal se separa del mineral residual por filtración, flotación o separación magnética.
- 4) Recuperación del metal: El complejo cianuro-metal se recupera por precipitación, electrodeposición o extracción con solvente.

- Factores que afectan la cianuración

La eficiencia de la cianuración se ve afectada por una serie de factores, entre los que se incluyen:



- El tipo de mineral: Los minerales de oro que contienen sulfuro son más fáciles de cianurar que los minerales de oro que no contienen sulfuro. El oro en forma de sulfuro es más soluble en la solución de cianuro que el oro en forma metálica.
- La concentración de cianuro: Una concentración de cianuro más alta aumenta la eficiencia de la cianuración. Esto se debe a que hay más cianuro disponible para reaccionar con el oro y la plata.
- La temperatura: Una temperatura más alta aumenta la eficiencia de la cianuración. Esto se debe a que la reacción de cianuración es más rápida a temperaturas más altas.
- El pH: Un pH más bajo aumenta la eficiencia de la cianuración. Esto se debe a que el cianuro es más reactivo a pH más bajos.
- La presencia de oxígeno: La presencia de oxígeno puede aumentar la eficiencia de la cianuración. El oxígeno ayuda a oxidar el sulfuro en el mineral, lo que libera el oro y la plata.

- **Alternativas a la cianuración**

La cianuración es el proceso más utilizado para la extracción de metales preciosos. Sin embargo, existen alternativas a la cianuración, como la biolixiviación y la electrolisis.

La biolixiviación es un proceso que utiliza bacterias para oxidar el mineral y liberar el oro y la plata. Las bacterias oxidan el sulfuro en el mineral, lo que libera el oro y la plata.



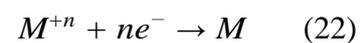
La electrolisis es un proceso que utiliza electricidad para separar el oro y la plata de la solución. El oro y la plata se depositan en los electrodos.

La cianuración es un proceso eficiente y rentable para la extracción de metales preciosos. Sin embargo, el cianuro es un compuesto tóxico que debe manejarse con cuidado.

2.1.4 Termodinámica de la lixiviación del oro

Para lograr la extracción de oro mediante lixiviación, se requiere que el oro experimente una oxidación para convertirse en una forma soluble y que estas formas solubles sean capaces de mantener su estabilidad en el entorno químico de la lixiviación.

En términos generales, cuando se trata de un metal M en contacto con una solución que contiene sus iones en estado M^{+n} , la reacción se presenta de la siguiente manera:



Y el potencial de reducción es dado por la ecuación de Nernst

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M]}{[M^{+n}]} \quad (23)$$

Dónde:

- R = Es la constante de los gases = 8,314 joules/(°K.mol)
- T = Es la temperatura absoluta
- E^0 = Es el potencial estándar de reducción en la escala H.
- F = Constante de Faraday



Entonces se puede afirmar que la cinética de cianuración del oro es de naturaleza electroquímica.

Es entonces que (Pietsch et al., 1983) midió estos potenciales de varios metales en soluciones de cianuro como se tiene:

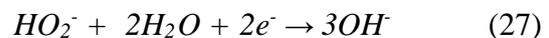
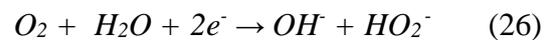
Anódica:



Catódica:



En la última ecuación se tiene la reducción directa del oxígeno. Pero la reducción también puede ocurrir en dos etapas que son:



Pero se tiene que tener en cuenta que el peróxido al descomponerse forma una interfase de acuerdo a:



2.1.4.1 Consideraciones termodinámicas

La cianuración de oro y plata es un proceso que se rige por los principios de la termodinámica, y esto se representa de manera concisa en los diagramas Eh-pH (potencial-redox y potencial de hidrógeno).

La Figura 2 ilustra la viabilidad de la cianuración de oro y plata en rangos de pH superiores a 9.21, con una concentración molar de:

Au 10^{-4} molar y $CN^{-2}=10^{-1}$ molar (Chambi Viraca, 2010).

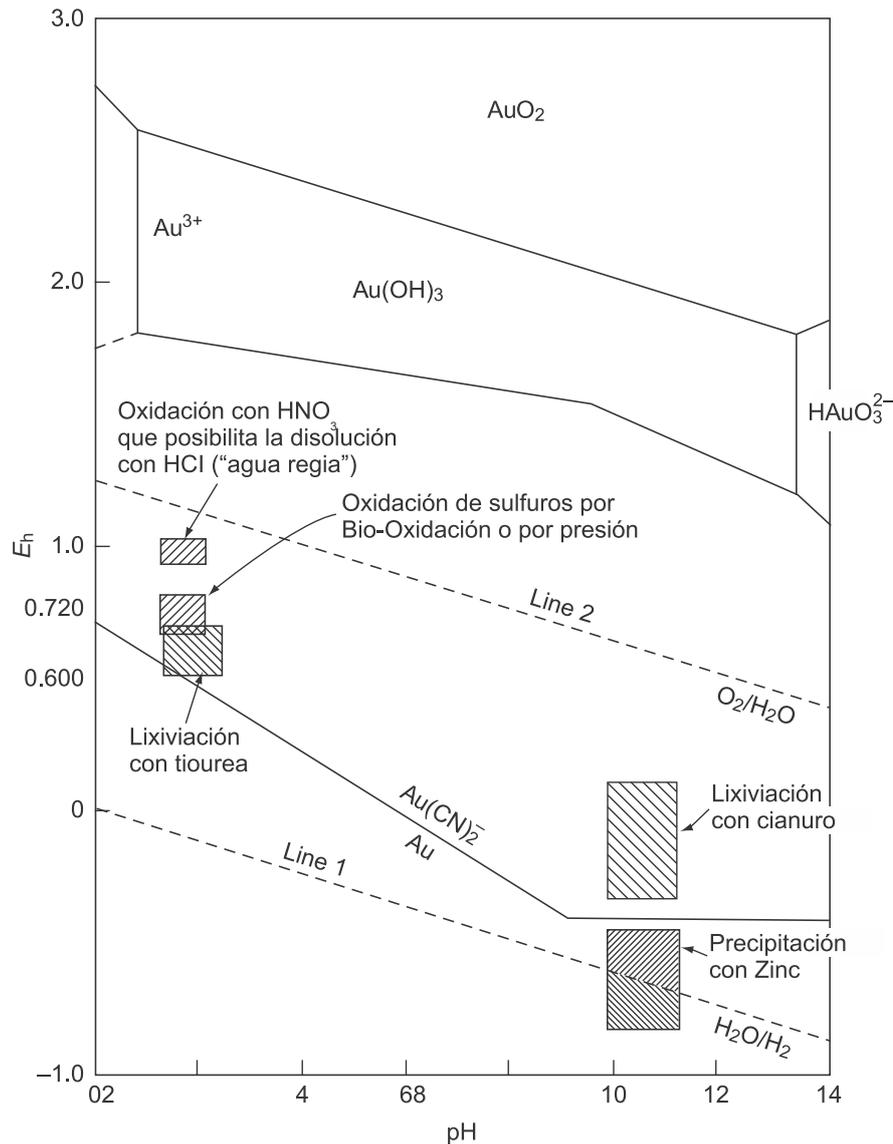
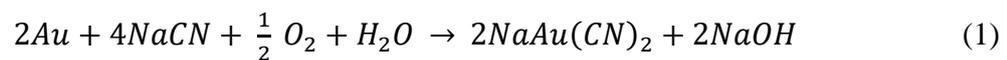


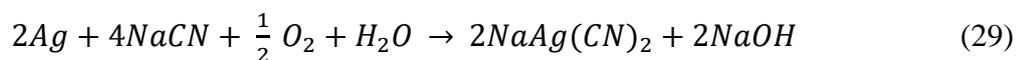
Figura 2. Diagrama Eh-pH sistema Au-CN-H₂O a 25°C.

Fuente: (Habashi, 1967)

Las siguientes reacciones demuestran la posibilidad de lixiviar oro y plata por cianuración (Habashi, 1967)



$$\Delta G_{T=25^\circ C}^0 = -36640 \frac{cal}{mol} \quad (2)$$



$$\Delta G_{T=25^\circ C}^0 = -26919 \frac{cal}{mol} \quad (30)$$

Por otra parte, la posibilidad de recuperar los metales preciosos por cianuración se complica cuando el mineral presenta compuestos de azufre.

La Figura 3 muestra que es improbable llevar a cabo la cianuración del oro en presencia de azufre a menos que se pueda separar el azufre, ya sea mediante la introducción de sales de plomo u otro agente oxidante, o reduciendo el pH a niveles inferiores a 8. No obstante, en estos valores de pH más bajos, la concentración de ácido cianhídrico (HCN) aumenta de acuerdo con la expresión siguiente:

$$[HCN] = [CN^-] \times 10^{K_a - pH} \quad (31)$$

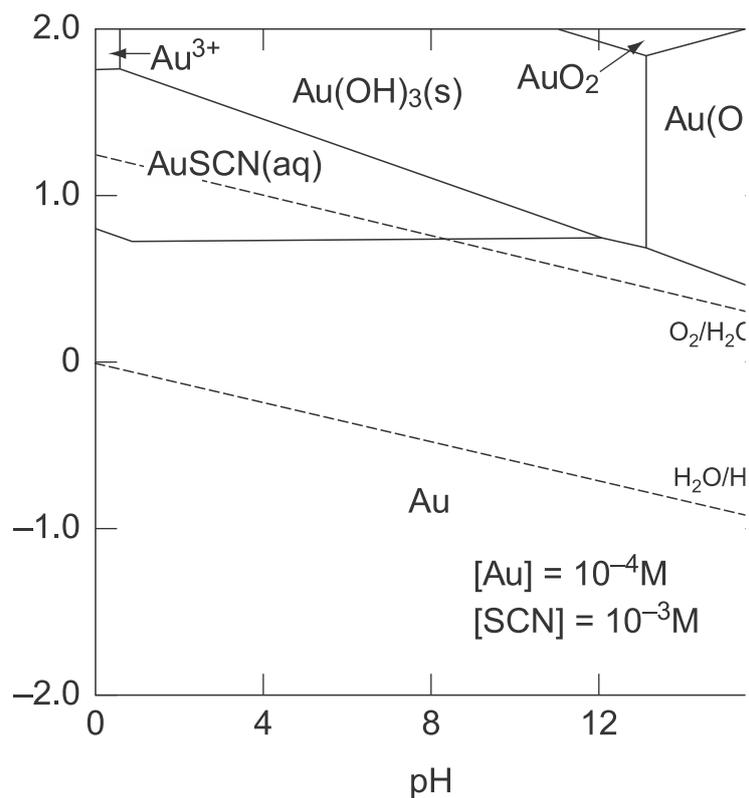
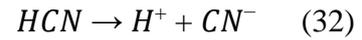


Figura 3. Diagrama Eh-pH sistema Au-SCN-H₂O a 25°C.

Fuente: (Marsden & House, 2006)

Donde pK_a = 10.921 es la constante de equilibrio de la reacción:



2.1.5 Cinética química en la cianuración

Los aspectos relacionados con la cinética de disolución del oro en una solución de cianuro se pueden analizar utilizando las curvas de polarización de los sistemas electroquímicos que participan, como se ilustra en la Figura 5.

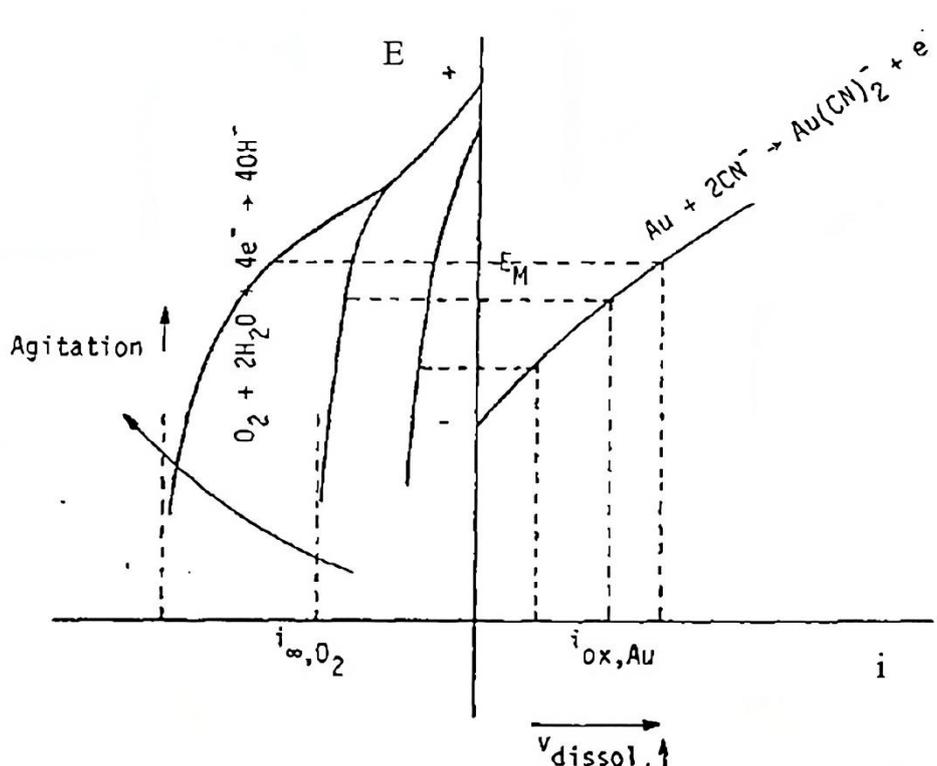


Figura 4. Interpretación de la cinética de cianuración de oro por el intermedio de las curvas de polarización.

Fuente: (Cáceres, 1993)

Por lo tanto, cuando la concentración de cianuro es suficiente (10-2 M), la velocidad de disolución del oro está regulada por la difusión del oxígeno disuelto hacia las partículas de oro. En este sentido, todas las condiciones que pueden **acelerar o catalizar** la reacción de reducción del oxígeno disuelto en el oro, como la agitación, la temperatura, el pH, entre otros, resultan muy beneficiosas para la



disolución del oro presente en el mineral. Una reacción físico-química que involucra una fase sólida y una fase líquida se puede dividir en cinco etapas:

- 1) Difusión de los reactivos desde la solución hacia la interfaz sólido-líquido.
- 2) Transporte de las especies reactivas a través de la capa límite entre la solución y el sólido.
- 3) Reacción química en la superficie del sólido.
- 4) Transporte de las especies que reaccionan a través de la capa límite en el lecho de la solución.
- 5) La cinética de reacción es un factor crucial en el diseño de un proceso hidrometalúrgico. Una cinética rápida se traduce en una mayor eficiencia del proceso.

La cinética de reacción es un factor crucial en el diseño de procesos hidrometalúrgicos. Una cinética rápida se traduce en una mayor eficiencia del proceso. Las reacciones heterogéneas pueden estar controladas por la cinética de la reacción química o por la velocidad de transporte de masa de las especies reactivas. En el caso de la cianuración, la cinética de reacción puede estar controlada por la difusión del oxígeno disuelto hacia las partículas de oro. Esto significa que, para aumentar la velocidad de disolución del oro, es necesario aumentar la concentración de oxígeno disuelto en la solución (Marsden & House, 2006).

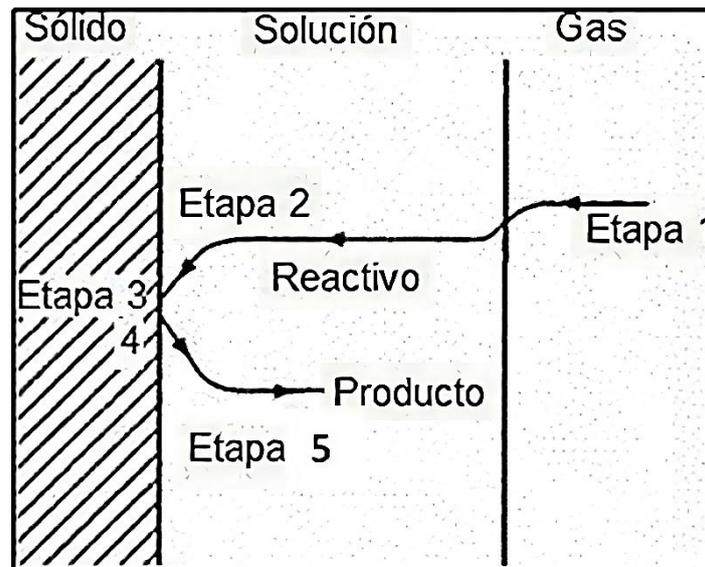


Figura 5. Representación esquemática de las etapas en una reacción química heterogénea.

Fuente: (Marsden & House, 2006)

Las reacciones heterogéneas involucran el transporte de masa a través de una capa límite, que puede ser a menudo la etapa determinante en la reacción química y si esta etapa particular de la reacción puede ser acelerada entonces la velocidad total de la reacción se incrementa (Marsden & House, 2006).

La etapa de reacción química es raramente determinante en la mayoría de procesos de extracción de oro, por lo tanto, el transporte de masa es a menudo la etapa que limita la reacción (Marsden & House, 2006).

La solubilidad del oxígeno en soluciones acuosas se encuentra extremadamente limitada, aproximadamente en 0.26×10^{-3} moles/l, lo que equivale a unos 8.32 mg de O_2 /litro. Dentro del contexto de la cantidad de cianuro libre utilizada, que generalmente varía entre 1 y 2 gramos por litro, esto implica que, en la práctica, la velocidad de disolución está predominantemente influenciada por la concentración de oxígeno y su capacidad de difusión hacia la



superficie de reacción. Aumentar la concentración de cianuro libre no tiene un efecto acelerador significativo en la velocidad de la reacción. En términos generales, la cinética de la lixiviación con cianuro en el caso del oro y la plata es lenta, en gran parte debido a la baja solubilidad del oxígeno, un factor crítico en las reacciones químicas involucradas.

Las reacciones químicas que intervienen en el proceso de extracción de oro mediante métodos hidrometalúrgicos son reacciones heterogéneas que comprenden el transporte de metales y minerales entre la fase sólida y la fase líquida. La etapa 3, tal como se ilustra en la Figura 5, puede incluir reacciones de dos tipos, según lo mencionado por (Marsden & House, 2006):

Existen dos tipos de reacciones que ocurren en la etapa 3 de este proceso:

- 1) Reacciones que implican únicamente una transformación química, como la disolución de un óxido en ácido.
- 2) Reacciones que son de naturaleza electroquímica, lo que significa que implican una oxidación o reducción con transferencia de electrones.

La etapa 3 se divide en las siguientes subetapas, según (Marsden & House, 2006):

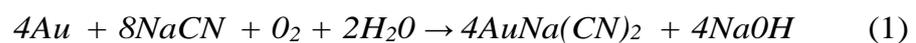
- Hidroxilación-hidratación de la superficie en sitios activos.
- Reacciones de especies superficiales, como la protonación.
- Adsorción de especies reactivas en la superficie del sólido.
- Desorción de productos desde la superficie del sólido.
- Reacciones de los productos en la solución.



El proceso de disolución del oro y la plata en soluciones de cianuro implica reacciones heterogéneas que tienen lugar en la interfaz entre el sólido y el líquido. Estudios previos han demostrado que la velocidad de disolución del oro y la plata está controlada por la difusión, es decir, la transferencia de masa, del oxígeno disuelto y los iones cianuro a través de la capa límite en la interfaz sólido-líquido, como se muestra en la Figura 6.

2.1.5.1 Mecanismo de la cianuración

La reacción global de disolución del oro mediante una solución acuosa de cianuro en presencia de oxígeno fue propuesta por Elsner en 1846 y se expresa de la siguiente manera:



Esta reacción es heterogénea y comprende tres fases distintas:

- Fase sólida: Oro metálico.
- Fase líquida: Agua y sales de cianuro disueltas.
- Fase gaseosa: Oxígeno.

La secuencia de etapas que describe la conversión de los reactantes en productos durante el proceso de cianuración se detalla a continuación:

Comienza con la absorción de oxígeno en la solución, seguida del transporte de cianuro disuelto y oxígeno hacia la interfaz sólido-líquido. Luego, se lleva a cabo el transporte de los reactantes hacia el interior del sólido a través de poros o canales, seguido por la adsorción de cianuro y oxígeno en la superficie del sólido. La reacción electroquímica



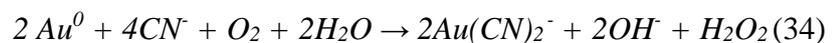
- 4) Se produce una reacción de disolución de carácter electroquímico.
- 5) Desorción de los complejos solubles de oro-cianuro, plata-cianuro y otros productos de reacción desde la fase sólida.
- 6) Transporte de los productos desorbidos desde la zona de reacción hacia la solución.

Estos pasos fundamentales delimitan el proceso general mediante el cual el oro se libera y disuelve en la solución de cianuro, lo que constituye un componente esencial en la recuperación de este valioso metal.

Entonces se tiene de acuerdo a Elsner (Marsden & House, 2006) que propone que el oxígeno es necesario para la disolución del oro de acuerdo a la reacción:



Y Bodlaender mostró que el oxígeno reacciona con la formación de peróxido de hidrógeno como producto intermedio con las reacciones de la disolución del oro:



Si la cinética de reducción y descomposición es baja, el peróxido puede propagarse lejos de la superficie y no ser sensible a la reacción.

El uso eficaz del oxígeno para la disolución del metal depende de la naturaleza del proceso de reducción y del destino del peróxido intermedio que puede formarse.



La velocidad de lixiviación del metal, cuando tanto el reactivo oxidante como el reactivo reductor están presentes, ha sido observada para explicar una característica cinética singular, que transita de un régimen cinético a otro.

En un régimen, la cinética está directamente relacionada con la concentración del oxidante e independiente de la concentración del reactivo reductor, mientras que en otro régimen es lo contrario a lo anterior. Por lo tanto, la cinética de la reacción se determina por la rapidez con que estas etapas pueden tener lugar, y una expresión simplificada de esta velocidad puede ser:

$$r = \frac{dn_{Au}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dn_{CN}}{dt} = Z \frac{dn_{O_2}}{dt} \quad (36)$$

Donde “z” es el factor estequiométrico y tendrá un valor de 4 según la ecuación de Elsner (Barsky et al., 1934) indicando que se utiliza todo el oxígeno (100%) para la reacción del oro; y tendrá un valor de 2 si se toma la ecuación de Bodlaender asumiendo nada del peróxido formado continuo, para seguir reaccionando.

Aplicando la primera ley de Fick a la ecuación anterior se tiene:

$$R_{CN} = \frac{dn_{cn}}{dt} = - \frac{D_{cn}}{\delta} [(CN^-) - (CN^-)_z] \quad (37)$$

$$R_{O_2} = \frac{dn_{O_2}}{dt} = - \frac{D_{O_2}}{\delta} [(O_2) - (O_2)_z] \quad (38)$$

D_{CN} = Difusividad del ión cianuro.

D_{O_2} = Difusividad del Oxígeno.

(CN^-) = Concentración de cianuro en la solución.

(O_2) = Concentración de Oxígeno en la solución.



$(\text{CN}^-)_z$ = Concentración de cianuro en la superficie de la partícula de oro.

$(\text{O}_2)_z$ = Concentración de oxígeno en la superficie de la partícula de oro.

δ = Espesor de la capa límite de difusión (Capa de Nernst)

Algunos investigadores asumen que las concentraciones en la superficie de la partícula de oro son despreciables en el punto de cambio entre los dos regímenes cinéticos, de modo que:

$$r = \frac{1}{2} r_{d,\text{CN}} = -\frac{D_{\text{CN}}}{2\delta} (\text{CN}^-) = z r_{\text{O}_2} = -\frac{z D_{\text{O}_2}}{\delta} (\text{O}_2) \quad (39)$$

$$\frac{D_{\text{CN}} (\text{CN}^-)}{D_{\text{O}_2} (\text{O}_2)} = 2z \quad (40)$$

Habashi (1967) considera que el proceso de disolución del oro es electroquímico y con áreas catódicas y aniónicas separadas A_c y A_a , respectivamente, donde el área total de la partícula de oro es A (área superficial de la partícula en cm^2), entonces se tiene: $A_c + A_a = A$

Se asume que la velocidad de transporte de la solución es la que controla el proceso, y la liberación de peróxido es una contribución ineficiente a la disolución anódica del oro ($z=2$). También se supone que las reacciones en la superficie ocurren de manera muy rápida, lo que se refleja en las siguientes condiciones:

$$(\text{CN}^-)_z < (\text{CN}^-) \quad \text{y} \quad (\text{O}_2)_z < (\text{O}_2)$$

Dadas estas condiciones, la velocidad reducida se expresa de la siguiente manera:

$$r = -\frac{A_a D_{\text{CN}}}{A 2\delta} (\text{CN}^-) = -\frac{A_c 2 D_{\text{O}_2}}{A \delta} (\text{O}_2) \quad (41)$$



$$\frac{(CN^-)}{O_2} = 4 \frac{(D_{O_2})}{D_{CN}} \left[\frac{A_c}{A_a} \right] \quad (42)$$

Estas relaciones suponen que la proporción restante de A_c/A_a es directamente proporcional a la relación de las concentraciones de $(CN^-)/(O_2)$. A partir de las ecuaciones, se obtiene la ecuación que ya se ha mencionado, que en este contexto es:

$$r = -\frac{2D_{CN}D_{O_2}(CN^-)(O_2)}{\delta[D_{CN}(CN^-)+4D_{O_2}(O_2)]} \quad (43)$$

Donde se tienen:

$$D_{O_2} = 2.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}, \quad \text{y} \quad D_{CN^-} = 1.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{seg.} \rightarrow D_{O_2}/D_{CN^-} = 1.5$$

Con los cuales (Habashi, 1967) concluye que para la velocidad límite en el punto de cambio y asumiendo $Z = 2$, la razón de las concentraciones de los reactantes está dado por:

$$\frac{(CN^-)_z}{(O_2)_z} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN}} = 6 \rightarrow \frac{(CN^-)_z}{(O_2)_z} = 4(1.5) = 6 \quad (44)$$

En la práctica, la relación entre estas dos concentraciones es de gran relevancia. Si se utiliza un exceso de soluciones concentradas de cianuro en comparación con la cantidad de oxígeno disuelto, se desperdicia este último. Por otro lado, si se logra saturar de oxígeno una solución con bajo contenido de cianuro libre, la velocidad de cianuración será lenta.

Para alcanzar la máxima velocidad de cianuración y, por ende, la máxima productividad, es esencial mantener un control preciso de las concentraciones de cianuro y oxígeno disuelto en un rango molar óptimo, que debería ser aproximadamente igual a 6. En este sentido, los analizadores de cianuro integrados en el circuito son herramientas muy útiles para monitorear y mantener



la concentración óptima de cianuro, especialmente en lugares donde se puede proporcionar una intensa aireación para asegurar la máxima disolución de oxígeno según las condiciones específicas del sitio.

2.1.6 Factores principales que influyen en la cianuración

- 1) Efecto del oxígeno
- 2) La concentración de cianuro.
- 3) El pH o alcalinidad.
- 4) Tiempo de Cianuración.
- 5) Temperatura.
- 6) Tamaño de partícula.
- 7) Aireación.
- 8) Cianicidas o descomposición del cianuro.

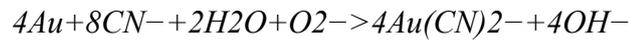
2.1.6.1 Efecto del oxígeno

El oxígeno desempeña un papel esencial en la cianuración, ya que actúa como agente oxidante principal en la disolución del oro y la plata en soluciones de cianuro. Su efecto en la cianuración se puede detallar de la siguiente manera:

- 1) **Oxidación de los metales:** En la cianuración, el oxígeno se reduce en la superficie del oro o la plata sólida, formando iones oxidrilos (OH^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Estos iones oxidan los metales nobles como el oro y la plata en su estado metálico a sus



respectivas formas iónicas, como $Au(CN)_2^-$ y $Ag(CN)_2^-$, que son solubles en soluciones de cianuro. Esta reacción química es fundamental para la disolución de los metales preciosos y es conocida como la reacción de disolución del oro:



- 2) **Velocidad de disolución:** La velocidad de disolución del oro y la plata en soluciones de cianuro está directamente relacionada con la concentración de oxígeno disuelto en la solución. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, más rápida será la disolución de los metales preciosos. Por lo tanto, mantener niveles adecuados de oxígeno es esencial para una cianuración eficiente.
- 3) **Aireación y agitación:** La aireación y la agitación son técnicas comunes para asegurar una adecuada incorporación de oxígeno en la solución de cianuro. La agitación mecánica o la inyección de aire en el sistema facilitan la difusión del oxígeno hacia la superficie de reacción del mineral, mejorando así la velocidad de disolución.
- 4) **Temperatura:** La temperatura también afecta la solubilidad del oxígeno en la solución de cianuro. A temperaturas más altas, el oxígeno se disuelve más fácilmente, lo que puede acelerar la cinética de la cianuración. Sin embargo, temperaturas extremadamente altas pueden aumentar la volatilidad del cianuro y requerir precauciones adicionales.
- 5) **Limitaciones de oxígeno:** En algunas situaciones, como en minerales profundos o densos, la disponibilidad de oxígeno puede

ser limitada. Esto puede ralentizar la velocidad de disolución y requerir estrategias específicas, como la inyección de oxígeno o la aireación forzada, para garantizar suficiente oxígeno en la solución.

En resumen, el oxígeno desempeña un papel crucial en la cianuración al actuar como agente oxidante en la disolución del oro y la plata. La concentración de oxígeno, la aireación y la agitación son factores clave para garantizar una cianuración eficiente y una recuperación óptima de los metales preciosos. El control adecuado de estos parámetros es esencial para el éxito del proceso de cianuración.

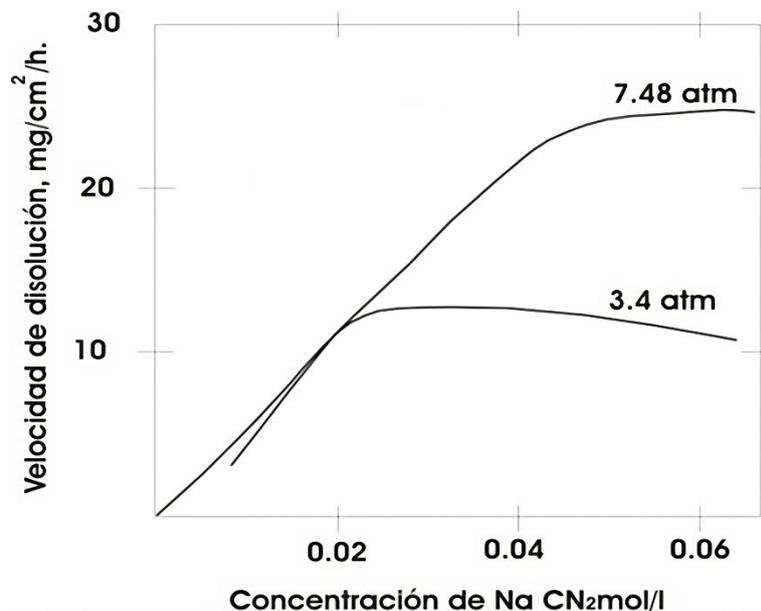


Figura 7. Velocidad de disolución del oro a diferentes presiones de oxígeno en función de la concentración de NaCN, a 24 °C.

Fuente: (Arce et al., 2005).

A concentraciones bajas de cianuro, la velocidad de disolución del oro no se ve afectada por la presión de oxígeno. Sin embargo, en concentraciones elevadas de cianuro, donde la velocidad de disolución no



se ve influenciada por la concentración del solvente, la velocidad de reacción está directamente relacionada con la presión de oxígeno. En otras palabras, a medida que aumenta la concentración de oxígeno, aumenta la velocidad de disolución. No obstante, cuando tanto la concentración de oxígeno como la agitación superan ciertos umbrales, el oro puede volverse pasivo, lo que resulta en una velocidad de disolución constante pero más baja (Peñate Zúñiga, 2004).

La transferencia de masa de oxígeno disminuye a medida que la densidad de la pulpa aumenta y el tamaño de las partículas se reduce. El uso de oxígeno o de un agente oxidante se vuelve esencial para lograr la disolución del oro en condiciones normales de cianuración. En el pasado, se han empleado agentes oxidantes como el permanganato de potasio, el peróxido de sodio, el bromo y el cloro con cierto grado de éxito. No obstante, debido a los costos asociados y las complicaciones relacionadas con su uso, estos agentes ya no se utilizan. (Barsky et al., 1934) llevaron a cabo experimentos para determinar la velocidad de disolución del oro en soluciones de NaCN al 0.10% utilizando tanto nitrógeno como oxígeno, además de mezclas de ambos gases.

Tabla 1.

Efecto de concentración de oxígeno en la velocidad de disolución.

| % Oxígeno | Velocidad de disolución (mg/cm².h) |
|------------------|--|
| 0.0 | 0.04 |
| 9.6 | 1.03 |
| 20.9 | 2.36 |
| 60.1 | 7.62 |
| 99.5 | 12.62 |

Fuente: (Vargas Gallardo, 1981)



2.1.6.2 Efecto de la concentración de cianuro

La velocidad de disolución del oro aumenta de manera significativa en una relación casi lineal a medida que la concentración de cianuro aumenta. Este aumento continúa hasta alcanzar un valor máximo. Sin embargo, más allá de este punto, un aumento adicional en la concentración de cianuro no resulta en una significativa mayor cantidad de oro disuelto. En cambio, puede tener un efecto ligeramente inhibitorio y aumentar el consumo de cianuro. La disminución en la concentración de cianuro ocurre debido a una reducción en el pH de la solución, lo que provoca que los iones de cianuro experimenten hidrólisis, como se describe en la reacción propuesta por (Barsky et al., 1934), según la reacción:



El agua de la solución con este gas (HCN) y oxígeno atacan al oro formando en AuCN que es insoluble, y peróxido de hidrógeno que causa oxidación del ión cianuro a ión cianato, el cual no tiene acción disolvente sobre el oro, según la reacción:



En la práctica, la concentración de cianuro varía entre 0.1 a 5 g/l

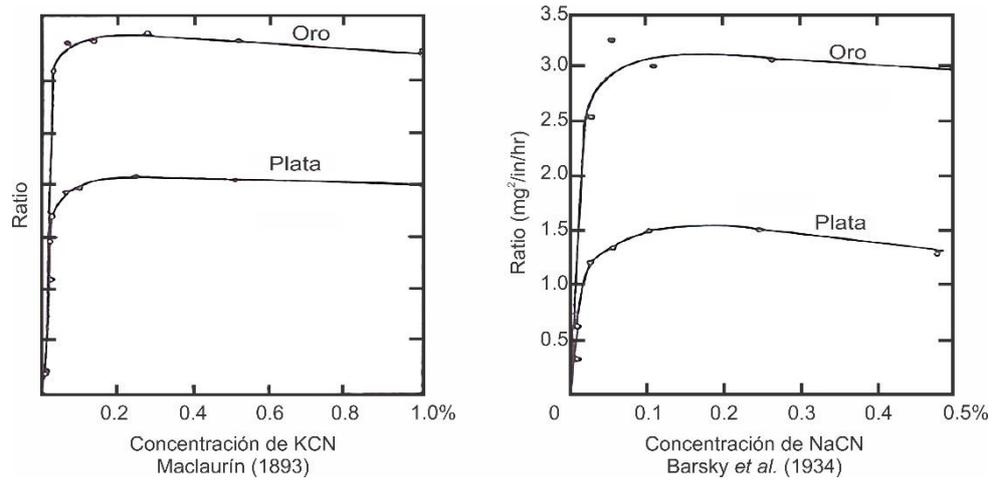


Figura 8. Efecto de la concentración de cianuro.

Fuente: (Suero Iquiapaza, 2018)

Tabla 2.

pH en función a la concentración de cianuro.

| KCN (%) | pH |
|---------|-------|
| 0.01 | 10.16 |
| 0.02 | 10.31 |
| 0.05 | 10.40 |
| 0.10 | 10.51 |
| 0.15 | 10.66 |
| 0.20 | 10.81 |

Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución del oro

Según las investigaciones de (Maclaurin, 1895), la velocidad de disolución del oro en soluciones de cianuro alcanza su punto máximo al pasar de soluciones concentradas a diluidas. Este máximo se logra cuando la concentración de KCN en la solución es del 0,25%, equivalente a aproximadamente el 0,19% de NaCN. Por otro lado, (Pietsch et al., 1983) descubrió que las soluciones que contienen menos del 0,001% de KCN no tienen la capacidad de disolver el oro.



En el estudio de (Maclaurin, 1895), se determinó que la velocidad máxima de disolución se alcanza cuando la concentración de KCN en la solución es de aproximadamente el 0,027%, equivalente a alrededor del 0,020% de NaCN, y cuando la solución está saturada de oxígeno. Además, (Samikhov et al., 2012) demostró que la velocidad de disolución del oro aumenta significativamente a medida que la concentración de la solución se eleva, alcanzando su máximo a alrededor del 0,10% de KCN.

De acuerdo con las investigaciones de (Barsky et al., 1934), se confirmó que la concentración de solución necesaria para lograr una disolución rápida es del 0,05% de NaCN. (Peñate Zúñiga, 2004)

En el caso de partículas independientes de oro a la temperatura estándar de 25°C, y según la ecuación de los gases, se disuelven aproximadamente 8.2 mg/l de oxígeno en agua, lo que equivale a aproximadamente $0.256 \cdot 10^{-3}$ moles/l. De acuerdo con la estequiometría de la reacción de Habashi, esto representa alrededor de 0.0502 g/l de NaCN. En consecuencia, concentraciones mayores a 0.0502 g/l de NaCN no influyen en la disolución del oro, ya que esta está controlada por la concentración de oxígeno en el medio (Maclaurin, 1895). Esto se representa en la Figura 9.

2.1.6.3 Efecto de la alcalinidad (pH)

El pH o alcalinidad de la solución de cianuro tiene un impacto significativo en el proceso de cianuración, ya que afecta la velocidad y la eficiencia de la disolución de oro y otros metales preciosos. Aquí se detalla el efecto de la alcalinidad (pH) en la cianuración:



- 1) **Óptimo pH de cianuración:** El pH ideal para la mayoría de las operaciones de cianuración suele estar en el rango de 10 a 11. A este nivel de alcalinidad, se maximiza la velocidad de disolución del oro y la plata en soluciones de cianuro. El pH óptimo puede variar según el mineral y las condiciones específicas de la operación, pero se encuentra típicamente en este intervalo.
- 2) **Efecto en la solubilidad del oxígeno:** El pH influye en la solubilidad del oxígeno en la solución. A pH más bajos (ácidos), la solubilidad del oxígeno disminuye, lo que puede ralentizar la reacción de oxidación de los metales. A pH más altos (alcalinos), la solubilidad del oxígeno aumenta, lo que favorece la velocidad de disolución.
- 3) **Formación de complejos:** A pH alcalinos, los iones cianuro (CN^-) están presentes en mayor concentración y forman complejos con el oro y la plata (por ejemplo, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$) que son solubles y favorecen la disolución de los metales. A pH más bajos, la formación de estos complejos es menos eficiente.
- 4) **Prevención de cianuro de hidrógeno (HCN):** A pH muy bajos (ácidos), el cianuro de hidrógeno (HCN), que es un gas altamente tóxico, puede formarse a partir del cianuro. Mantener un pH alcalino evita la formación de HCN y garantiza la seguridad en la planta.
- 5) **Minerales refractarios:** En algunos minerales refractarios que contienen sulfuros o minerales complejos, puede ser necesario un



pH más alto para mejorar la disolución del oro. Esto se debe a que a pH bajos, los sulfuros pueden consumir cianuro y dificultar la disolución de los metales preciosos.

- 6) **Control y ajuste del pH:** El control y la regulación del pH en la cianuración son críticos. Se utilizan reactivos alcalinos, como cal (hidróxido de calcio) o soda cáustica (hidróxido de sodio), para ajustar y mantener el pH en el rango óptimo.

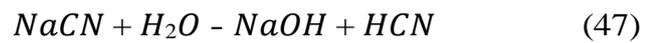
El pH desempeña un papel fundamental en este proceso. Aproximadamente a un pH cercano a 9.31, la mitad del cianuro total se presenta en forma de HCN, mientras que el resto se encuentra como cianuro libre (CN⁻). Cuando el pH alcanza los 10.2, más del 90% del cianuro total se convierte en CN⁻, mientras que a un pH de 8.4, más del 90% se presenta como HCN.

Por lo tanto, resulta esencial mantener un control preciso de la alcalinidad, ya que niveles elevados de alcalinidad pueden reducir la velocidad de disolución de manera lineal dentro del rango de pH comprendido entre 11 y 13. En la práctica, el rango típico de pH utilizado oscila entre 10.5 y 11.5, como se indica en la Figura 9.

A un pH de 11, más del 99% del cianuro permanece en la solución en forma de CN⁻, mientras que a un pH de 7, más del 99% del cianuro se encuentra en la forma de HCN. Es relevante señalar que el HCN es altamente soluble en agua, aunque su solubilidad disminuye con el aumento de la temperatura y en condiciones de alta salinidad. Además, el

HCN posee un característico olor a almendras amargas, aunque no todas las personas pueden percibir esta característica.

El cianuro se hidroliza en el aire húmedo y en soluciones acuosas, donde el equilibrio se establece rápidamente y dependiendo del pH, el HCN resulta a partir de la disolución siguiente



La constante de disociación del ácido hidrocianico débil es de 4.36×10^{-10} y el equilibrio depende del pH. (Suero Iquiapaza, 2018)

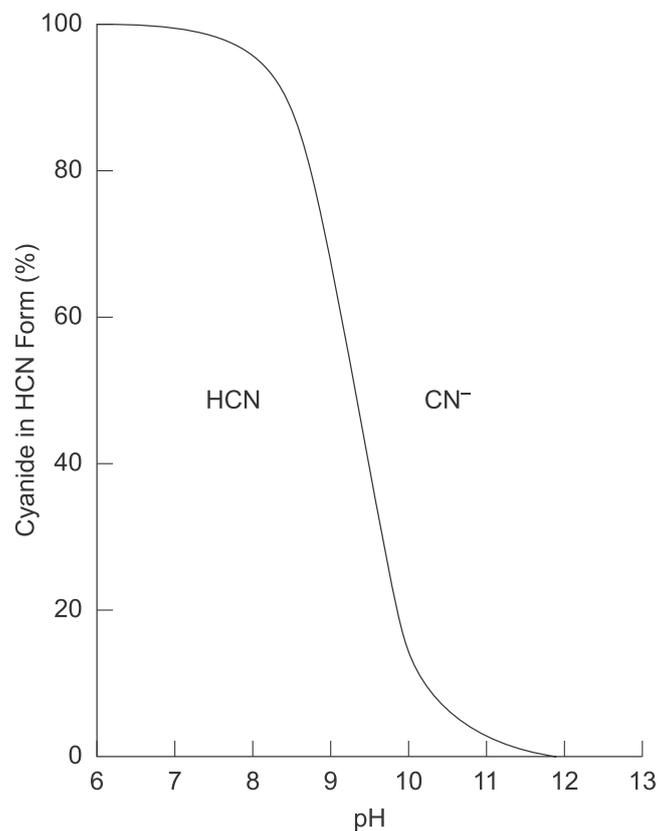


Figura 9. Equilibrio entre HCN y CN⁻ en función del pH.

Fuente: (Pietsch et al., 1983)



2.1.6.4 Efecto del tiempo de cianuración

El efecto del tiempo de cianuración es un factor crucial en los procesos de extracción de oro y plata utilizando cianuro como agente lixivante. El tiempo de cianuración se refiere a la duración o el período durante el cual la mena aurífera o argentífera se encuentra en contacto con una solución cianurada para permitir que los metales preciosos se disuelvan y sean recuperados. Este parámetro es esencial para determinar la eficiencia y la velocidad del proceso de lixiviación.

A continuación, se describen algunos aspectos clave relacionados con el efecto del tiempo de cianuración:

- 1) **Cinética de la disolución:** El tiempo de cianuración está estrechamente relacionado con la cinética de disolución del oro y la plata. La velocidad a la cual estos metales se disuelven en la solución de cianuro depende de diversos factores, como la concentración de cianuro, la presencia de oxígeno, la temperatura y el pH. Un período de cianuración adecuado es necesario para permitir que las reacciones de disolución se lleven a cabo de manera eficiente.
- 2) **Extracción de metales preciosos:** El tiempo de cianuración influye directamente en la extracción de oro y plata. En general, un período de cianuración más largo aumenta la probabilidad de disolver una mayor cantidad de metales preciosos contenidos en la mena. Sin embargo, es importante encontrar un equilibrio, ya que prolongar innecesariamente el tiempo de cianuración puede resultar en costos adicionales y una menor eficiencia económica.



- 3) **Velocidad de reacción:** La velocidad de reacción de disolución de los metales en la mena disminuirá con el tiempo, ya que la concentración de metales en la mena se reducirá gradualmente. Esto significa que, con el tiempo, la velocidad de extracción de oro y plata disminuirá, y se necesitará más tiempo para lograr una disolución completa.
- 4) **Factores económicos:** El tiempo de cianuración también está relacionado con los costos operativos de una planta de procesamiento. Un tiempo de cianuración más largo significa que se requieren más recursos, como espacio, energía y personal, para mantener el proceso en marcha. Por lo tanto, es esencial encontrar un equilibrio entre el tiempo necesario para alcanzar una extracción óptima y la eficiencia económica del proceso.
- 5) **Control de calidad:** El monitoreo y el control del tiempo de cianuración son esenciales para garantizar una extracción efectiva de oro y plata y evitar la sobrecianuración o la subcianuración. Establecer tiempos de residencia precisos y controlados en los reactores o tanques de lixiviación es crucial para lograr resultados consistentes y óptimos.

El tiempo de cianuración desempeña un papel fundamental en la eficiencia y el rendimiento de los procesos de lixiviación de oro y plata utilizando cianuro. En la práctica, se deben realizar pruebas y estudios para determinar el tiempo de cianuración óptimo para cada tipo de mena y condiciones de operación específicas. El control y la optimización de este parámetro son esenciales para garantizar una extracción eficiente de los metales preciosos y una operación rentable.



2.1.6.5 Efecto de la temperatura en la cianuración

La temperatura es un factor importante que influye en la cianuración. Una temperatura más alta aumenta la velocidad de disolución del oro y la plata.

El efecto de la temperatura en la cianuración se puede explicar por la cinética de la reacción. La reacción de cianuración es una reacción química heterogénea que se produce en la superficie de las partículas de mineral.

La velocidad de una reacción heterogénea está determinada por la velocidad de difusión de los reactivos y los productos a través de la interfase. A temperaturas más altas, la difusión es más rápida, lo que aumenta la velocidad de la reacción.

Además, a temperaturas más altas, el cianuro es más reactivo. Esto se debe a que la energía de activación de la reacción es menor a temperaturas más altas.

En general, el efecto de la temperatura en la cianuración es positivo. Una temperatura más alta aumenta la velocidad de disolución del oro y la plata, lo que mejora la eficiencia del proceso.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que una temperatura demasiado alta puede degradar el mineral o el equipo.

Los efectos específicos de la temperatura en la cianuración incluyen:



- **Aumento de la velocidad de disolución:** A temperaturas más altas, la difusión de los reactivos y los productos es más rápida, lo que aumenta la velocidad de la reacción.
- **Aumento de la reactividad del cianuro:** A temperaturas más altas, el cianuro es más reactivo. Esto se debe a que la energía de activación de la reacción es menor a temperaturas más altas.
- **Degradación del mineral o el equipo:** Una temperatura demasiado alta puede degradar el mineral o el equipo.

Recomendaciones para la optimización del efecto de la temperatura en la cianuración:

- Utilizar una temperatura de cianuración que sea lo suficientemente alta para aumentar la velocidad de disolución, pero no tan alta como para degradar el mineral o el equipo.
- Monitorear la temperatura del proceso para garantizar que no se exceda el límite recomendado.

Por lo tanto, existe una temperatura particular que ofrece la velocidad máxima de disolución del oro. Esta temperatura óptima se encuentra aproximadamente a los 85°C, como se muestra en la Figura 10 adjunta.

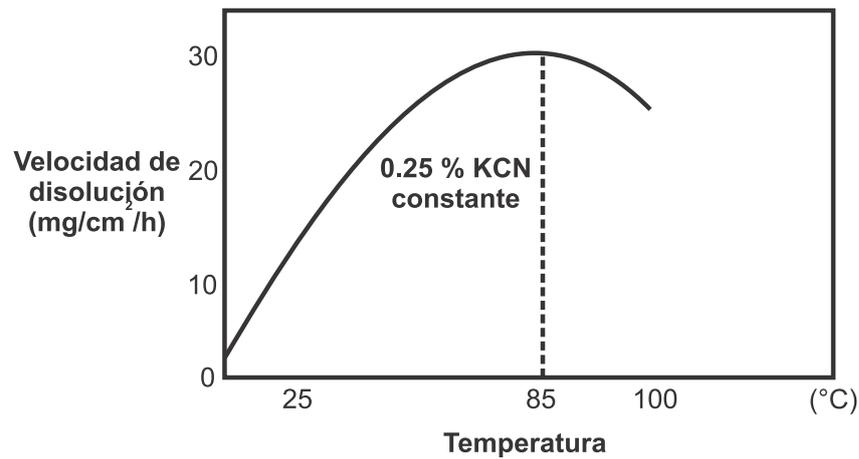


Figura 10. Efecto de temperatura - velocidad de disolución del oro.

Fuente: (Bosquí, 1950)

2.1.6.6 Efecto del tamaño de partícula (granulometría)

El tamaño de partícula, también conocido como granulometría, es un factor crítico en el proceso de cianuración, ya que afecta significativamente la cinética de la disolución de oro y otros metales preciosos. Aquí se detalla el efecto del tamaño de partícula en la cianuración:

- 1) **Aumento de la superficie específica:** Cuando se reduce el tamaño de las partículas del mineral, se incrementa la superficie específica disponible para la reacción de cianuración. Esto significa que las partículas más pequeñas tienen una mayor área de contacto con la solución de cianuro y el oxígeno disuelto, lo que acelera la velocidad de disolución.
- 2) **Mayor velocidad de disolución:** Partículas más pequeñas permiten una mayor velocidad de disolución del oro y otros metales preciosos, ya que el proceso de reacción ocurre en la superficie de las partículas. Esto es particularmente importante



para minerales refractarios o minerales que contienen sulfuros, ya que la disolución puede ser más difícil en estos casos.

- 3) **Tiempo de residencia:** Las partículas más pequeñas tienen un menor tiempo de residencia en el proceso de cianuración, lo que significa que pasan menos tiempo en contacto con la solución de cianuro. Esto puede requerir tiempos de lixiviación más largos para lograr una disolución completa del oro.
- 4) **Requerimientos de agitación:** Para garantizar una distribución uniforme de la solución de cianuro y oxígeno en la pulpa, es necesario un mayor nivel de agitación cuando se utilizan partículas más pequeñas. Esto asegura que la reacción de cianuración ocurra de manera eficiente en todas las partículas.
- 5) **Cribado y clasificación:** El control del tamaño de partícula es esencial en la etapa de preparación del mineral. El cribado y la clasificación se utilizan para separar las partículas de diferentes tamaños antes de la cianuración, lo que permite un control más preciso del proceso.
- 6) **Minerales refractarios:** En el caso de minerales refractarios, reducir el tamaño de partícula puede ser una estrategia efectiva para mejorar la recuperación de oro, ya que aumenta la exposición del mineral a la solución de cianuro y el oxígeno.
- 7) **Eficiencia económica:** Sin embargo, es importante considerar que la reducción extrema del tamaño de partícula puede requerir equipos de molienda más costosos y aumentar los costos



operativos. Por lo tanto, se busca un equilibrio entre la eficiencia de disolución y la eficiencia económica.

En resumen, el tamaño de partícula desempeña un papel fundamental en la cianuración, ya que afecta la velocidad y la eficiencia de la disolución de oro y otros metales preciosos. El control adecuado del tamaño de partícula es esencial para optimizar la recuperación de metales preciosos en operaciones de cianuración (Yannopoulos, 2012).

2.1.6.7 Efecto de la agitación en la cianuración

El efecto de la agitación en la cianuración es un factor crítico que influye en la eficiencia y la velocidad del proceso. La agitación se refiere al movimiento constante y controlado del material en la solución cianurada, generalmente a través del uso de agitadores o equipos de agitación en tanques o reactores. Este proceso tiene varios impactos importantes en la cianuración de minerales auríferos:

- 1) **Mezcla homogénea:** La agitación asegura que los reactivos, como el cianuro y el oxígeno disuelto, estén uniformemente dispersos en la solución. Esto promueve un contacto efectivo entre los reactivos y las partículas de oro, lo que mejora la cinética de la reacción.
- 2) **Transferencia de masa:** La agitación facilita la transferencia de masa de los reactivos desde la solución hacia la superficie de las partículas de oro. Esto es esencial para que la reacción de disolución del oro ocurra de manera eficiente.



- 3) **Eliminación de gases disueltos:** La agitación ayuda a eliminar los gases disueltos, como el oxígeno y el dióxido de carbono, de la solución. Esto es importante, ya que el oxígeno es necesario para la reacción de disolución del oro, y el dióxido de carbono puede reaccionar con el cianuro, disminuyendo su eficacia.
- 4) **Prevención de sedimentación:** La agitación evita que las partículas sólidas en suspensión se sedimenten en el fondo del tanque. Esto es relevante en la cianuración, ya que permite que las partículas de oro y minerales se mantengan en suspensión y, por lo tanto, estén disponibles para la reacción.
- 5) **Control de la temperatura:** La agitación también puede contribuir al control de la temperatura del proceso. A medida que las reacciones de cianuración son exotérmicas (generan calor), la agitación ayuda a distribuir el calor de manera uniforme y evita puntos calientes que podrían afectar negativamente la cinética de la reacción.
- 6) **Reducción de la formación de películas pasivas:** La agitación constante reduce la formación de películas pasivas en la superficie de las partículas de oro. Estas películas pueden inhibir la disolución del oro y reducir la eficiencia del proceso.

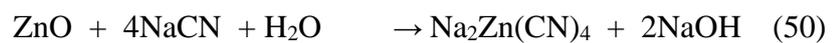
La agitación adecuada desempeña un papel fundamental en la cianuración al mejorar la mezcla de reactivos, facilitar la transferencia de masa y mantener las partículas en suspensión. Esto conduce a una mayor eficiencia y velocidad en la disolución del oro, lo que es esencial para la



recuperación exitosa de este metal precioso en la minería aurífera. La optimización de la agitación es un aspecto crítico en el diseño y la operación de plantas de cianuración.

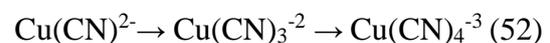
2.1.6.8 Efecto de los iones extraños.

La velocidad de disolución del oro se rige principalmente por el proceso de difusión, pero en la cianuración de minerales a nivel industrial, la presencia de cianuro y otras sustancias que consumen oxígeno puede tener un impacto significativo en la velocidad de extracción del oro. En particular, minerales como la pirrotita (y en menor medida la pirita), así como metales como el cobre, el zinc y otros elementos esenciales, junto con minerales que contienen arsénico y antimonio, tienen la capacidad de consumir el cianuro. A continuación, se presentan algunas de las reacciones asociadas con este fenómeno:



Los iones de metales fundamentales (Cu^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2}) forman con el cianuro iones complejos estables, consumiéndolo, reduciendo su actividad y retardando la cianuración del oro.

En su forma monovalente, el cobre puede formar una serie de complejos altamente solubles en soluciones que contienen cianuro:



Las sustancias no deseadas más comunes presentes en los minerales incluyen minerales como el cuarzo, feldspatos, micas, calcitas, y minerales de selenio y magnetita. Si el mineral de oro contiene material carbonáceo, esto puede interferir con el proceso al adsorber los complejos cianurados de oro y plata, en un fenómeno conocido como "robo de precursores" (Preg-robbing). En este caso, los metales disueltos en las soluciones cianuradas pueden influir en la disolución del oro, ya sea ralentizándola o acelerándola.

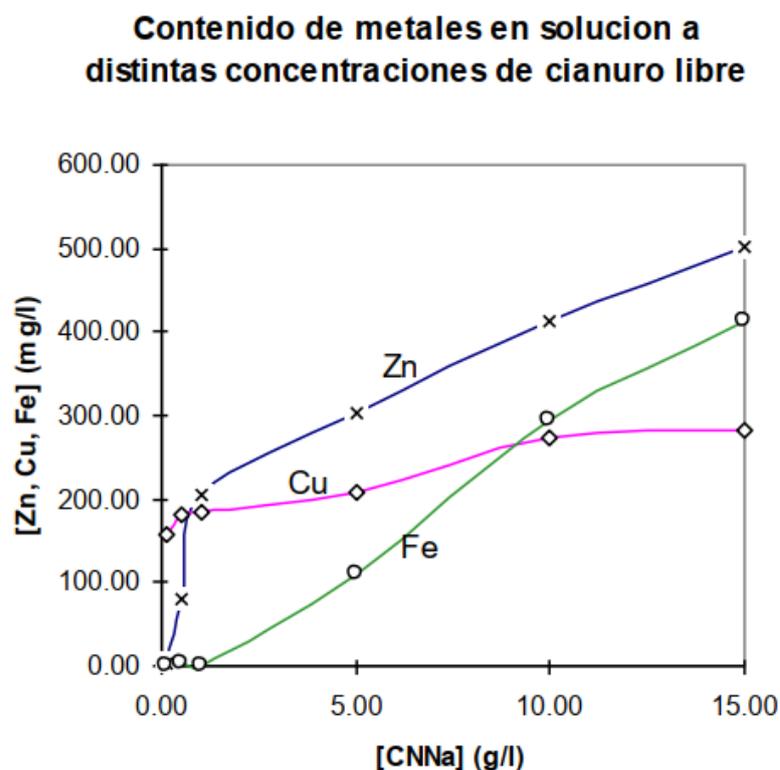


Figura 11. Contenido de Cu, Fe, Zn en solución a diferentes concentraciones de cianuro.

Fuente: (Domic Mihovilovic, 2001)

- **Efectos acelerantes**

La presencia de pequeñas cantidades de plomo, mercurio, bismuto y sales de talio, aceleran la disolución del oro. A partir de determinación

de potenciales de electrodo en soluciones cianuradas se ha encontrado que el oro realmente puede desplazar los iones en esos cuatro metales. De ahí que la disolución rápida del oro en presencia de estos iones puede deberse a la alteración de la superficie del oro al mezclarse con estos metales desplazados.

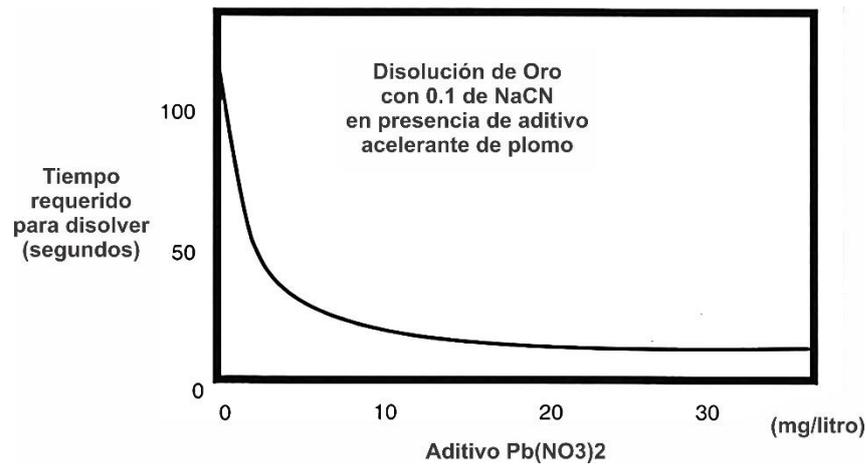


Figura 12. Disolución de oro con 0.1 % de NaCN en presencia de nitrato de plomo.

Fuente: (Domic Mihovilovic, 2001)

- **Efectos Retardantes**

Los efectos retardantes pueden atribuirse a alguna de las siguientes situaciones:

- a) Consumo de oxígeno en la solución, donde cualquier reacción secundaria que consuma el oxígeno disponible en la solución resultará en una disminución en la cantidad de disolución del oro.
- b) Consumo de cianuro libre en la solución, que puede ser agotado por la formación de complejos al disolver minerales de cobre, zinc y hierro que a menudo están presentes en los minerales de oro, lo que disminuye el contenido de iones de cianuro en la solución.



Es importante mencionar que los agentes oxidantes como el KMnO_4 , NaClO , NaClO_3 y el H_2O_2 pueden acelerar la cinética y oxidar azufre y materia orgánica a bajas concentraciones, pero en concentraciones más altas pueden volverse pasivantes y destruir los iones de cianuro, lo que ralentiza la velocidad de disolución del oro.

La presencia de reactivos de flotación también puede disminuir la velocidad de lixiviación de oro, ya que implican la reacción con el CN^- en fase acuosa. Por lo tanto, es necesario destruir estos reactivos previamente mediante tostación.

- **Formación de películas**

Además, en algunos casos, se forma una película en la superficie del oro, lo que dificulta su disolución. Estas películas pueden estar compuestas de sulfuros (la presencia de sulfuros en concentraciones de 0.5 ppm o más retarda la disolución debido a la formación de una película de sulfuro auroso insoluble en la superficie del oro), peróxidos (como el CaO_2 formado a un pH superior a 11.5), óxidos, cianuros insolubles (como AgCN y $\text{Pb}(\text{CN})_2$), u otras películas que pueden formarse debido a efectos de corrosión o durante el proceso de flotación (por ejemplo, la presencia de 0.4 ppm de xantato amílico de potasio (Z-6) puede disminuir la velocidad de disolución del oro).



2.2 Teorías y conceptos del efecto de la adición de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

2.2.1 Proceso de cianuración de Au

El conocimiento y el control de las variables en el proceso de cianuración de minerales de oro son fundamentales para encontrar las condiciones óptimas de funcionamiento.

La incorporación de nitrato de plomo modifica el mecanismo de disolución del oro y la plata, alterando los efectos del cianuro libre en la velocidad de cianuración de estos metales preciosos. El nitrato de plomo desempeña un papel beneficioso al reducir el impacto negativo de los minerales sulfurados durante el proceso de cianuración. La adición de nitrato de plomo a la pulpa, ya sea en presencia o ausencia de oxígeno, incrementa la velocidad de disolución del oro y la plata, lo que tiene un impacto positivo en la recuperación de estos valores. Esto se logra mediante varios efectos beneficiosos:

- 1) Precipita iones de azufre mediante la formación de sulfuro de plomo insoluble.
- 2) Inhibe la disolución de sulfuros metálicos.
- 3) Previene la formación de complejos cianurados con iones de azufre, como el CNS^- .

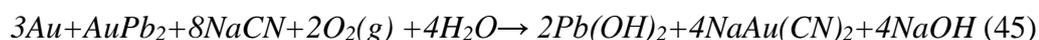
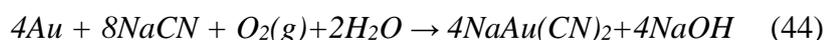
Los detalles del análisis subyacente, así como las explicaciones electroquímicas y fisicoquímicas, y el efecto catalizador del nitrato de plomo, se describen y explican posteriormente. También se menciona que el nitrato de plomo, junto con el mercurio, así como los iones de bismuto y talio, aceleran la velocidad de disolución del oro.



Deschênes (2016), en su estudio sobre el “Efecto del $Pb(NO_3)_2$ en la cianuración de los minerales auríferos” indican que en una solución cianurada el $Pb(NO_3)_2$ y el oro forman aleaciones como $AuPb_2$, $AuPb_3$ y plomo metálico, que claramente acelera la disolución del oro.

De acuerdo a (Domic Mihovilovic, 2001), el $Pb(NO_3)_2$ cambia algunas características físicas de la superficie del oro, comportándose como pseudo aleaciones Au-Pb, disminuyendo el espesor de la interfase sólido-líquido, facilitando el acceso de los reactivos a la superficie del metal. Es decir que el $Pb(NO_3)_2$ actúa como un catalizador y despolarizador durante el proceso de cianuración de oro y plata.

2.2.2 Termodinámica de las reacciones de cianuración de oro sin y con nitrato de plomo



| Ecuación | H kcal | S cal/K | G kcal | K | Log(K) |
|----------|---------|---------|---------|-----------|--------|
| 1 (44) | -49.46 | 83.76 | -73.18 | 3.07E+56 | 56.49 |
| 2 (45) | -243.88 | -212.36 | -183.76 | 6.97E+141 | 141.84 |

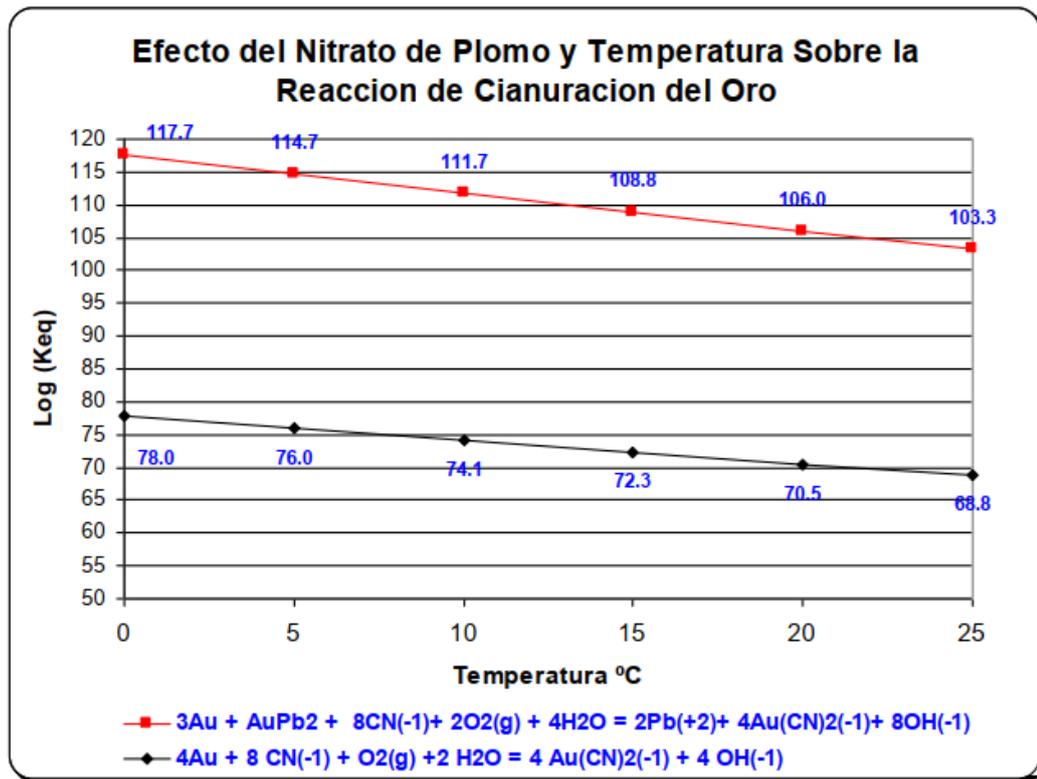
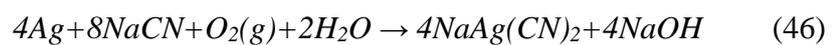


Figura 13. Termodinámica de las reacciones de cianuración de oro sin y con nitrato de plomo

2.2.3 Termodinámica de las reacciones de cianuración de plata y del sulfuro de plata sin y con nitrato de plomo



| Ecuación | H kcal | S cal/K | G kcal | K | Log(K) |
|----------|---------|---------|--------|----------|--------|
| 3 (46) | -110.59 | -122.23 | -75.98 | 4.50E+58 | 58.65 |
| 4 (47) | 44.13 | 73.55 | 23.30 | 1.03E-18 | -17.99 |
| 5 (48) | -6.52 | 74.30 | -27.56 | 1.87E+21 | 21.27 |

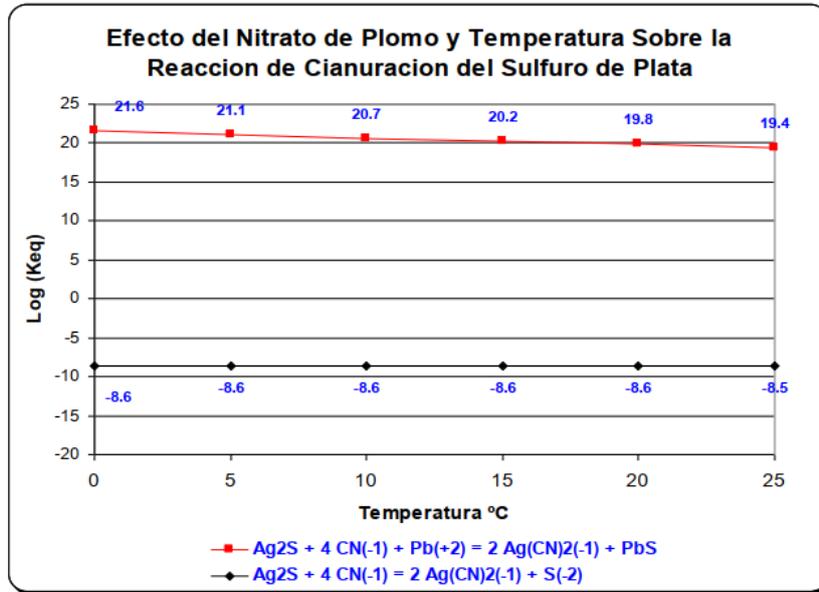


Figura 14. Efecto del Nitrato de Plomo y Temperatura Sobre la Reacción de Cianuración del Sulfuro de Plata

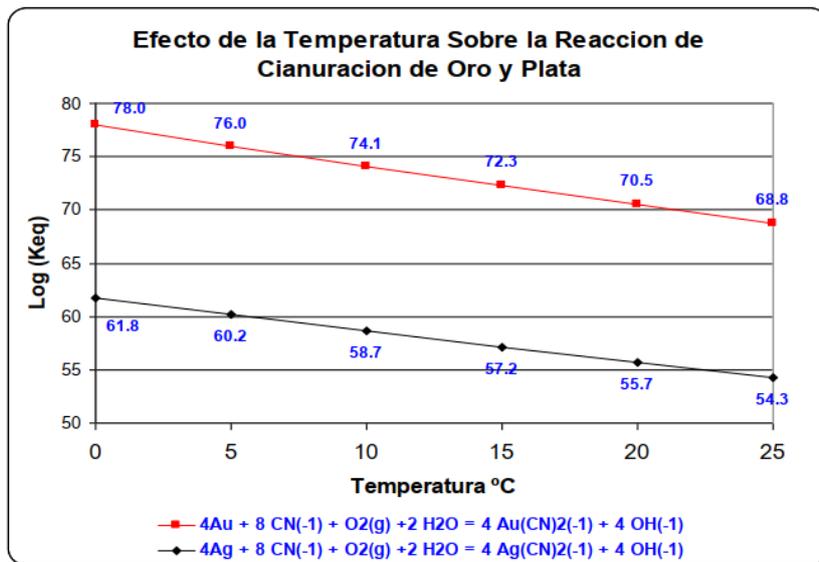


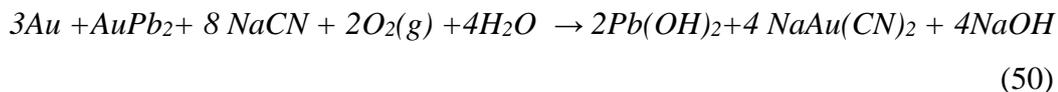
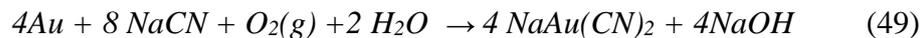
Figura 15. Efecto de la Temperatura Sobre la Reacción de Cianuración de Oro y Plata.

2.2.4 Efecto del $Pb(NO_3)_2$ sobre la extracción de Au Y Ag

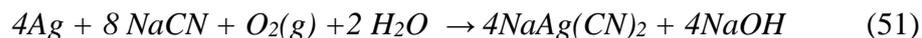
Las reacciones que ocurren en la superficie del oro y de la plata son las siguientes:



Reacciones con el oro:



Reacciones con la plata:



2.3 EFECTO DEL PLOMO Y LOS IONES SULFUROS SOBRE LA VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN DEL ORO EN SOLUCIONES CIANURADAS ALCALINAS

El efecto del plomo y los iones sulfuros sobre la velocidad de disolución del oro en soluciones cianuradas alcalinas es un aspecto relevante en la cianuración de minerales de oro. Aquí se discuten los efectos de estos dos componentes en detalle:

- 1) **Efecto del Plomo (Pb):** El plomo, en forma de nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$), es un agente químico que se utiliza para mejorar la velocidad de disolución del oro en soluciones cianuradas alcalinas. El nitrato de plomo tiene varios efectos positivos en el proceso de cianuración:
 - **Precipitación de Iones de Azufre:** El nitrato de plomo reacciona con los iones sulfuros (S^{2-}) presentes en algunos minerales sulfurados, como la pirita (FeS_2). Esta reacción conduce a la formación de sulfuro de plomo (PbS), un compuesto insoluble en la solución. Al eliminar los iones de azufre de la solución, se evita que participen en reacciones que consuman cianuro y reduzcan la velocidad de cianuración.



- **Inhibición de la Disolución de Sulfuros Metálicos:** El nitrato de plomo también puede inhibir la disolución de minerales sulfurados metálicos, como la pirrotita (FeS) y otros. Esto evita que los sulfuros metálicos compitan con el oro por el cianuro, lo que podría ralentizar el proceso de disolución del oro.
 - **Prevención de la Formación de Complejos Cianurados con Iones de Azufre:** El nitrato de plomo evita la formación de complejos cianurados con iones de azufre, como el ion tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$). Estos complejos pueden agotar la concentración de cianuro libre en la solución, reduciendo así la velocidad de cianuración del oro.
- 2) **Efecto de los Iones Sulfuros (S^{2-}):** Los iones sulfuros, que pueden estar presentes en minerales sulfurados, tienen un efecto negativo en la velocidad de disolución del oro en soluciones cianuradas alcalinas debido a las reacciones competitivas con el cianuro. Los sulfuros pueden consumir cianuro y limitar su disponibilidad para la disolución del oro. Además, pueden formar complejos cianurados que son menos efectivos en la disolución del oro que el cianuro libre.

El plomo, en forma de nitrato de plomo, se utiliza en el proceso de cianuración para contrarrestar los efectos negativos de los iones sulfuros y mejorar la velocidad de disolución del oro en soluciones cianuradas alcalinas. La interacción entre el plomo, los sulfuros y el cianuro es un aspecto crucial a considerar en la optimización de este proceso metalúrgico.

2.3.1 Control de adición de nitrato de plomo

Desde 1997, se ha implementado la adición de nitrato de plomo como parte integral del proceso de extracción de oro. Como resultado de esta incorporación,



las recuperaciones de oro han experimentado un incremento significativo, pasando de un 89% en 1997 a un 94% en la actualidad.

Dado que no es factible realizar mediciones directas de la concentración de plomo en la solución, el método empleado para supervisar y regular la adición de nitrato de plomo implicaba la utilización de los relaves de oro del tanque de lixiviación como indicadores para estimar el contenido de oro en el relave final. A partir de esta estimación, se procedía a ajustar la cantidad de nitrato de plomo que se añadía al proceso. A pesar de que se observaba un lapso de aproximadamente 30 horas entre la modificación de la tasa de adición del nitrato de plomo y el cambio real en la concentración de oro, este enfoque se consideraba una guía útil en la operación (Deschênes, 2016).

Posteriormente, se desarrolló una tecnología de control de la adición de nitrato de plomo basada en la monitorización de los niveles de tiocianato en la solución lixivante, ya que estos niveles están relacionados con la capacidad reductora de la solución. La determinación de la capacidad reductora equivale a medir la concentración de tiocianato en la solución. Tras realizar investigaciones de laboratorio y recopilar datos durante dos meses, se tomó la decisión de emplear la medición de tiocianato como método de control para la adición de nitrato de plomo. En tan solo una semana, se logró reducir el consumo de nitrato de plomo en un 30%, y dos semanas más tarde, esta reducción totalizaba el 50%. Importante destacar que esta modificación no tuvo efectos adversos en la extracción de oro (Deschênes, 2016).

El método más convencional para regular la adición de nitrato de plomo se basa en la relación entre la cantidad de oro en los relaves de lixiviación, la



concentración de oxígeno disuelto y la concentración de cianuro libre en la solución lixivante (Deschenes et al., 2000). En este enfoque, si el contenido de oro en los relaves aumenta o si se observa un incremento en el consumo de cianuro, se aumenta la tasa de adición de nitrato de plomo. Sin embargo, esta estrategia conlleva fluctuaciones en el circuito y, por ende, ganancias o pérdidas. Para que un método de control de la adición de nitrato de plomo sea eficiente, debe basarse en análisis de la pulpa, permitiendo al operador ajustar la tasa de adición de nitrato de plomo antes de que los minerales sulfurados afecten negativamente la eficiencia de la lixiviación. El objetivo principal de este control es mantener la extracción de oro en su nivel más alto dentro del circuito de cianuración, en conjunto con la dosificación adecuada de reactivos (Yannopoulos, 2012).

Prueba del poder reductor para la solución lixivante:

El poder reductor (RP) proporciona una medición aproximada de las sustancias reductoras presentes de la solución lixivante. Estas sustancias pueden representar muchas cosas:

- Competidores por el oxígeno disuelto necesarios para la disolución del oro.
- Consumidores de cianuro
- El acomplejante fundamental en la disolución del oro, y producto de la degradación de cianuro básicamente tiocianato.



2.3.2 Efecto de nitrato de plomo en la cianuración de una muestra de mineral oro

El efecto de la adición de nitrato de plomo sobre la cinética de disolución de oro de un mineral dice que hay un aumento significativo de la cinética de lixiviación de oro desde 50 g/t a 400 g/t de NP, pero no hay ninguna mejora adicional aumentando de la adición a más de 400 g/t. El estado de equilibrio se alcanza en 24 horas con un nivel de adición de 200 g/t NP. La adición de NP reduce el consumo de cianuro en 14%.

2.3.2.1 Prueba del efecto de nitrato de plomo:

El efecto de la adición de nitrato de plomo en la velocidad de disolución del oro en un mineral muestra un aumento significativo en la velocidad de lixiviación de oro cuando la cantidad de nitrato de plomo pasa de 50 g/t a 400 g/t. Sin embargo, no se observa una mejora adicional al aumentar la adición de nitrato de plomo más allá de 400 g/t. Se alcanza un estado de equilibrio en 24 horas cuando se agrega 200 g/t de nitrato de plomo. Además, la adición de nitrato de plomo reduce el consumo de cianuro en un 14%.

En pruebas realizadas en el procesamiento de un mineral ligeramente refractario con una cabeza de 7 g/t de oro y aproximadamente un 3% de oro encapsulado en solución sólida con la arsenopirita, se observa que la incorporación de nitrato de plomo en forma de solución al 19% como tratamiento prelixivante en la descarga del molino de bolas debe aumentar la recuperación total de oro. Hasta ahora, el método de control del nitrato de plomo implicaba utilizar el valor del relave de oro en



el tanque de lixiviación como indicador del relave final y ajustar la adición de nitrato de plomo para optimizar la lixiviación del oro, lo que requería ajustes en función de las variaciones en el contenido de oro en la cabeza.

La concentración de tiocianato en la solución lixivante se mide mediante la capacidad reductora con un punto final visual durante las pruebas iniciales. Se observan algunos puntos clave:

- Se observa si existe una relación entre la ley de oro en el relave del tanque y la ley de oro en el compósito de la cabeza después de 12 horas.
- Se evalúa el valor de la ley del relave final en relación con la ley de la cabeza 50 horas después.
- Se verifica la estabilidad de la adición de nitrato de plomo en comparación con el punto fijo.

Cuando la adición de nitrato de plomo se mantiene constante, se forma una mayor concentración de tiocianato si aumenta el contenido de azufre en la alimentación. Sin embargo, si el nitrato de plomo se agrega en exceso, se observa una disminución en la concentración de tiocianato a medida que aumenta la ley de la cabeza.

2.3.2.2 **Análisis de la prueba de efecto de nitrato de plomo:**

- La prueba de evaluación en la formación de tiocianato para controlar la adición de nitrato de plomo, ahorra los costos de reactivos y mejora el proceso.



- Si la adición de nitrato de plomo se reduce al 50%, durante el periodo de prueba y no se observó ninguna disminución en la extracción de oro, la relación entre el contenido de oro de la alimentación y su contenido de sulfuros se debería de establecer, en base a la medición de tiocianato, según los resultados de laboratorio que indican que para un contenido constante de sulfuros en la alimentación el incremento de nitrato de plomo reduce la concentración de tiocianato formado en la solución lixiviante.

2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Un diseño experimental desempeña un papel importante con respecto a la optimización de procesos, su correcta elaboración es crucial para conseguir datos esenciales que cumplan las premisas que se requiere por las pruebas ejecutadas (Varela & Reyes, 2011). La planificación de un diseño experimental se lleva de manera ordenada y precisa, según la literatura existen varios ejemplos de experimentos que no se dieron como se esperaba, debido al descuido o el poco interés en el modelo estadístico de sus proyectos (Egan et al., 2016). Las preguntas que normalmente se desea responder son: Para qué, por qué, cómo, cuándo y dónde se va a realizar el experimento, es importante que el diseño sea simple. La manera más eficiente y eficaz de realizar pruebas de un proceso es un diseño experimental, demostrando una serie de pasos a seguir para lograr determinar cuántas pruebas se deben ejecutar (Fernández Bao, 2020), permitiéndonos de la misma forma obtener el orden en el que se va a realizar cada prueba.



2.4.1 Principios Básicos de un Diseño Experimental

2.4.1.1 Repetición o Reiteración

Este principio nos indica que se puede realizar una o varias réplicas de las pruebas experimentales, permitiendo al experimentador obtener una estimación del error experimental y una estimación precisa del factor de interacción, por lo que entre más réplicas se obtenga; más acerteros serán los resultados. A la hora que se realizar una investigación se debe tener mucho cuidado de “no confundir el concepto replicación o repetición del experimento con la toma repetida de mediciones u observaciones sobre el mismo material experimental (Gutiérrez Pulido, 2012).

2.4.1.2 Aleatorización

Mediante una asignación de manera aleatoria a los tratamientos de las unidades experimentales permite sesgar el experimento. En un diseño experimental pueden existir factores que pueden intervenir de manera indirecta o directa en el rendimiento del proceso por lo que se debe realizar una selectividad en las pruebas garantizando que todos los niveles de un factor posean las mismas posibilidades y así obtener mejores resultados (Escalante et al., 2014).

2.4.1.3 Control local

Esta es la medida que se toma dentro del diseño experimental para su eficiencia, permitiendo reducir el error experimental y volviéndola sensible ante prueba de significación. Su objetivo fundamental es eliminar



o minimizar las fuentes de variabilidad que no se desee en el experimento, organizando los experimentos en grupos homogéneos (Antony, 2003).

2.4.2 Ventajas y desventajas del Diseño Experimental

Ventajas: Mediante diseño experimental permite obtener el control y manipulación de las variables en estudio, así mismo permite conocer la interacción que existe entre los diferentes factores en estudio. Con ayuda de la investigación y la estadística se logra analizar e interpretar cada paso o secuencia del programa (Fernández Bao, 2020). Ofrece alternativas antipáticas y mantiene la pre-planificación sistemática, lo que permite que se efectúe de manera ordenada por etapas. La atención debe enfocarse en las interrelaciones, estimación y cuantificaciones de las fuentes de variabilidad en los resultados obtenidos.

Desventajas: Frecuentemente los diseños y los análisis contienen enunciados que son basados en el lenguaje técnico estadístico, estos diseños resultan económicamente costosos, complicados al momento de ser aplicados y conllevan una larga duración con respecto al tiempo de ejecución.

2.4.3 Etapas del Diseño Experimental

Para poder preparar las condiciones de prueba y control, es necesario realizar un diseño experimental evitando que el experimento obtenga resultados erróneos (Chok et al., 2005).

La manera correcta de ejecutar pruebas a un proceso es mediante un diseño experimental, para ello existen etapas que permiten elaborar de manera correcta y sistemática un diseño que incluye el establecimiento del problema, variable

independiente, factores, niveles, ejecución del experimento e interpretación de los análisis estadísticos (Montgomery & Verbeek, 2004).

2.4.4 Diseño Factorial

Dentro de este dominio se encuentran las investigaciones con múltiples factores que ocurre dentro de las experimentaciones, es decir, cuando un resultado depende de varios factores que deben ser evaluados en diferentes niveles y así obtener mejores resultados (Chok et al., 2005). Después de que se definan los factores y niveles se determina los tratamientos necesarios para ejecutar cada prueba experimental.

2.4.5 Diseño Factorial 2^k

Se considera este diseño como un diseño experimental de primer orden y se define por las posibles combinaciones para las cuales se pueden estudiar K factores en un diseño factorial ⁵⁴. Este diseño es muy sencillo de ejecutar, debido a que proporciona un mínimo de ensayos, para poder considerar el número adecuados de experimentos a realizar se define con la siguiente formula¹⁴.

$$N = 2^K \quad (54)$$

Donde:

K: número de factores a estudiar

N: número de experimentos

Podemos observar en la Fig. 5 Niveles para un diseño factorial 2^k en un sistema de coordenada bidimensional.

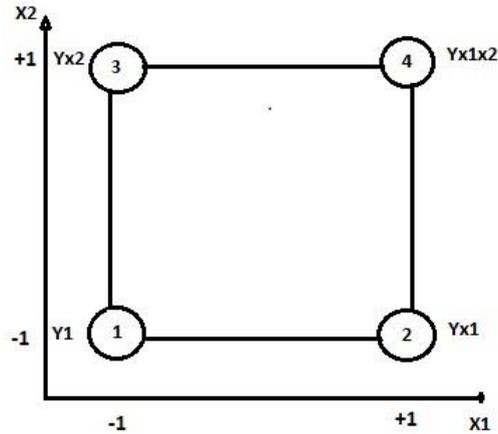


Figura 16. Niveles: Diseño Factorial 2k0Fuente

Fuente: (Montgomery & Verbeeck, 2004)

Donde:

$K= 2$; $X1= 1$; $X2= 2$; $Y=$ variable respuesta; $+1=$ nivel superior de la variable, mientras que $-1=$ nivel inferior de la variable.

En la siguiente tabla se puede observar los valores de las variables a escala codificada.

Tabla 3.

Valores de las variables codificadas

| Nº DE PRUEBA | VALORES CODIFICADOS | | RESPUESTA |
|--------------|---------------------|---|-----------|
| 1 | - | - | Y1 |
| 2 | + | - | Yx1 |
| 3 | - | + | Yx2 |
| 4 | + | + | Yx1x2 |

Fuente: (Fernández Bao, 2020)

Se considera $Yx1$ como la variable respuesta cuando $X1$ se encuentra en su nivel alto y $X2$ en su nivel más bajo, mientras que $Y1$ se la considera cuando $X1$ y $X2$ se encuentren en su nivel inferior, así mismo sucede con $Yx1x2$ la cual se la considera cuando $X1$ y $X2$ se encuentren en su nivel superior (Gutiérrez Pulido, 2012).

2.4.6 Diseño Factorial 2k con réplicas en el punto central del diseño

Se considera para este diseño, adicionar más de una réplica en el punto central, dando paso a una mayor confiabilidad a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y así lograr una mejor consideración del efecto que da la curvatura (Escalante et al., 2014).

Mina & Mercado (1995) Para determinar el efecto de curvatura se realiza la suma de cuadrados relacionando la diferencia entre el promedio de los puntos factoriales y centrales, denotado por:

$$SC_{curvatura} = n_F n_c (Y_F - Y_c)^2 / n_F + n_c \quad (55)$$

Donde:

Y_c = Promedio de la variable respuesta en puntos centrales.

Y_F = Promedio de la variable respuesta en puntos factoriales.

n_c, n_F = Son el número de puntos centrales y el número de puntos factoriales.

Si el valor de p es menor al 0.05, se define que al menos uno de los factores enlistados presenta ante la variable respuesta relación curva (Escalante et al., 2014).

Se considera el número total de réplicas a realizar dependiendo de los recursos que posee, tomando en cuenta que las réplicas son una variedad de corridas experimentales a las mismas condiciones tanto factores como niveles (Gutiérrez Pulido, 2012).

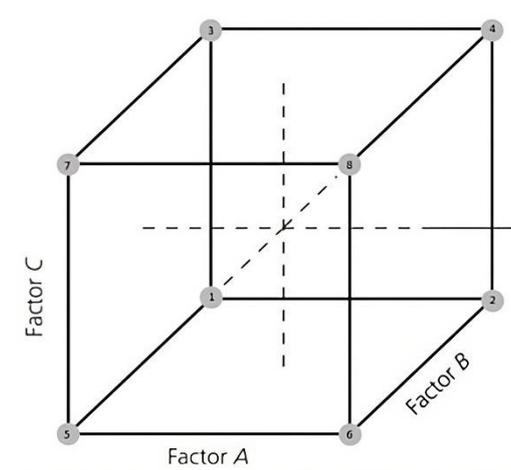


Figura 17. Diseño factorial para 2^k con tres factores y réplicas centrales.

Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.4.7 Cálculo de efectos

Mediante la matriz de efectos se logra calcular cuantitativamente cuanto afectan las variables independientes sobre el criterio de optimización del proceso, la matriz se presentan los experimentos y los efectos que se estimarán, los cuales se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$E = (\Sigma\gamma^+ - \Sigma\gamma^-) / (N/2)(r) \quad (56)$$

Donde:

- $\Sigma\gamma_+$ = Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel superior del factor o variable en estudio.
- $\Sigma\gamma_-$ = Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel inferior del factor o variable en estudio.
- N = Número de pruebas experimentales.
- r = Número de réplicas en el diseño.
- Siendo $r=1$ para el diseño factorial 2^k con réplicas en el punto central.

2.4.8 Principio de ANOVA para el diseño factorial de dos factores

El análisis de varianza permite comparar los conjuntos de resultados analíticos para definir si existe diferencia estadística significativa entre una muestra que ha sido analizada por diferentes métodos o una muestra realizada en diferentes lugares y distintos analistas (Montgomery & Verbeeck, 2004). El principio de ANOVA para un diseño factorial facilita la base de los aspectos de análisis estadístico, mediante la ayuda de la teoría estadística deriva los mecanismos para la elaboración y organización de las pruebas basadas en el modelo de respuesta (Montgomery & Verbeeck, 2004).

Tabla 4.

Las fórmulas simplificadas para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor- p .

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | F_0 | Valor p |
|------------------------|--|--------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Tratamientos | $SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$ | k-1 | $CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k-1}$ | $\frac{CM_{TRAT}}{M_E}$ | $P(F > F_0)$ |
| Error | $SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$ | N-k | $CM_E = \frac{SC_E}{N-k}$ | | |
| Total | $SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$ | N-1 | | | |

Fuente: (Gutiérrez Pulido, 2012)

2.4.8.1 Hipótesis

Las hipótesis que se encuentran asociadas con los diseños factoriales experimentales determinan si una prueba posee o carece de efecto, existen tres posibles efectos que se pueden investigar en una estructura de dos factores: factor A, factor B y factor de interacción (Montgomery & Verbeeck, 2004).

Hipótesis nula; H_0 : las medias de los grupos son iguales; $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K$

Hipótesis alternativa; H_1 : alguna de las medias es distinta; $\mu_i \neq \mu_j$

2.4.9 Formulación del modelo matemático

Para obtener un modelo matemático se debe determinar los efectos que resulten significativos en nuestra investigación, así al aplicar un diseño factorial a dos niveles tener un modelo matemático a escala lineal.

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{u=j=1}^k b_{uj} X_u X_j \quad (57)$$

Para poder valorar b_0 , b_j , b_{uj} se utilizará la formula matricial utilizada para la estimación de los coeficientes del modelo planteado:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (58)$$

Una vez obtenido el modelo matemático es importante decodificar dicho modelo, esto se lo deduce mediante fórmulas para la decodificación planteadas a continuación:

Termino independiente.

$$a_0 = b_0 - \sum_{j=1}^k b_j \epsilon_j + \sum_{ij=1}^k b_{ij} \epsilon_{ij} \quad i \neq j \quad (59)$$

Termino lineal.

$$a_j Z_j = \frac{j}{\Delta} - \sum_{\Delta} b_{Zj} \quad \frac{k_{ji} - 1}{\Delta} b_{Zij} \quad i \neq j \quad (60)$$

Termino interacción

$$a_{ji} Z_j Z_j = (b_{ji} / \Delta Z_j \Delta Z_j) \quad (61)$$

2.4.10 Análisis de residuales

Permite conocer cuan distanciados están las predicciones de los valores iniciales mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_i = Y - \hat{Y} \quad (62)$$

Siendo \hat{Y} = los valores predichos por el modelo, también se la conoce como \hat{Y} estimada o Y_{est} . Para encontrar \hat{Y} se emplea la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = (X)(B) \quad (63)$$

2.4.10.1 Técnicas gráficas para análisis de residuos

Una técnica gráfica de comprobación del supuesto de normalidad de los residuos es la gráfica de probabilidad, la cual sirve para visualizar si los datos obtenidos siguen una distribución lineal. No obstante, cabe recalcar que el ajuste de los puntos no debe ser del todo perfecto debido al análisis de varianza suelen presentarse moderadas y pequeñas desviaciones (Antony, 2003).

Para la comprobación del supuesto de varianza constante, el cual consiste en graficar los predichos contra los residuos, es decir \hat{Y}_{ij} vs ϵ_i . Al proyectarse los puntos se deben de distribuir de manera aleatoria en forma horizontal sin ningún patrón claro para ser considerado un supuesto de varianza constante (Gutiérrez Pulido, 2012).

Para que el supuesto de independencia se cumpla, al graficar el orden en el que se recopiló los datos versus el residuo al que corresponda, se debe detectar dentro de una banda horizontal los puntos en forma aleatoria.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 PRUEBAS EVALUATIVAS

El material muestreado corresponde a la mineralización de la mina La Rinconada, ubicada en Puno, Perú, es principalmente de oro y plata, aunque también se han encontrado depósitos de zinc, plomo, cobre y otros metales. Esta mina es conocida por ser una de las más altas del mundo, ubicada a más de 5,000 metros sobre el nivel del mar, y por la presencia de oro en forma de inclusiones dentro de los cristales de cuarzo. La mineralización de La Rinconada es considerada como de tipo epitermal de baja sulfuración y se encuentra en vetas que se extienden por varios kilómetros en la zona.

3.1.1 Caracterización química

Metodología para el análisis mineralógico de oro refractario en la COOPERATIVA MINERA CECOMIRL LTDA:

1. Muestreo:

- Realizar un muestreo representativo de la mineralización aurífera refractaria en diferentes áreas de la mina.
- Tomar muestras en diferentes profundidades para obtener una visión completa de la mineralización y su variabilidad.

2. Preparación de muestras:

- Triturar las muestras de mineral hasta obtener un tamaño de partícula adecuado para los ensayos.



- Realizar una reducción de tamaño para obtener una muestra representativa.
- Homogeneizar la muestra para minimizar las heterogeneidades.

3. Caracterización mineralógica:

- Realizar una caracterización mineralógica completa de las muestras utilizando técnicas como la microscopía óptica, SEM-EDS (microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva) y XRD (difracción de rayos X).
- Identificar las especies minerales presentes en la muestra y su distribución espacial.
- Determinar la asociación de minerales y su relación con los minerales refractarios.

4. Análisis de oro:

- Realizar ensayos gravimétricos y/o ensayos químicos para determinar la concentración de oro en las muestras.
- Aplicar técnicas como la cianuración directa y la lixiviación con cianuro a diferentes condiciones para evaluar la recuperación de oro.
- Evaluar la liberación de oro de los minerales refractarios utilizando técnicas como la lixiviación alcalina y la oxidación previa.

5. Análisis de minerales refractarios:

- Realizar ensayos de diagnóstico de lixiviación para determinar la respuesta de los minerales refractarios a diferentes condiciones de lixiviación.



- Utilizar técnicas de mineralogía automatizada para obtener información detallada sobre la composición mineralógica y la distribución de minerales refractarios en la muestra.
- Identificar los minerales refractarios presentes, como pirita, arsenopirita, telururos, etc., y evaluar su contribución a la refractariedad del oro.

6. Optimización del proceso:

- Utilizar los resultados de los análisis mineralógicos para diseñar un plan de tratamiento más eficiente y adecuado.
- Evaluar la viabilidad de técnicas como la flotación con polímeros orgánicos como depresores de materia carbonácea antes del proceso de cianuración.
- Realizar pruebas piloto a escala de laboratorio o planta para validar la efectividad del plan de tratamiento y optimizar la recuperación de oro.

Al seguir esta metodología, se podrá obtener una comprensión más precisa de la mineralogía y refractariedad del oro en la COOPERATIVA MINERA CECOMIRL LTDA, lo que permitirá tomar decisiones informadas en términos de procesamiento y maximizar la recuperación de oro.

3.1.2 Características del mineral

- Muestra aproximada de : 5.00 Kg
- Humedad de mineral promedio : 7.5 %
- Tamaño : 80 % - ¾”
- Ley de oro promedio : 7.067 g/Tm
- Densidad aparente : 2.4

Tabla 5.

Composición química del mineral.

| Composición Química | |
|---------------------|--------|
| Au g/T | 7.067 |
| Ag g/T | 221.07 |
| Cu g/T | 52 |

Fuente: (Arapa Pari, 2019)

3.2 CONTROL DE CALIDAD DEL PROCESO

Se tiene las siguientes técnicas de análisis utilizadas en la experimentación:

3.2.1 Preparación de muestras para análisis

- Consiste en la preparación mecánica de las muestras de mineral, con la finalidad de obtener la representatividad de la muestra a analizar, dependiendo de la forma física de la muestra se obrará por realizar las siguientes etapas de preparación según la granulometría: Chancado, molino, cuarteo, secado, pulverizado, homogenizado, codificación y embolsado.
- Se extiende una lona plastificada en el suelo de 1.5mt x 1.5mt previamente limpia. Se rolea la muestra 2 veces consecutivas para homogenizar, luego se pone el cuarteador en el medio y a través de una espátula grande; dos fracciones de la cuarta son tomadas y se le vacía al saco y nuevamente se rolea la muestra. Se pone la cuarta en el medio de la muestra y con una espátula chica se toma una fracción para testigo, otra fracción como contra muestra, otra fracción para bolsita (re-muestra) y de la última fracción se toma la muestra para analizar, de lo quede se toma 2 muestras de 500 gr para pruebas metalúrgicas si la muestra es sulfurada.



3.2.2 Determinación de metales

- Se usa el método de análisis por fusión y copelación, que consiste en coleccionar Au y Ag a través de una mezcla fundente a un regulo de plomo al ser reducido parte del PbO, componente de la mezcla fundente, el resto pasa a oxidar las impurezas metálicas y formar plumbatos con los óxidos metálicos. Los componentes de la mezcla fundente escorifican el material no valioso: el bórax disuelve la gran mayoría de óxidos metálicos y cantidades de sílice de la muestra, el carbonato de sodio actúa sobre la sílice de la muestra formando silicatos de sodio y la sílice actúa como escarificador del fierro formando el silicato correspondiente.
- El plomo del régulo formado es separado de la parte valiosa al ser oxidado y absorbido hasta en 90% junto con algunas impurezas metálicas por una copela de magnesita, y el resto es volatilizado como PbO o en forma de Pb₂O₃, en el proceso de copelación, obteniéndose un botón no oxidable formado por Au y Ag conocido como doré.
- La separación de estos metales se realiza mediante el ataque con ácido nítrico formando AgNO₃ en solución, quedando el oro metálico decantado en la misma, el cual es lavado con agua, luego es secado y calcinado.

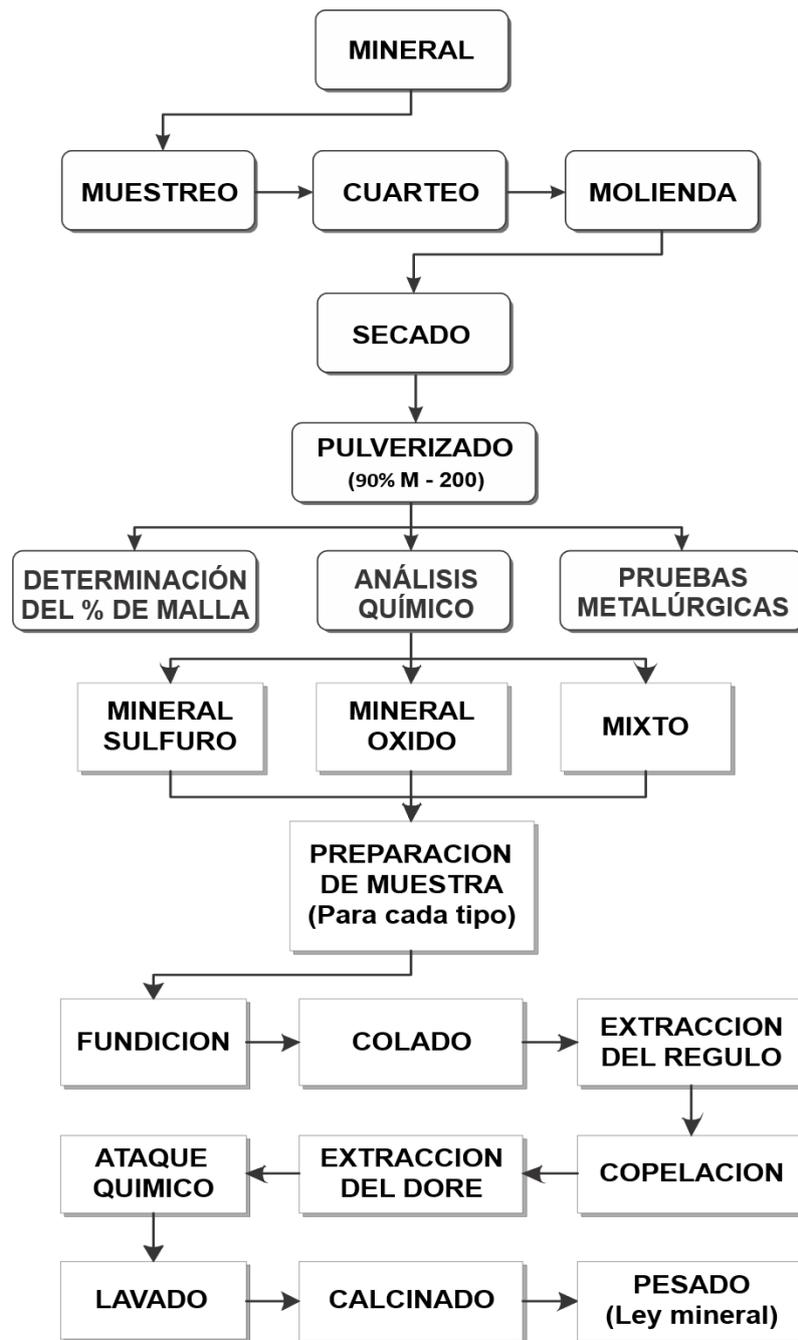


Figura 18. Diagrama de Bloques, proceso de análisis químico para Au.

3.2.3 Análisis de oro por ensayo al fuego

1. En los crisoles de arcilla se coloca la muestra para ser analizada.
 - Cabeza y relave 20 g
 - Concentrado 5 g
2. Seguir marcha de análisis de oro por ensayo al fuego. (Anexo A)



3.2.4 Determinación de oro en solución método CHIDDY

1. Se toma 200 ml de solución a analizar y se transfiere a un vaso de precipitación de 600 ml. (Marcha Anexo B)

3.2.5 Determinación del cianuro libre

1. El presente método establece el procedimiento para la determinación de concentración de NaCN en soluciones, para el tratamiento de minerales auríferos por el proceso de cianuración. (Marcha Anexo C)

3.2.6 Determinación de álcali libre (CaO) o protector

1. Después de titular el cianuro libre de una muestra, se adiciona al mismo vaso 1 o 2 gotas de del indicador fenolftaleína. (Marcha Anexo D)

3.3 MATERIAS PRIMAS PARA LAS PRUEBAS DE CIANURACIÓN

3.3.1 Minerales de oro

Las menas de oro presentan dos características generales:

- **Oro en menas refractarias:** Se denomina así a aquellas en que el oro, visible al microscopio dentro de los sulfuros metálicos (piritas y arsenopiritas), no se puede liberar por molienda. Es entonces que se hace más difícil la extracción del metal por la imposibilidad de liberación o accesibilidad al oro. Es decir, estas son las menas de oro que presentan dificultades y gastos excesivos en su cianuración.



3.3.2 Cianuro de sodio

El cianuro de sodio o cianuro sódico (NaCN): es la sal sódica del ácido cianhídrico (HCN). Se trata de un compuesto sólido e incoloro que hidroliza fácilmente en presencia de agua y dióxido de carbono para dar carbonato sódico y ácido cianhídrico:



En agua se disuelve con un pH básico.

- **Cianuro de sodio:** se prefiere usar NaCN por su mayor contenido de CN^- activo por unidad de peso: 53 % versus 40 % en el caso de KCN.

El $\text{Ca}(\text{CN})_2$ no es usado a pesar de tener buen porcentaje de ión CN^- activo: 56,5 % dado que suele comercializarse con un mayor contenido de impurezas que los otros casos.

El ión cianuro (CN^-) es en realidad el que tiene la acción de solvente, y la base alcalina (sodio, potasio) simplemente le da la estabilidad química al compuesto.

Aplicaciones

- El cianuro sódico se utiliza sobre todo en minería para extraer el oro y la plata de la roca madre.
- Analítica: Con nitrato de plata se forma un precipitado de cianuro de plata que se vuelve a disolver en presencia de exceso de cianuro.

Precauciones



- Con un defecto de sulfato de hierro(II) (FeSO_4) se forma tras acidular (cuidado - liberación de cianhídrico altamente tóxico) un precipitado de azul prusiano.
- Al cambio de pH por debajo de 9 y por encima de 11.5 forma el compuesto denominado **ACIDO CIANHIDRICO** que es un gas altamente venenoso y letal.

3.3.3 Cal

Óxido de calcio, de fórmula CaO , también se denomina cal viva. Este reactivo conocido también como la Cal es utilizado para regular el pH de la solución lixivante, así como otra sustancia, por ejemplo la cal apagada o cal muerta, que es hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En metalurgia, la cal se usa, para dar un pH adecuado en la cianuración de minerales de oro. El óxido de calcio reacciona violentamente con el agua haciendo que este alcance los 90°C . Es por ello que, si entra en contacto con seres vivos, deshidrata sus tejidos ya que estos están formados por agua. Por ejemplo, un ser humano está formado por un 75% de agua

3.3.4 Nitrato de Plomo

El compuesto químico nitrato de plomo (II) es una sal inorgánica de plomo y de ácido nítrico. Es un cristal incoloro o un polvo blanco, y un oxidante muy estable y fuerte. Al contrario que otras sales de plomo (II), es soluble en agua.

En metalurgia, la adición de nitrato de plomo reduce el efecto negativo de los minerales sulfurados, durante el proceso de cianuración. La adición de nitrato



de plomo a la pulpa, con o sin oxígeno, aumenta la cinética de disolución del oro y la plata con un efecto muy positivo sobre la recuperación de estos valores.

Esta conocida práctica es beneficiosa y ha sido usada desde los años 30's en Plantas de cianuración. Otros aditivos (Hg, Tl y Bi) reportaron tener efectos similares (Fink, Putman 1950, MacIntyre y Peck 1976, Chimenos y otros 1997). Aunque se sugirió que el plomo es precipitado sobre oro como plomo metálico (Rose y Newman 1898), los mecanismos involucrados estuvieron, hasta recientemente, en la etapa de hipótesis. El conocimiento del efecto del nitrato de plomo sobre las superficies de oro y de sulfuros es todavía deficiente. Jeffrey y otros (1996) realizaron un estudio electroquímico del efecto del plomo sobre el oro. Indirectamente, por observaciones electroquímicas, dedujeron que el plomo sobre la superficie de oro puede ocurrir de dos formas: la primera forma, creyendo ser plomo metal, mejoró la velocidad de disolución de oro; la segunda forma que se creyó ser algún tipo de película de hidróxido de plomo, disminuyó la velocidad de disolución de oro. Actualmente la práctica del uso del nitrato de plomo en Planta de Beneficio de minerales refractarios auríferos es muy beneficiosa sobre la recuperación de Au.

3.3.5 Materiales y equipos

3.3.5.1 Materiales

- Malla de la serie Tyler N° 200,100
- Espátulas de 3"
- Brochas de laboratorio
- Saquillos
- Plástico grueso



- Bureta
- Fiola de 500 ml
- Probeta 100ml
- Pipeta de 10 ml
- Vasos de precipitado de 100 ml
- Pissetas
- Papel filtro
- Frasco Ámbar: 1.5 L
- Cinta blanca para rotular y lapicero
- Botellas
- Matraces.

3.3.5.2 Equipos

- Balanza comercial
- Balanzas electrónicas de tres decimales
- Estufa de secado
- Rodillo para botellas
- Pulverizador
- Cuarteador
- Phmetro APERA PH400S
- Bomba de vacío.

3.3.5.3 Reactivos

- Cianuro de Sodio
- Yoduro de potasio (KI)



- Agua destilada 20 L
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Nitrato de Plata (AgNO_3)
- Nitrato de Plomo (II)

3.4 DISEÑO DE LAS PRUEBAS METALÚRGICAS

3.4.1 Preparación de muestras

Es complicado obtener muestras precisas de menas minerales debido a la falta de uniformidad de las mismas.

La heterogeneidad del mineral, así como la granulometría y la ley de diseminación del mineral, Por lo tanto, una muestra de 2 g será suficiente para una muestra de 100 μm de tamaño granular. Sin embargo, se necesitarán como mínimo dos toneladas de muestra para minerales de tamaño granular medio de 10 cm.

Para obtener una muestra verdaderamente representativa, se utilizan una variedad de cortadores o muestreadores.

3.4.1.1 El Método de Coneo y Cuarteo

El método de coneo y cuarteo es una técnica esencial en la preparación de muestras de laboratorio para garantizar que estas sean representativas y adecuadas para su análisis. Este proceso se utiliza en una variedad de campos, como la química, la geología, la metalurgia y la biología, entre otros. El objetivo principal del método de coneo y cuarteo es dividir una muestra grande y heterogénea en porciones más pequeñas y homogéneas, de manera que se preserve la representatividad de la muestra original. A continuación, se describen los pasos clave de este método:



Selección de la muestra: Se comienza eligiendo una cantidad suficiente de la muestra original que se va a analizar en el laboratorio. Esta muestra puede ser sólida, líquida o incluso gaseosa, dependiendo del tipo de análisis que se vaya a realizar.

- 1) **Coneo inicial:** Colocación de la muestra: La muestra se coloca en una superficie limpia y plana, como una bandeja de laboratorio o una lona.
- 2) **Formación del cono:** Usando una herramienta, como una espátula, se crea un montículo o cono con la muestra. Este cono se llama "cono de coneo".
- 3) **Cuarteo:** Selección de un cuadrante: Se selecciona uno de los cuatro cuadrantes del cono de coneo, generalmente el cuadrante superior izquierdo.
- 4) **Separación del cuadrante:** El cuadrante seleccionado se separa del cono principal con cuidado.
- 5) **Mezcla y reducción:** El cuadrante seleccionado se mezcla y se reduce aún más, generalmente dividiéndolo en dos partes más pequeñas. Esta acción se realiza para asegurarse de que la muestra siga siendo representativa.
- 6) **Descarte de los otros cuadrantes:** Los otros tres cuadrantes que no se seleccionaron originalmente se descartan. No se utilizan en los análisis posteriores.
- 7) **Repetición (opcional):** Si se necesita más muestra o se deben realizar análisis adicionales, se puede repetir el proceso de cuarteo



con una de las partes reducidas. Esto se hace de manera incremental hasta obtener la cantidad de muestra deseada.

El método de coneo y cuarteo es esencial para evitar sesgos y asegurarse de que las muestras sean verdaderamente representativas de la muestra original. Esta técnica se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones de laboratorio, como análisis químicos, pruebas de calidad de materiales, investigaciones geológicas y estudios biológicos, entre otros.

Es importante destacar que el método de coneo y cuarteo requiere cuidado y precisión para garantizar que las muestras sean representativas y que no se introduzcan errores en los análisis posteriores. Por lo tanto, sigue siendo una técnica fundamental en la preparación de muestras de laboratorio en diversas disciplinas científicas.

3.4.2 Parámetros constantes para las pruebas

3.4.2.1 Molienda

Los detalles de la operación de molienda se presentan en la Tabla 6, mientras que los datos obtenidos de la evaluación de la moliendabilidad a un tamaño de partícula de 250 micrómetros en un molino de 12" x 12" se encuentran en la Tabla 7. La Figura 19 ilustra la representación gráfica de la curva de moliendabilidad.

Tabla 6.

Condiciones de Molienda.

| CONDICIONES DE MOLIENDA | |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Peso de muestra del mineral | 1 Kg |
| Volumen de solución barren del molino | 1 L |
| Granulometría | 70 % -250 mallas |
| pH | 10.5 |
| Porcentaje de solidos | 32 % |
| Dosis de cal para ajustar el pH | 0.5 Kg/Tm - 1.0 kg/Tm |

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7.

Resultados de Tiempo de Molienda.

| Tiempo (min.) | % -250 mallas |
|---------------|---------------|
| 15 | 60.98 |
| 20 | 67.71 |
| 25 | 75.78 |
| 30 | 77.36 |

Fuente: Elaboración Propia.

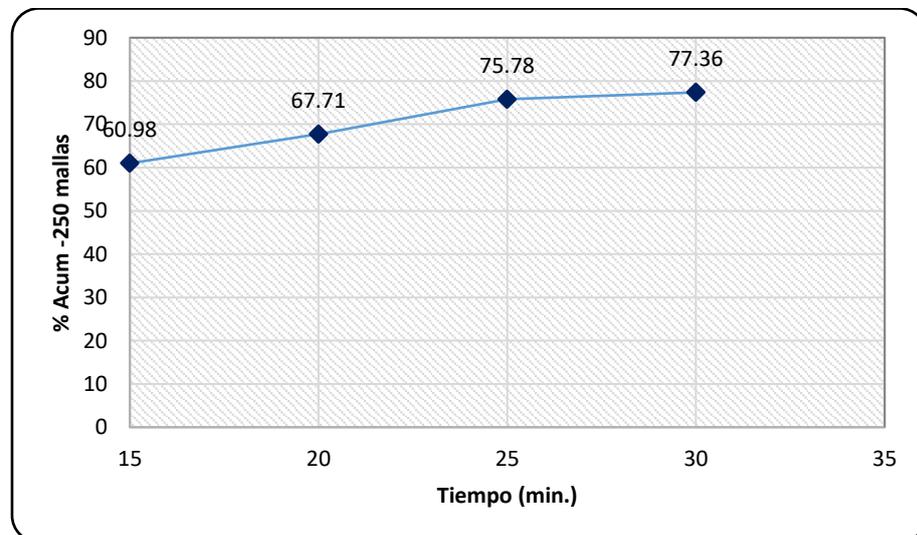


Figura 19. Tiempo de Molienda.

Fuente: Elaboración Propia.

3.5 PRUEBAS DE CIANURACIÓN:

EQUIPOS DE LIXIVIACIÓN Y CONSIDERACIONES DE OPERACIÓN

Peso de muestra de mineral : 1 Kg



| | |
|--|---|
| Dilución (Líquido: Sólido) | : 2:1 |
| Volumen de Solución Barren | : 2 L |
| Granulometría | : 70 % -250 mallas |
| Densidad g/L | : 1250 |
| Sólidos % | : 32 |
| pH a mantener | : 10.5 - 11.5 |
| Reactivo para ajustar el pH | : Cal |
| Dosis de Cal | : Depende de la cantidad y tipo de cianicidas |
| Adición de Nitrato de Plomo (gr/ton) | : 150 - 250 |
| Tiempo de Agitación | : 72 horas |
| Mecanismo de Agitación | : Rodillos de Acero, cubiertos por Jebe |
| Diámetro (cm.) | : 6.37 |
| Largo (cm.) | : 120 |
| Espacio entre centros de los Rodillos (cm.) | : 22.5 |
| Velocidad (RPM) | : 25 |
| NaCN (g/L) | : 1 - 2 |

3.5.1 Cianuración en botella

La cianuración en botella es un procedimiento utilizado en el ámbito de la metalurgia extractiva y la minería para evaluar la capacidad de un mineral o concentrado de oro y plata para ser procesado mediante la técnica de cianuración. Este método se utiliza principalmente en la etapa de exploración y evaluación de yacimientos minerales antes de la implementación de procesos a mayor escala.



El proceso de cianuración en botella implica la realización de pruebas en pequeña escala, generalmente en el laboratorio, para determinar cómo responde el mineral o concentrado a la lixiviación con cianuro. Aquí hay una descripción general de cómo funciona este método:

- 1) **Preparación de muestras:** Se toman muestras representativas del mineral o concentrado que se va a evaluar. Estas muestras se trituran y se reducen de tamaño para obtener partículas homogéneas que se utilizarán en las pruebas.
- 2) **Ensayos en botella:** Las muestras preparadas se colocan en botellas de laboratorio junto con una solución de cianuro. Las condiciones de la prueba, como la concentración de cianuro, el pH, la temperatura y el tiempo, se controlan cuidadosamente para simular las condiciones que se encontrarían en una planta de procesamiento a mayor escala.
- 3) **Lixiviación:** Durante un período de tiempo determinado, la solución de cianuro reacciona con el mineral o concentrado de oro y plata. Durante esta etapa, se monitorean varios parámetros, como la velocidad de disolución del oro y la plata, la concentración de cianuro en la solución y otros factores relevantes.
- 4) **Análisis de resultados:** Después de la lixiviación, se analizan los resultados para determinar qué porcentaje de oro y plata se disolvió exitosamente en la solución de cianuro. Esto proporciona información valiosa sobre la capacidad del mineral para ser procesado económicamente a escala industrial.
- 5) **Optimización:** A partir de los resultados de las pruebas en botella, los ingenieros y metalurgistas pueden realizar ajustes en las condiciones de procesamiento para mejorar la eficiencia y la recuperación del oro y la plata. Esto puede incluir



modificaciones en las concentraciones de cianuro, el pH o el tiempo de lixiviación.

La cianuración en botella es una etapa fundamental en el desarrollo de proyectos mineros, ya que permite obtener datos cruciales sobre la viabilidad económica de la extracción de oro y plata de un yacimiento específico. También se utiliza para evaluar la influencia de factores geológicos y metalúrgicos en el proceso de cianuración antes de invertir en una planta de procesamiento a mayor escala. Las leyes del mineral son: 7.067 g Au/TM, que es la ley de cabeza para las pruebas de cianuración en botella.

3.5.2 Codificación de las botellas

En el laboratorio Metalúrgico, disponemos de un total de 11 botellas que se utilizan en diversas pruebas. Después de determinar el peso inicial de cada una de ellas, se procede a asignarles un código que refleja el progreso de las pruebas de laboratorio. En nuestro caso, hemos asignado códigos que van desde P-01 hasta P-11. Además, se registra el peso de la muestra de mineral y la cantidad de agua añadida para simular la pulpa que se utiliza en los tanques de cianuración. Esta información se etiqueta de manera codificada en cada botella, como se ilustra en el esquema siguiente:

| | |
|--------------------|----------------|
| P-01 | (Código) |
| 4156.12 g | (Peso total) |
| T = 845.3 g | (Tara Botella) |



3.5.3 Condiciones de operación de las pruebas

En las pruebas, se etiquetan las botellas de acuerdo con un sistema de codificación y se organizan de acuerdo con la tabla correspondiente para su posterior análisis en el laboratorio Metalúrgico.

Al comenzar la prueba, se deben tener en cuenta los parámetros previamente establecidos. Se utiliza una granulometría del 70% pasante por malla -250, y se consideran las siguientes pautas:

- Si el peso del mineral varía, manteniendo constante la relación entre sólidos y líquido (2:1), se ajusta la dilución mediante la adición de la cantidad necesaria de agua proveniente del exceso de la molienda.
- Para ajustar la cantidad de cal, se mide el pH inicial y se procede a modificarlo para que se encuentre dentro del rango deseado. Esto se logra añadiendo cal para asegurar que, al agregar el cianuro, no se produzca una reacción que convierta el cianuro en ácido cianhídrico, lo cual sería perjudicial para la prueba.
- Al inicio de la cianuración, se añade cianuro en solución (en concentraciones de 1 g/L a 2 g/L) y nitrato de plomo. Posteriormente, las botellas se colocan en un agitador de rodillos.

3.5.4 Monitoreo de las botellas

De acuerdo con los parámetros previamente establecidos, se monitorean las botellas en cualquier momento necesario, registrando los datos obtenidos en una hoja de control de botellas. Estos datos incluyen el contenido de cianuro libre



y el pH. Luego, se permite que la muestra se sedimente y se procede a decantarla para obtener una muestra de solución que será sometida a los siguientes análisis:

- Se toma una cantidad de 10 ml de la solución y se lleva al laboratorio de análisis químico para determinar el contenido de oro.
- Otros 5 ml de la solución se utilizan para realizar una titulación con nitrato de plata y así determinar el contenido de cianuro libre en la muestra.

El proceso de titulación se lleva a cabo de la siguiente manera:

- 1) Se prepara una solución estándar de nitrato de plata utilizando agua destilada con una concentración de 0.025 Normal, lo que equivale a 4.3333 gramos por litro.
- 2) Se prepara una solución de indicador de yoduro de potasio utilizando agua destilada con una concentración del 5 % en peso por volumen.
- 3) Se mide una cantidad de 5 ml de la solución de cianuro.
- 4) Se agregan 2 gotas del indicador a la solución.
- 5) Se procede a titular la solución con la solución de nitrato de plata hasta que cambia de color, pasando de limonada, lo que marca el punto final de la titulación. Se registra el volumen gastado (G1) para determinar el porcentaje de cianuro libre en la muestra.

3.5.5 Ajuste del volumen

Después de completar el procedimiento en cada una de las botellas y haber añadido el cianuro de sodio para restablecer las condiciones iniciales, así como



ajustar el pH y la cantidad de agua retirada, las botellas se ubican en el agitador de rodillos.

3.5.6 Final de la prueba

La prueba finaliza al cumplirse el tiempo establecido en el diseño del proceso, luego se procede a filtrar y posteriormente secar la muestra. Después, se realiza el análisis de sólidos para determinar la recuperación en cada una de las botellas.

3.6 DESCRIPCION DE LA PRUEBA

Las pruebas de cianuración en botellas se llevan a cabo con el objetivo de obtener información preliminar acerca del consumo total de reactivos en el proceso de lixiviación, como el NaCN y el CaO. También se buscan verificar la forma en que el uso de nitrato de plomo, en diferentes cantidades, puede interferir en el proceso. Además, se pretende predecir el porcentaje de recuperación de oro. Es fundamental que las pruebas metalúrgicas logren una recuperación superior al 50% en un plazo de 24 horas.

Para las pruebas en botella, se parte de un mineral homogenizado y cuarteado, reduciéndolo a una granulometría del 75% en mallas de 250. Se realiza un control a intervalos regulares, cada 4, 12, 24, 48 y 72 horas, con el fin de determinar la concentración de cianuro libre mediante métodos volumétricos. Luego, se procede a filtrar y analizar la solución rica para determinar el porcentaje de recuperación.

Cada prueba se lleva a cabo en duplicado y se siguen los parámetros previamente establecidos, que son los siguientes:

- Porcentaje de sólidos: 32.10% (dilución 2:1)
- Concentración de CN⁻: 1 g/L - 2 g/L



- Tiempo de agitación: 72 horas
- Peso de mineral seco: 1000 kg
- Cantidad de agua: 2000 ml

Se mide el pH inicial, que debe ser de 7.0, y se ajusta agregando cal hasta alcanzar un pH de 10.5 o 11.5. Luego, se agrega el NaCN con la concentración requerida y se procede a girar las botellas sobre los rodillos, controlando el consumo de cianuro en los intervalos de tiempo establecidos.

3.6.1 Procedimiento y control de botellas

Los controles se realizan a intervalos de 4, 12, 24, 48 y 72 horas, siguiendo estos procedimientos:

- 1) Se toma una muestra de 5 ml de la solución cianurada, se filtra y se analiza para determinar el contenido de oro (Au).
- 2) Se lleva a cabo la determinación de cianuro libre mediante una titulación, donde se titula 10 ml de la muestra con AgNO_3 y se utiliza ioduro de Potasio (IK) como indicador.
- 3) Se mide el pH de la solución.
- 4) Se calcula la cantidad de cianuro remanente para determinar la cantidad de cianuro que debe ser agregada.
- 5) Se ajusta el pH a 11.5 utilizando cal y se repone la solución retirada con agua.
- 6) Luego, se coloca la botella en el rodillo para continuar con el proceso de cianuración.

- 7) Al concluir la prueba en un período de 72 horas, se extrae la mayor cantidad posible de solución para someterla a análisis mediante la prueba Chiddy.
- 8) El material sólido restante es retirado y lavado para posteriormente ser pulverizado y analizado.

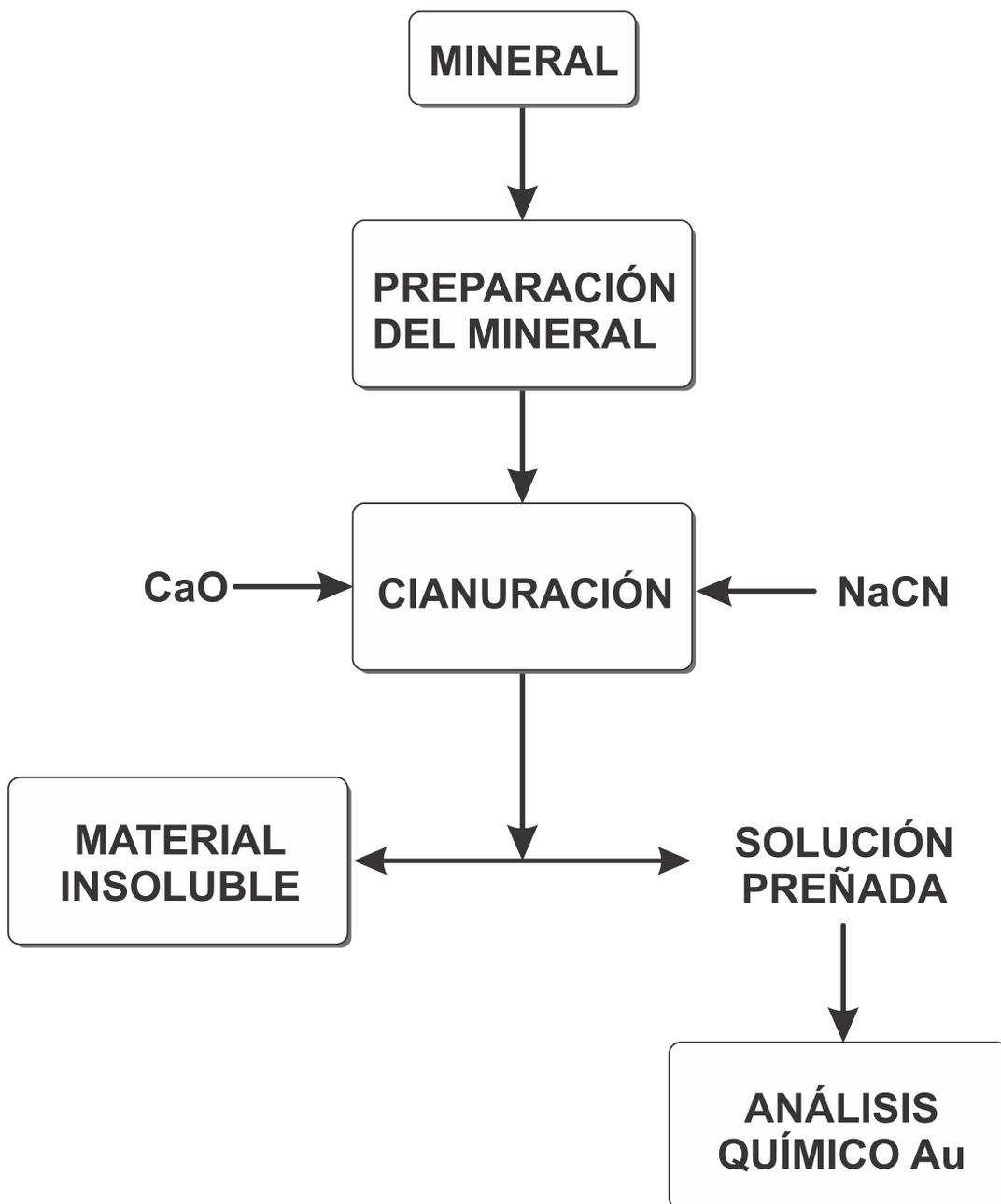


Figura 20. Flujograma de cianuración directa experimental.



3.7 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

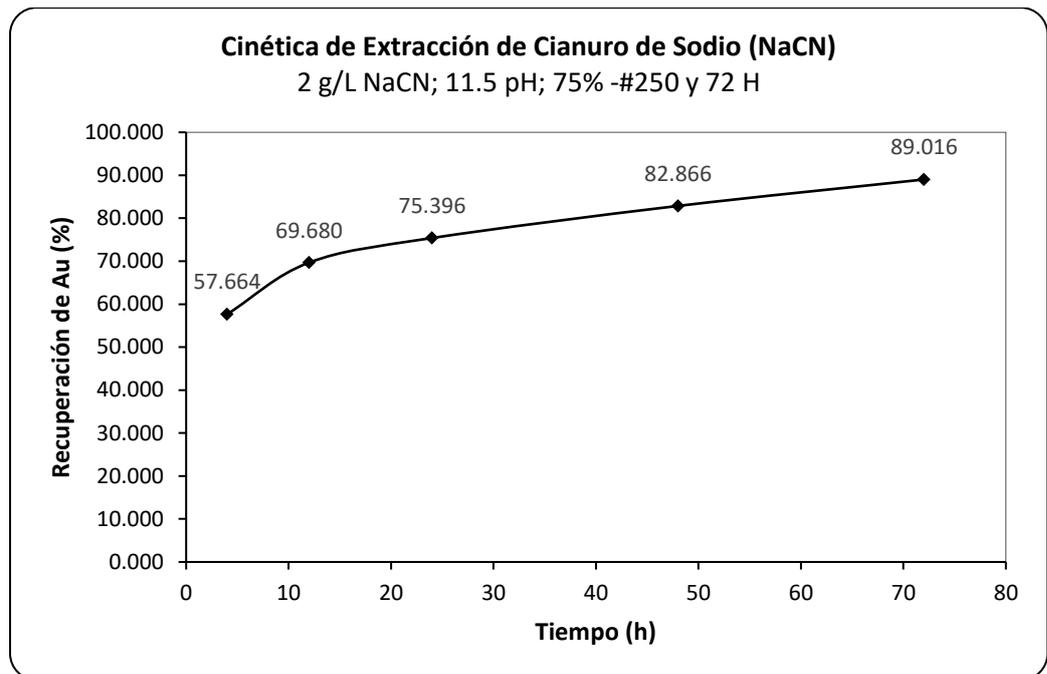
3.7.1 Pruebas de cianuración

3.7.1.1 Prueba N° 00 (P-00) (Sin adición de $Pb(NO_3)_2$)

| PARAMETROS DE PRUEBA: | |
|-----------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| NaCN(g) | 2.0 |
| pH | 11.5 |
| CaO (g) | 1.70 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 04/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.021 | 4.042 | 57.664 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.442 | 4.885 | 69.680 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.643 | 5.285 | 75.396 |
| Solución 48 h | 2.00 | 2.905 | 5.809 | 82.866 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.120 | 6.240 | 89.016 |
| Relave | | 0.770 | 0.770 | 10.984 |
| Cabeza calc. | | 7.010 | 7.010 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 89.104 | | | |
| % Recuperación Calculada | 89.016 | | | |



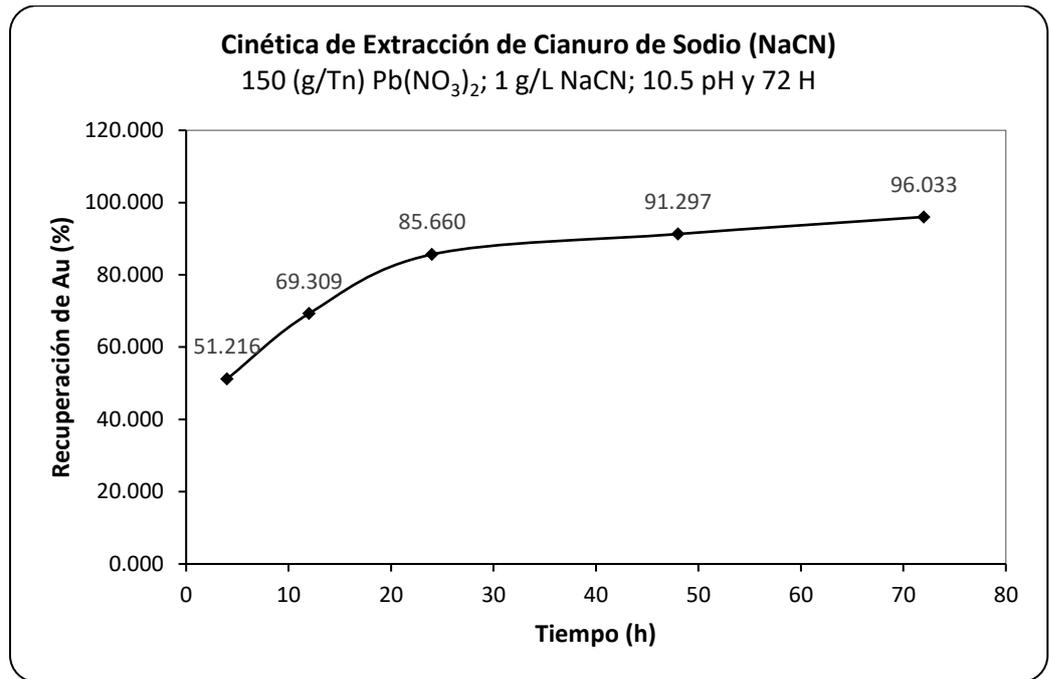
3.7.1.2 Prueba N° 01 (P-01)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|---|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| Pb(NO₃)₂ (g) | 150 |
| NaCN (g) | 1.0 |
| pH | 10.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 1.807 | 3.615 | 51.216 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.446 | 4.892 | 69.309 |
| Solución 36 h | 2.00 | 3.023 | 6.046 | 85.660 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.222 | 6.444 | 91.297 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.389 | 6.778 | 96.033 |
| Relave | | 0.280 | 0.280 | 3.967 |
| Cabeza calc. | | 7.058 | 7.058 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 96.038 | | | |
| % Recuperación Calculada | 96.033 | | | |



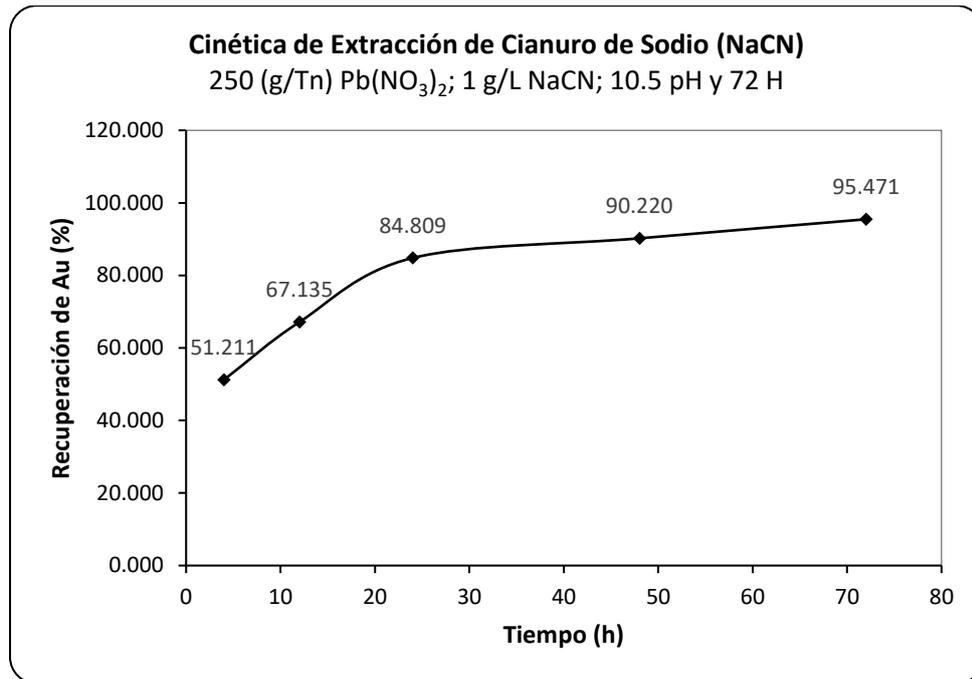
3.7.1.3 Prueba N° 02 (P-02)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|----------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 250 |
| NaCN (g) | 1.0 |
| pH | 10.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 1.809 | 3.618 | 51.211 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.372 | 4.743 | 67.135 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.996 | 5.992 | 84.809 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.187 | 6.374 | 90.220 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.373 | 6.745 | 95.471 |
| Relave | | 0.320 | 0.320 | 4.529 |
| Cabeza calc. | | 7.065 | 7.065 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.472 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.471 | | | |



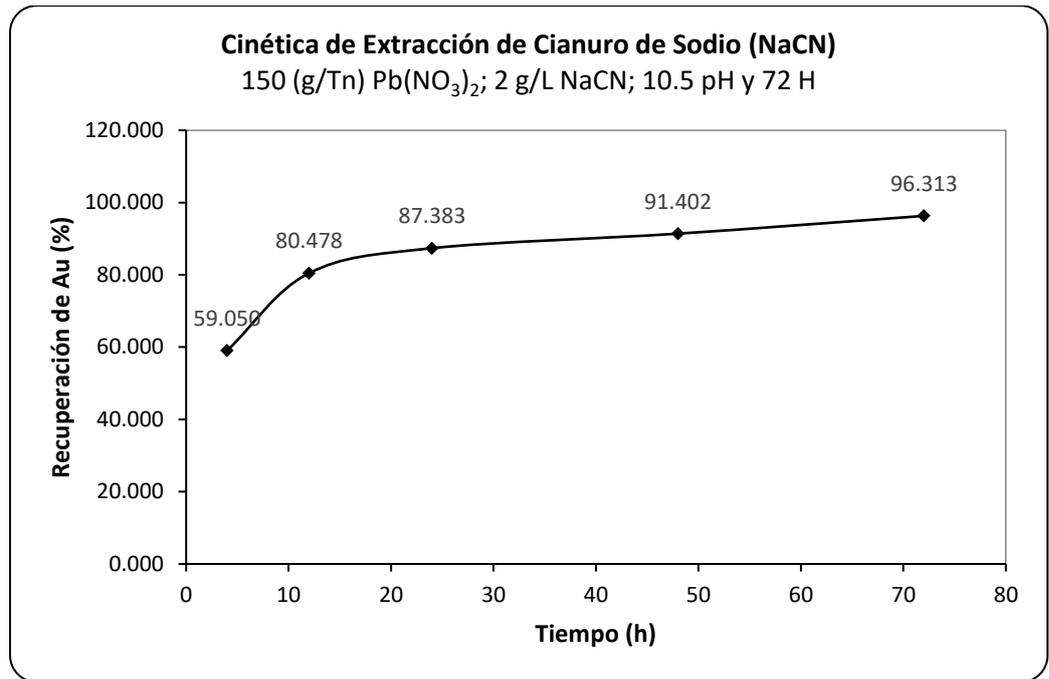
3.7.1.4 Prueba N° 03 (P-03)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75%-#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| Pb(NO ₃) ₂ (g) | 150 |
| NaCN (g) | 2.0 |
| pH | 10.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.082 | 4.164 | 59.050 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.837 | 5.675 | 80.478 |
| Solución 36 h | 2.00 | 3.081 | 6.162 | 87.383 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.223 | 6.445 | 91.402 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.396 | 6.791 | 96.313 |
| Relave | | 0.260 | 0.260 | 3.687 |
| Cabeza calc. | | 7.051 | 7.051 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 96.321 | | | |
| % Recuperación Calculada | 96.313 | | | |



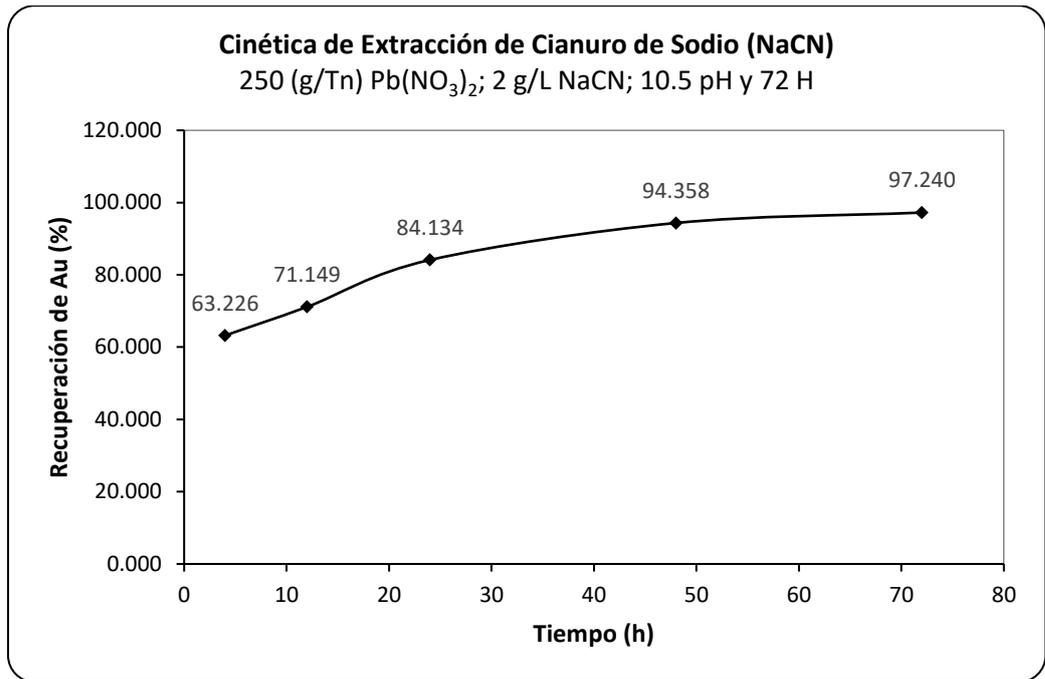
3.7.1.5 Prueba N° 04 (P-04)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 250 |
| NaCN (g) | 2.0 |
| pH | 10.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.233 | 4.466 | 63.226 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.513 | 5.026 | 71.149 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.972 | 5.943 | 84.134 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.333 | 6.666 | 94.358 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.435 | 6.869 | 97.240 |
| Relave | | 0.195 | 0.195 | 2.760 |
| Cabeza calc. | | 7.064 | 7.064 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 97.241 | | | |
| % Recuperación Calculada | 97.240 | | | |



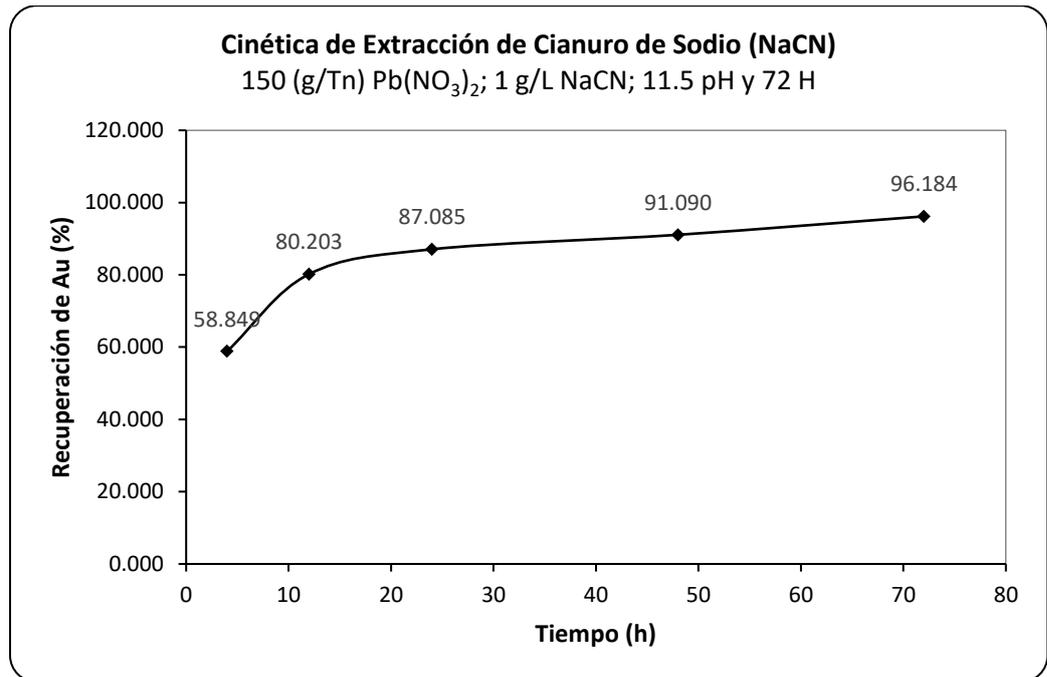
3.7.1.6 Prueba N° 05 (P-05)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 150 |
| NaCN (g) | 1.0 |
| pH | 11.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.082 | 4.164 | 58.849 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.837 | 5.675 | 80.203 |
| Solución 36 h | 2.00 | 3.081 | 6.162 | 87.085 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.223 | 6.445 | 91.090 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.403 | 6.806 | 96.184 |
| Relave | | 0.270 | 0.270 | 3.816 |
| Cabeza calc. | | 7.076 | 7.076 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 96.179 | | | |
| % Recuperación Calculada | 96.184 | | | |



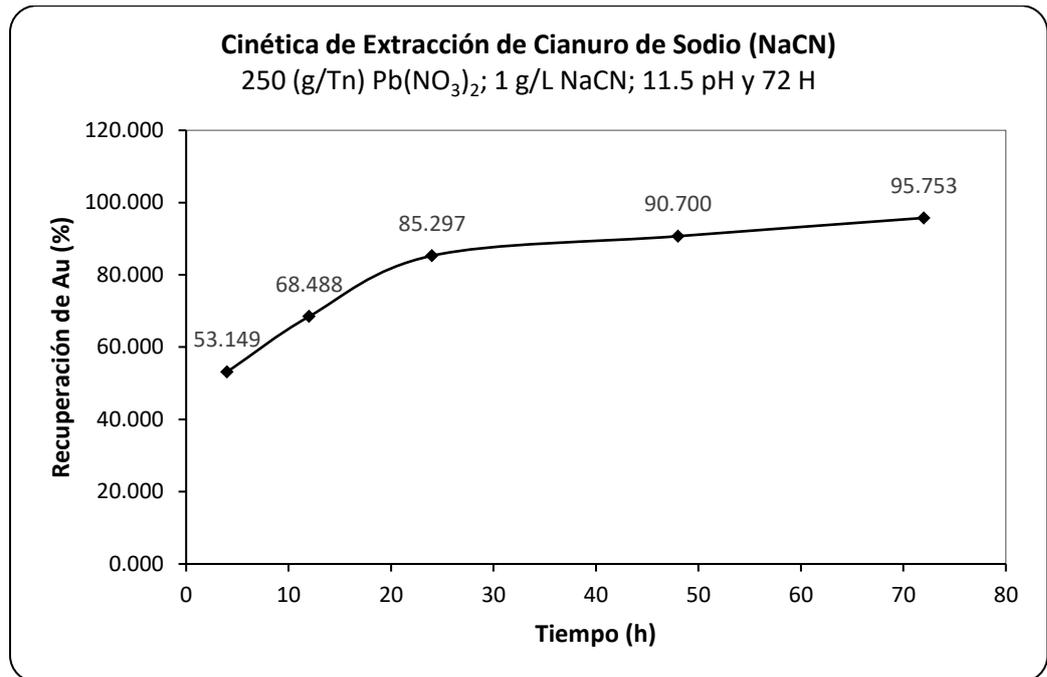
3.7.1.7 Prueba N° 06 (P-06)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 250 |
| NaCN (g) | 1.0 |
| pH | 11.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 1.877 | 3.754 | 53.149 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.419 | 4.837 | 68.488 |
| Solución 36 h | 2.00 | 3.012 | 6.025 | 85.297 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.203 | 6.406 | 90.700 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.382 | 6.763 | 95.753 |
| Relave | | 0.300 | 0.300 | 4.247 |
| Cabeza calc. | | 7.063 | 7.063 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.755 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.753 | | | |



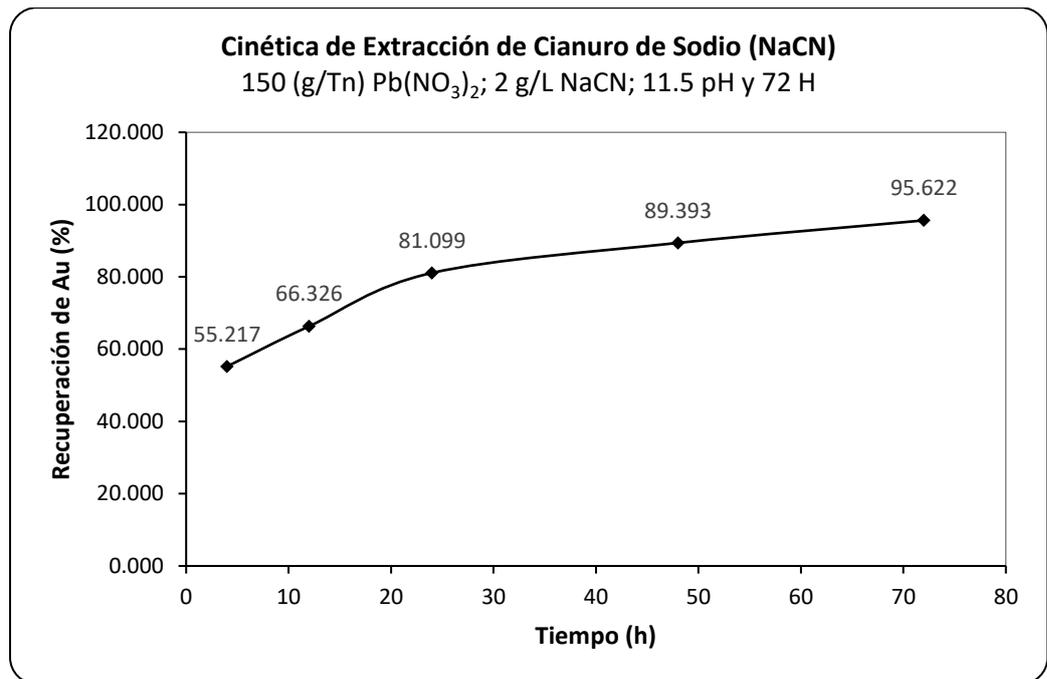
3.7.1.8 Prueba N° 07 (P-07)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75%-#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 150 |
| NaCN (g) | 2.0 |
| pH | 11.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 1.955 | 3.909 | 55.217 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.348 | 4.696 | 66.326 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.871 | 5.742 | 81.099 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.165 | 6.329 | 89.393 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.385 | 6.770 | 95.622 |
| Relave | | 0.310 | 0.310 | 4.378 |
| Cabeza calc. | | 7.080 | 7.080 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.613 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.622 | | | |



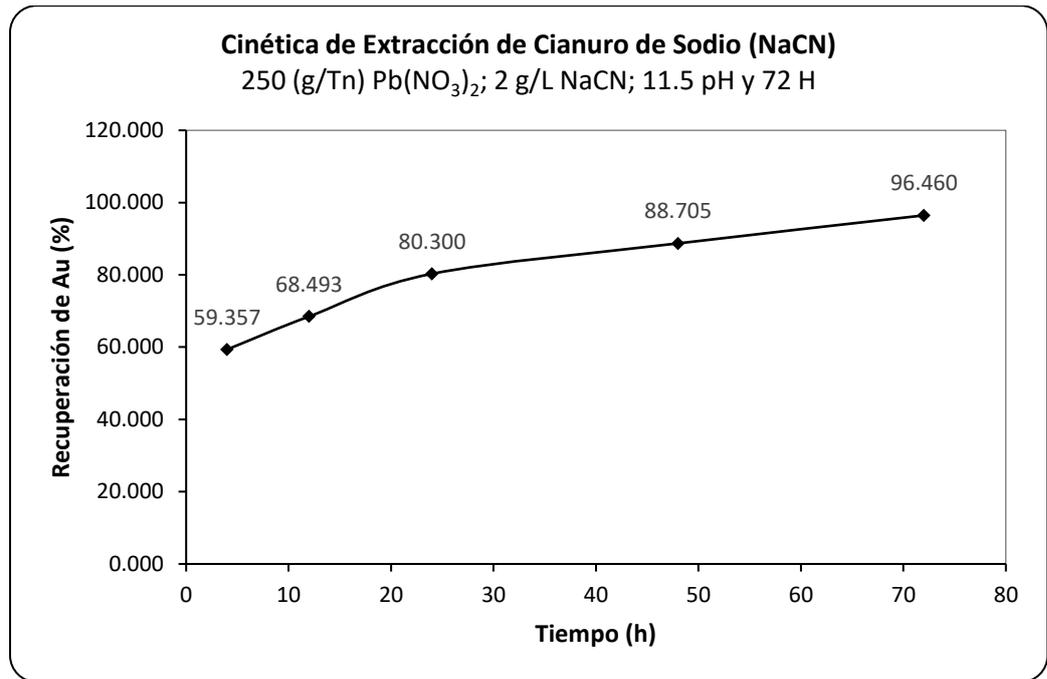
3.7.1.9 Prueba N° 08 (P-08)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|------------------------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 250 |
| NaCN (g) | 2.0 |
| pH | 11.5 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.096 | 4.192 | 59.357 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.419 | 4.837 | 68.493 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.836 | 5.671 | 80.300 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.132 | 6.265 | 88.705 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.406 | 6.813 | 96.460 |
| Relave | | 0.250 | 0.250 | 3.540 |
| Cabeza calc. | | 7.063 | 7.063 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 96.462 | | | |
| % Recuperación Calculada | 96.460 | | | |



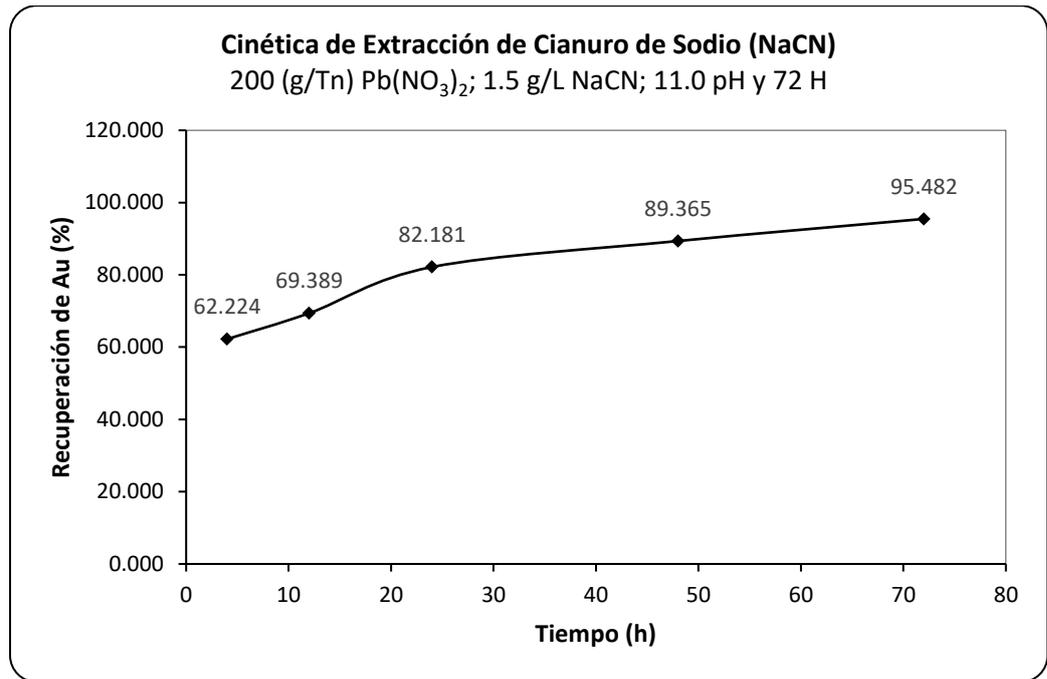
3.7.1.10 Prueba N° 09 (P-09)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|----------------------|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| $Pb(NO_3)_2$ (g) | 200 |
| NaCN (g) | 1.5 |
| pH | 11.0 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.203 | 4.407 | 62.224 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.457 | 4.914 | 69.389 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.910 | 5.820 | 82.181 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.165 | 6.329 | 89.365 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.381 | 6.762 | 95.482 |
| Relave | | 0.320 | 0.320 | 4.518 |
| Cabeza calc. | | 7.082 | 7.082 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.472 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.482 | | | |



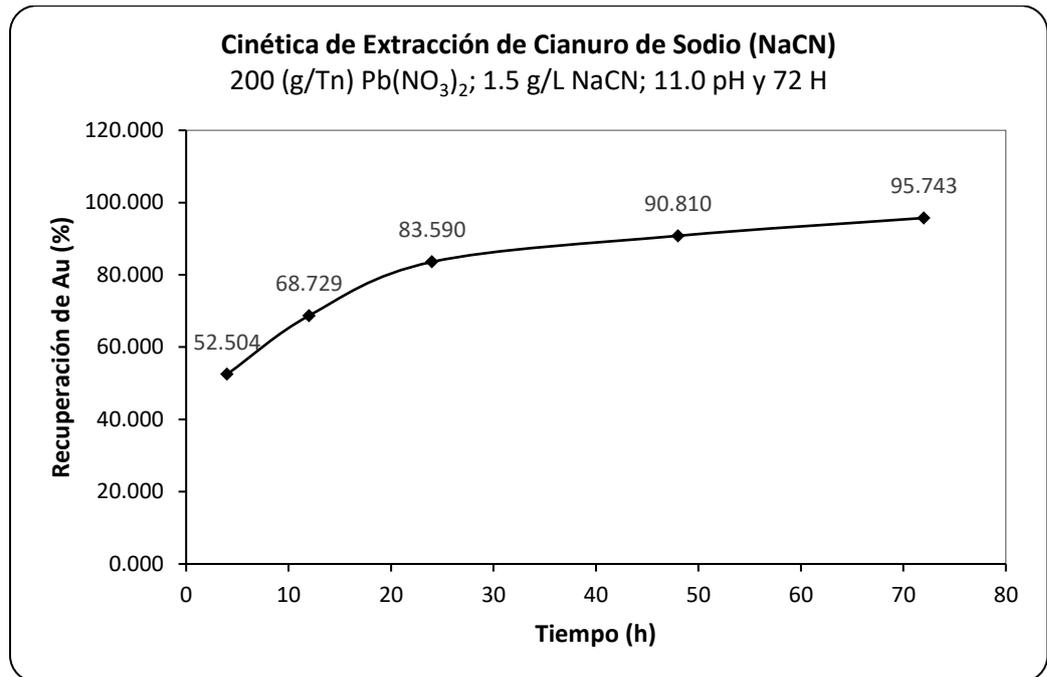
PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|---|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| Pb(NO₃)₂ (g) | 200 |
| NaCN (g) | 1.5 |
| pH | 11.0 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

3.7.1.11 Prueba N° 10 (P-10)

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (mg) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 1.850 | 3.700 | 52.504 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.422 | 4.844 | 68.729 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.946 | 5.891 | 83.590 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.200 | 6.400 | 90.810 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.374 | 6.748 | 95.743 |
| Relave | | 0.300 | 0.300 | 4.257 |
| Cabeza calc. | | 7.048 | 7.048 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.755 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.743 | | | |



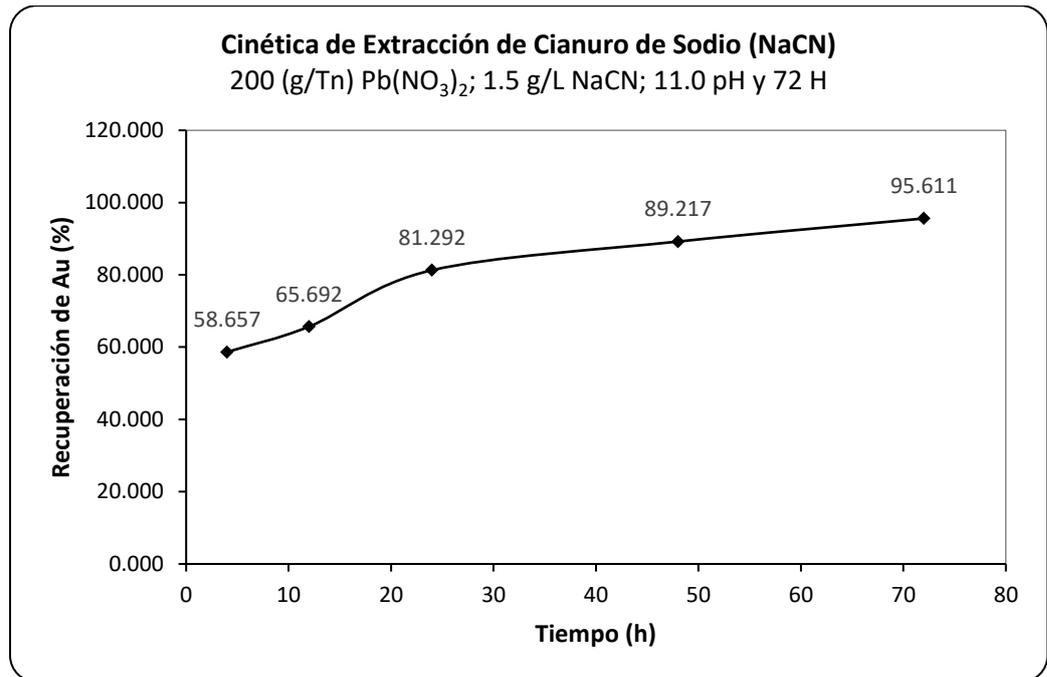
3.7.1.12 Prueba N° 11 (P-11)

PARAMETROS DE PRUEBA:

| | |
|---|------------|
| Mineral: | Sulfuro |
| Granulometría: | 75% -#250 |
| Acidez del mineral: | 6 |
| Peso Mineral (Kg): | 1 |
| Agua (L): | 2 |
| FNaCN(ppm): | 1000 |
| Pb(NO₃)₂ (g) | 200 |
| NaCN (g) | 1.5 |
| pH | 11.0 |
| CaO (g) | 1.75 |
| Tiempo de agitación: | 72 |
| Fecha de inicio: | 09/05/2023 |
| Hora | 9:00 a. m. |

RESULTADOS % DE RECUPERACION DE ORO:

| Mineral | Peso o volumen | Ley Au(ppm) | Au (g) | Recuperación de Au (%) |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------|------------------------|
| Cabeza | | 7.067 | 7.067 | 100.000 |
| Solución 12 h | 2.00 | 2.071 | 4.143 | 58.657 |
| Solución 24 h | 2.00 | 2.320 | 4.639 | 65.692 |
| Solución 36 h | 2.00 | 2.871 | 5.741 | 81.292 |
| Solución 48 h | 2.00 | 3.150 | 6.301 | 89.217 |
| Solución 72 h | 2.00 | 3.376 | 6.753 | 95.611 |
| Relave | | 0.310 | 0.310 | 4.389 |
| Cabeza calc. | | 7.063 | 7.063 | 100.000 |
| % Recuperación Ensayada | 95.613 | | | |
| % Recuperación Calculada | 95.611 | | | |



3.7.2 Observaciones

- En todos los gráficos que representan las pruebas, es evidente en las curvas de extracción que durante las primeras dieciocho horas de lixiviación a una concentración específica de CN^- , la curva alcanza un punto óptimo en comparación con las otras concentraciones.
- A medida que la lixiviación progresa, las curvas se vuelven más similares y convergen hacia un punto final de extracción donde todas muestran extracciones cercanas.
- En los gráficos se puede notar las curvas de extracción correspondientes a la plata, donde a medida que la concentración de cianuro aumenta, la velocidad de extracción tiende a incrementarse también.

3.7.3 Resultados de las pruebas de cianuración

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con las variables y sus respectivos niveles se muestran en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8.

Porcentaje extracción de oro y consumo de reactivos.

| Código de Prueba | Cabeza Au (g/Tn) | Relave Au (g/Tn) | % Recuperación Au | Pb (NO ₃) ₂ (g/Tn) | NaCN (g/L) | pH |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|---|------------|------|
| P-01 | 7.067 | 0.280 | 96.033 | 150 | 1 | 10.5 |
| P-02 | 7.067 | 0.320 | 95.471 | 250 | 1 | 10.5 |
| P-03 | 7.067 | 0.260 | 96.313 | 150 | 2 | 10.5 |
| P-04 | 7.067 | 0.195 | 97.240 | 250 | 2 | 10.5 |
| P-05 | 7.067 | 0.270 | 96.184 | 150 | 1 | 11.5 |
| P-06 | 7.067 | 0.300 | 95.753 | 250 | 1 | 11.5 |
| P-07 | 7.067 | 0.310 | 95.622 | 150 | 2 | 11.5 |
| P-08 | 7.067 | 0.250 | 96.460 | 250 | 2 | 11.5 |
| P-09 | 7.067 | 0.320 | 95.482 | 200 | 1.5 | 11 |
| P-10 | 7.067 | 0.300 | 95.743 | 200 | 1.5 | 11 |
| P-11 | 7.067 | 0.310 | 95.611 | 200 | 1.5 | 11 |

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los resultados iniciales presentados en la Tabla 8, es evidente que, bajo condiciones idénticas en cuanto a la concentración de Nitrato de Plomo, concentración de cianuro y pH, se logran tasas de recuperación de oro más altas cuando se utilizan concentraciones variables de Nitrato de Plomo. A partir de esta tabla, es posible calcular los efectos correspondientes a cada una de las variables para evaluar la influencia de estas en la recuperación de oro, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Efecto = \frac{Sumatoria\ de\ Valores(+1) + Sumatoria\ de\ Valores(-1)}{Numero\ de\ variables} \quad (42)$$

Se tiene entonces:



$$Pb(NO_3)_2 = \frac{95.471 + 97.240 + 95.753 + 96.460 - 96.033 - 96.313 - 96.184 - 95.622}{4} = 0.193$$

$$NaCN = \frac{96.313 + 97.240 + 95.622 + 96.460 - 96.033 - 95.471 - 96.184 - 95.753}{4} = 0.548$$

$$pH = \frac{96.184 + 95.753 + 95.622 + 96.460 - 96.033 - 95.471 - 96.313 - 97.240}{4} = -0.259$$

Tabla 9.

Efecto de las variables sobre el porcentaje de recuperación de oro.

| Variables | Efecto (%) | Niveles | |
|---|---------------|---------|--------|
| | | Mínimo | Máximo |
| Z₁ Nitrato de plomo (g/Tn) | 0.193 | 150 | 250 |
| Z₂ Concentración de Cianuro (g/L) | 0.548 | 1 | 2 |
| Z₃ pH | -0.259 | 10.50 | 11.50 |

Fuente: Elaboración Propia

El impacto cuantitativo de las principales variables involucradas en el proceso de cianuración de oro se encuentra resumido en la Tabla 9, donde se destaca que la Concentración de Cianuro de Sodio tiene la mayor influencia, mientras que la adición de Nitrato de Plomo tiene la influencia mínima. Estos valores se derivaron de los cálculos correspondientes basados en el diseño experimental. Además, se pueden apreciar los efectos individuales de cada variable, siendo la Concentración de Cianuro de Sodio la más influyente en las pruebas realizadas. Un cambio de 1 a 2 (g/L) en esta variable resulta en un efecto significativo del 0,548%, lo que sugiere que una concentración insuficiente de cianuro no permitirá alcanzar la máxima recuperación de oro. Por otro lado, el valor del Nitrato de Plomo produce un efecto leve del 0,193% en los niveles de 150 a 250 g/Tn, lo que indica la posibilidad de aumentar la recuperación de oro mediante pruebas adicionales con este reactivo.

3.7.4 Análisis resultado de pruebas de cianuración en botella

Tabla 10.

Comparación de porcentaje de Recuperación de oro, con y sin adición Nitrato de Plomo.

| Tiempo (h) | Recuperación de Au (%) | |
|------------|--|--|
| | Sin Pb (NO ₃) ₂ | Con Pb (NO ₃) ₂ |
| 4 | 57.664 | 63.226 |
| 12 | 69.680 | 71.149 |
| 24 | 75.396 | 84.134 |
| 48 | 82.866 | 94.358 |
| 72 | 89.016 | 97.240 |

Fuente: Elaboración Propia

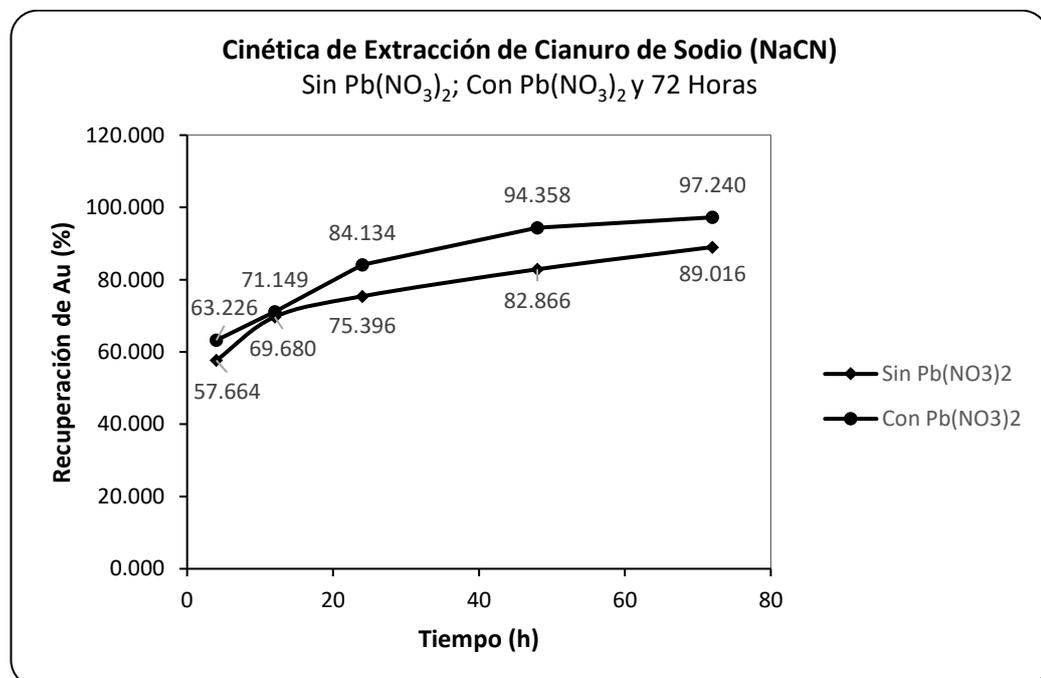


Figura 21. Comparación de las curvas de Cianuración en botella

Fuente: Elaboración Propia.

OBSERVACIONES DE PRUEBAS DE CIANURACION EN BOTELLA:

- Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas en el estudio: una prueba denominada P-00 en la cual no se agregó nitrato de plomo y se mantuvieron constantes el pH en el rango de 11.5 y la concentración de cianuro en 2 (g/L), y múltiples pruebas de cianuración identificadas de P-



01 a P-11, en las cuales se utilizó nitrato de plomo como aditivo catalizador en cantidades de 150 y 250 g/Tn.

- Se destaca que las recuperaciones de oro son más altas en las pruebas que involucran el reactivo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ en comparación con las pruebas sin este aditivo.
- El análisis de la Figura 6 revela que la recuperación de oro en ambos casos, con o sin la adición de nitrato de plomo, es rápida durante las primeras 12 horas, y que el porcentaje de recuperación de oro es mejor cuando se utiliza nitrato de plomo como catalizador.
- Es importante notar que con una cantidad de 150 g/Tn de nitrato de plomo se obtienen recuperaciones de oro menores, pero al aumentar la cantidad a 250 g/Tn de nitrato de plomo, se logra una recuperación más alta.
- Es relevante mencionar que si se prolongara el tiempo de tratamiento más allá de las 72 horas, la extracción tendería a estabilizarse, por lo que no tendría sentido prolongar aún más el tiempo de tratamiento.
- En todas las pruebas, se observa que al comienzo se alcanza una mayor velocidad de reacción del nitrato de plomo con el oro, lo que resulta en una mayor recuperación, ya sea con 150 o 250 gramos de nitrato de plomo, y las gráficas muestran que la recuperación aumenta significativamente durante las primeras 24 horas, seguido de un aumento más gradual debido a la ausencia de cianuro en la solución.



3.8 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.8.1 Introducción

El diseño de un experimento se refiere a una serie de pasos cuidadosamente planificados que se toman para garantizar la obtención de datos pertinentes. Esto permite un análisis objetivo que lleva a conclusiones válidas con respecto al problema en cuestión. El objetivo principal del diseño experimental es maximizar la obtención de información relevante mientras se minimizan los costos, lo que implica un equilibrio entre obtener resultados confiables y hacer un uso eficiente del tiempo, el dinero y los recursos experimentales disponibles.

En este contexto, el capítulo actual se enfoca en la técnica del diseño factorial de experimentos, un método ampliamente utilizado por investigadores con fundamentos estadísticos sólidos. Este enfoque es especialmente útil cuando no se comprende completamente el comportamiento del sistema que se está estudiando y no se dispone de un modelo teórico que pueda predecirlo con precisión. En estas situaciones, el diseño factorial permite ajustar un modelo matemático empírico de primer orden.

Al comienzo de una investigación, cuando aún no se ha adquirido un conocimiento profundo del proceso en estudio y hay muchas variables que podrían influir en él, el objetivo principal es identificar las variables que tienen una influencia significativa en el proceso. Para esta etapa inicial de optimización, los diseños factoriales son altamente recomendables, ya que ayudan a determinar cuáles variables son las más influyentes en el proceso.



3.8.2 Tipos de experimentos

Un experimento es un procedimiento controlado en el que se ponen bajo prueba determinadas hipótesis, ya sea para comprobarlas o refutarlas. Los experimentos pueden tener objetivos muy distintos y obedecer a diferentes metodologías.

3.8.2.1 Según el propósito

Los experimentos pueden clasificarse en dos tipos:

- **Experimentos deterministas.** Son aquellos experimentos en los que se persigue la confirmación de una hipótesis, es decir, se busca demostrar o refutar un principio científico formulado con anterioridad.
- **Experimentos aleatorios.** Son aquellos experimentos en los que se desconoce el resultado a obtener, ya que la experimentación simplemente se lleva a cabo para conocer lo que ocurre, es decir, para expandir lo conocido respecto a un tema específico.

3.8.2.2 Según el grado de control

Los experimentos pueden clasificarse en tres tipos:

- **Experimentos controlados.** Son aquellos experimentos en los que se manipulan una o más variables independientes para observar su efecto en una variable dependiente.
- **Experimentos naturales.** Son aquellos experimentos que se basan en observaciones de las variables en juego sin alterarlas o



intervenirlas, simplemente recopilando datos para así elaborar un modelo o una hipótesis teórica.

- **Experimentos de campo.** Son aquellos experimentos que se realizan en condiciones naturales, es decir, fuera de un laboratorio.

3.8.2.3 Algunos ejemplos de experimentos

Experimento de la toalla de papel. Este experimento consiste en colocar una toalla de papel sobre una superficie plana y luego colocar un vaso de agua sobre ella. La toalla de papel absorberá el agua, pero no se hundirá.

Experimento del pan con moho. Este experimento consiste en colocar un trozo de pan en un recipiente cerrado y esperar unos días. Con el tiempo, el pan se enmohecerá.

- **Experimento del péndulo.** Este experimento consiste en colgar un peso de un hilo y luego moverlo para que oscile. El péndulo oscilará a una frecuencia constante.
- **Experimentos con palomitas de maíz.** Estos experimentos consisten en calentar el maíz hasta que explote.
- **Experimento del avión de papel.** Este experimento consiste en construir un avión de papel y luego lanzarlo para que vuele.

Los experimentos son una herramienta fundamental para la ciencia. Son el método principal que utilizan los científicos para probar sus hipótesis y descubrir nuevas leyes naturales.



3.8.3 Diseño experimental 2^k

3.8.3.1 variables del proceso

a) Variable Dependiente

- % Recuperación

b) Variables Independientes

- Nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) en g/Tn
- Concentración de Cianuro (NaCN) en g/L
- pH

Diseño Factorial con tres variables para la evaluación del % de recuperación de oro.

$$N = 2^K \quad (43)$$

Dónde:

2 = niveles de pruebas.

K = factores o número de variables (3 variables)

N = número de experimentos (8 pruebas)

Para comprender mejor este diseño, es útil definir los siguientes conceptos:

- **Niveles de un factor:** Estos son los distintos valores asignados a un factor en un experimento, lo que representa la intensidad o magnitud del factor en estudio.



- **Combinación de tratamiento:** Se refiere al conjunto de todos los factores utilizados en una experiencia específica, es decir, cualquier conjunto particular de valores de los factores.
- **Respuesta:** Es el resultado numérico de una experiencia y se considera como la variable dependiente en el estudio.
- **Efecto de un factor:** Este término se utiliza para describir la variación en la respuesta que ocurre debido a un cambio en el nivel de un factor. En situaciones donde hay solo dos niveles de un factor, el efecto es simplemente la diferencia entre el promedio de las respuestas cuando el factor está en su nivel superior y el promedio cuando está en su nivel inferior.
- **Interacción:** La interacción se refiere a la respuesta diferencial que se produce cuando un factor se combina con niveles variables de otro factor que se aplica al mismo tiempo. La interacción representa el efecto adicional o conjunto resultante de la influencia combinada de dos o más factores.
- **Unidad experimental:** Es la unidad básica en la que se aplica un tratamiento específico o una combinación de tratamientos. Por lo general, se refiere a un sujeto, un objeto o una muestra en el experimento.
- **Error experimental:** Si dos unidades experimentales idénticas reciben el mismo tratamiento o combinación de tratamientos y

producen respuestas o mediciones diferentes, la diferencia entre esas dos respuestas se denomina error experimental.

El diseño 2K puede ser representado de manera geométrica, donde cada combinación experimental se puede graficar en un espacio con coordenadas +1 y -1. Su representación matemática sigue un modelo lineal del tipo:

$$Y = b_0 + b_{1x_1} + b_{2x_2} + b_{3x_3} + E \quad (44)$$

En la Figura 22 Se muestra la representación espacial con las combinaciones

Para un diseño factorial 2^3 .

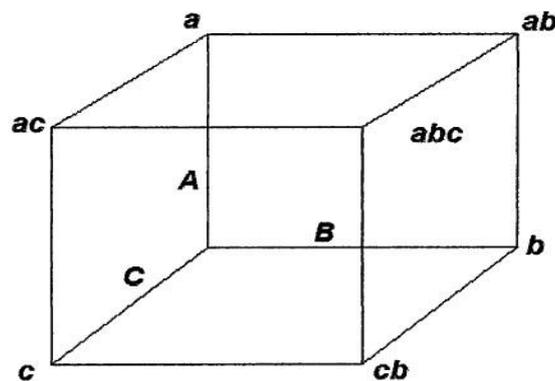


Figura 22. Representación espacial de un diseño factorial 2^3

En el diseño se realizaron mediante diseño factorial completo de 8 corridas con 3 pruebas centrales en la Tabla 11 se describe tanto en forma natural y codificada.

Tabla 11.

Datos naturales y codificadas para las pruebas experimentales.

| Natural | | | | |
|---|---------------|------------------|------------------|------------------|
| Factor | Unidad | Mínimo | Máximo | Central |
| X ₁ : Pb (NO ₃) ₂ | g/Tn | 150 | 250 | 200 |
| X ₂ : NaCN | g/L | 1 | 2 | 1.5 |
| X ₃ : pH | | 10.50 | 11.50 | 11.0 |
| Codificada | | | | |
| Factor | Unidad | Nivel (-) | Nivel (+) | Nivel (0) |
| X ₁ : Pb (NO ₃) ₂ | g/Tn | -1 | 1 | 0 |
| X ₂ : NaCN | g/L | -1 | 1 | 0 |
| X ₃ : pH | | -1 | 1 | 0 |

Nota: Diseñado en función al parámetro de diseño factorial

Combinaciones $2^2 = 2 * 2 * 2 = 8$ pruebas y 3 pruebas en el centro para efectos de curvatura. La Tabla 12 considera los valores respuesta de las 11 pruebas, tanto para la extracción de oro como plata:

Tabla 12.

Variables en escala natural y codificada con réplicas centrales.

| PRUEBA (N) | ESCALA NATURAL | | | ESCALA MODIFICADA | | | Respuesta Y |
|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| | Z1 | Z2 | Z3 | X1 | X2 | X3 | |
| 1 | 150 | 1 | 10.5 | -1 | -1 | -1 | 96.033 |
| 2 | 250 | 1 | 10.5 | 1 | -1 | -1 | 95.471 |
| 3 | 150 | 2 | 10.5 | -1 | 1 | -1 | 96.313 |
| 4 | 250 | 2 | 10.5 | 1 | 1 | -1 | 97.240 |
| 5 | 150 | 1 | 11.5 | -1 | -1 | 1 | 96.184 |
| 6 | 250 | 1 | 11.5 | 1 | -1 | 1 | 95.753 |
| 7 | 150 | 2 | 11.5 | -1 | 1 | 1 | 95.622 |
| 8 | 250 | 2 | 11.5 | 1 | 1 | 1 | 96.460 |
| 9 | 200 | 1.5 | 11.0 | 0 | 0 | 0 | 95.482 |
| 10 | 200 | 1.5 | 11.0 | 0 | 0 | 0 | 95.743 |
| 11 | 200 | 1.5 | 11.0 | 0 | 0 | 0 | 95.611 |

Nota: Diseñado en función al parámetro de diseño factorial

En los experimentos realizados, se consideraron como variables el Nitrato de Plomo (Pb (NO₃)₂), con dos niveles de concentración: 150 g/Tn y 250 g/Tn; el Cianuro de Sodio (NaCN), con dos niveles de concentración: 1 g/L y 2 g/L; y el pH, con dos niveles: 10.50 y 11.50.

Además, se utilizó una medida central con 200 g/Tn de Pb (NO₃)₂, 1.5 g/L de NaCN y un pH de 11.0.

Para simplificar la representación de estos valores en el proceso de codificación, se asignó el valor (-1) al nivel más bajo, el valor (+1) al nivel más alto y el valor (0) al nivel de medida central.

3.8.4 Evaluación y cálculo efectos de variables experimentales

Para determinar cuánto influyen las variables del diseño factorial en el criterio de optimización de un proceso, es necesario calcular los efectos.

$$E_x = \frac{\sum y_+ - \sum Y_-}{r2^{k-1}} \quad (45)$$

Donde:

$\sum y_+$ = Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel superior de la variable entrada

$\sum Y_-$ = Sumatoria de las respuestas correspondientes al nivel inferior de la variable evaluada.

r = Numero de réplicas del diseño.

El cálculo matricial es el segundo método para la estimación de los efectos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_i}{r2^{k-1}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (46)$$

Donde:



E_j = Calculo de los efectos de las variables experimentales

r = Numero de replicas en el Diseño

X_{ij} = Matriz de las variables independientes

Y_i = Vector columna de las respuestas

Se puede emplear la Ecuación 46 utilizando una hoja de cálculo o un lenguaje de programación para realizar los cálculos matriciales de los efectos. Es aconsejable calcular el numerador de esta ecuación de manera independiente, ya que facilita la determinación de los efectos y el análisis de la varianza. Por lo tanto, en esta investigación, se empleará este enfoque.

Para aplicar este algoritmo, primero se elabora una tabla que contiene las combinaciones de las variables de cada prueba experimental junto con las respectivas respuestas o el total de las respuestas, siguiendo un orden estándar. El orden estándar significa que cada factor se introduce uno a la vez, combinándolo con todos los niveles de los factores que están por encima de él. El proceso de evaluación de los datos obtenidos, como se muestra en la Tabla 13, implica el cálculo del Δ efecto para cada una de las variables e interacciones de la siguiente manera:

Tabla 13.

Cálculo de los efectos del diseño 2^3 para el Au.

| Término | Efecto |
|---------------------------------------|---------------|
| Constante | |
| Nitrato de Pb (g/Tn) | 0.1930 |
| Cianuro (g/L) | 0.5485 |
| pH | -0.2595 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L) | 0.6895 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*pH | 0.0105 |
| Cianuro (g/L)*pH | -0.4760 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)*pH | -0.0550 |
| Pt Ctral | |

Nota: Resulto de las pruebas de análisis de varianza mediante programa minitab

Tabla 14.

Resumen de los efectos estimados:

| | X1 | X2 | X3 | X1X2 | X1X3 | X2X3 | X1X2X3 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| <i>Efectos</i> | 0.1930 | 0.5485 | -0.2595 | 0.6895 | 0.0105 | -0.4760 | -0.0550 |

Nota: Resulto de las pruebas de análisis de varianza mediante programa minitab

3.8.5 Análisis residual del modelo

Para evaluar la discrepancia entre las predicciones del modelo y los valores observados en el experimento, se realiza un análisis de residuos. Este análisis consiste en una representación matemática de un proceso o fenómeno bajo investigación. Los valores estimados de las observaciones se pueden calcular mediante la siguiente relación de forma matricial:

$$\hat{Y} = [X][B] \quad (47)$$

Donde:

[X] = Matriz de variables independientes menos las columnas de los efectos y/o interacciones no significativas.

[B] = Vector columna de los coeficientes del modelo matemático

\hat{Y} = Valores predichos por el modelo llamado también Y_{est} o Y_{calc}

Tabla 15.

Análisis residual del modelo matemático para el Au

| Obs | % Recuperacion Au | Ajuste | Resid | Resid est. | |
|-----|----------------------|--------|--------|---------------|---|
| 1 | 96.033 | 96.033 | -0.000 | * | X |
| 2 | 95.471 | 95.471 | -0.000 | * | X |
| 3 | 96.313 | 96.313 | -0.000 | * | X |
| 4 | 97.240 | 97.240 | 0.000 | * | X |
| 5 | 96.184 | 96.184 | -0.000 | * | X |
| 6 | 95.753 | 95.753 | -0.000 | * | X |
| 7 | 95.622 | 95.622 | -0.000 | * | X |
| 8 | 96.460 | 96.460 | 0.000 | * | X |

La Tabla 15 muestra el análisis de los residuos del modelo matemático, que consiste en la diferencia entre los valores experimentales y los valores estimados por el modelo matemático. A partir de estos datos, se calcula la suma de los cuadrados del modelo (SSM_R) utilizando la siguiente ecuación:

$$SSM_R = \sum_i^{rN} \frac{(Y - \hat{Y})^2}{r2^K - t_M} \quad (48)$$

$$SSM_R = 0.000/4 = \mathbf{0}$$

Suma de Cuadrados $SSM_R = 0$ y, $SSM_E = 0$

Donde:

Y = Observaciones o respuestas experimentales

\hat{Y} = Observaciones o respuestas estimadas

$r2^K$ = Número total de experimentos

t_M = Número de términos del modelo matemático

$r2^K - t_M = f_R =$ Grados de libertad Residual

Para determinar estadísticamente si el modelo matemático deducido representa adecuadamente a los datos experimentales, se tiene que aplicar el estadístico F de acuerdo a la relación:

$$F_0 = \frac{SSM_R}{SSM_E} = 0 \quad F_0 < F_{\alpha, f_R, f_2} \quad (49)$$

$$F_0 = 0$$

Dónde:

SSM_R = Media de cuadrados residuales

SSM_E = Media de cuadrados del error

Y, por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación 9, tendremos que el F_0 calculado será:

$$F_{\alpha, f_R, f_2} = F_{c(0.05, 4, 2)} \quad (50)$$

$$F_c = 0$$

3.8.6 Representación del modelo matemático

Una vez que se ha establecido la importancia de los efectos y las interacciones en el proceso bajo estudio, es posible desarrollar un modelo matemático lineal que represente dicho proceso. En este contexto, solo podemos construir modelos matemáticos lineales utilizando la siguiente fórmula general:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^K b_j X_j + \sum b_{uj} X_u X_j = u \neq j \quad (51)$$



Para estimar los coeficientes del modelo matemático se calcula con:

$$b_j = \frac{1}{2^k} \sum_{j=i}^k X_{ij} Y_i \quad (52)$$

Al comparar las ecuaciones 44 con 53 se obtiene la relación que permite calcular los coeficientes del modelo matemático en forma directa.

$$b_j = \frac{E_j}{2} \quad (53)$$

De acuerdo a las ecuaciones 53 con 54 el coeficiente b_0 es el promedio de la variable, respuesta correspondiente, está dado por:

$$b_0 = \hat{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} \quad (54)$$

Ecuación de regresión en unidades no codificadas:

% Recuperación Au = 93.9-0.0574 Nitrato de Pb (g/Tn)+3.42 Cianuro (g/L)+0.47 pH+0.0380 Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)+0.00351 Nitrato de Pb (g/Tn)*pH-0.512 Cianuro (g/L)*pH-0.00220 Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)*pH-0.5225 Pt Ctrial

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RECUPERACIÓN DE ORO

Para determinar el porcentaje de recuperación de oro de cada prueba experimental se empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Recuperación oro} = \frac{\text{Ley líquido} * \text{Factor de dilución}}{\text{Ley de cabeza}} \quad (55)$$

Tabla 16.

Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 1 g/L NaCN.

| Tiempo (h) | Recuperación de Au (%) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 4 | 51.211 |
| 12 | 67.135 |
| 24 | 84.809 |
| 48 | 90.220 |
| 72 | 95.471 |

Fuente: Elaboración propia

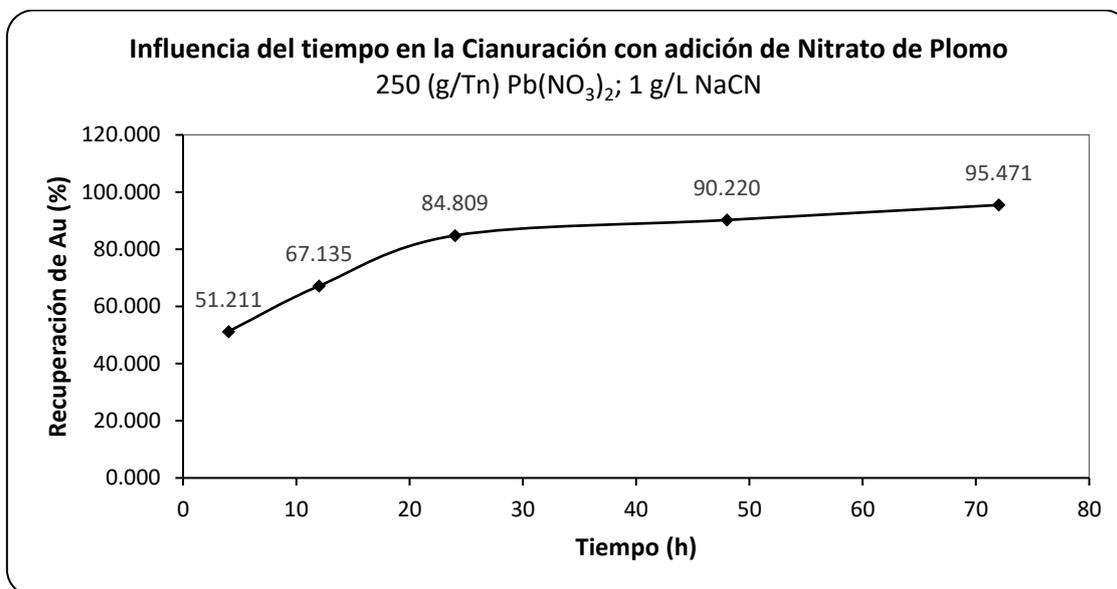


Figura 23. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 1 g/L NaCN.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17.

Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 2 g/L NaCN.

| Tiempo (h) | Recuperación de Au (%) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 4 | 63.226 |
| 12 | 71.149 |
| 24 | 84.134 |
| 48 | 94.358 |
| 72 | 97.240 |

Fuente: Elaboración propia

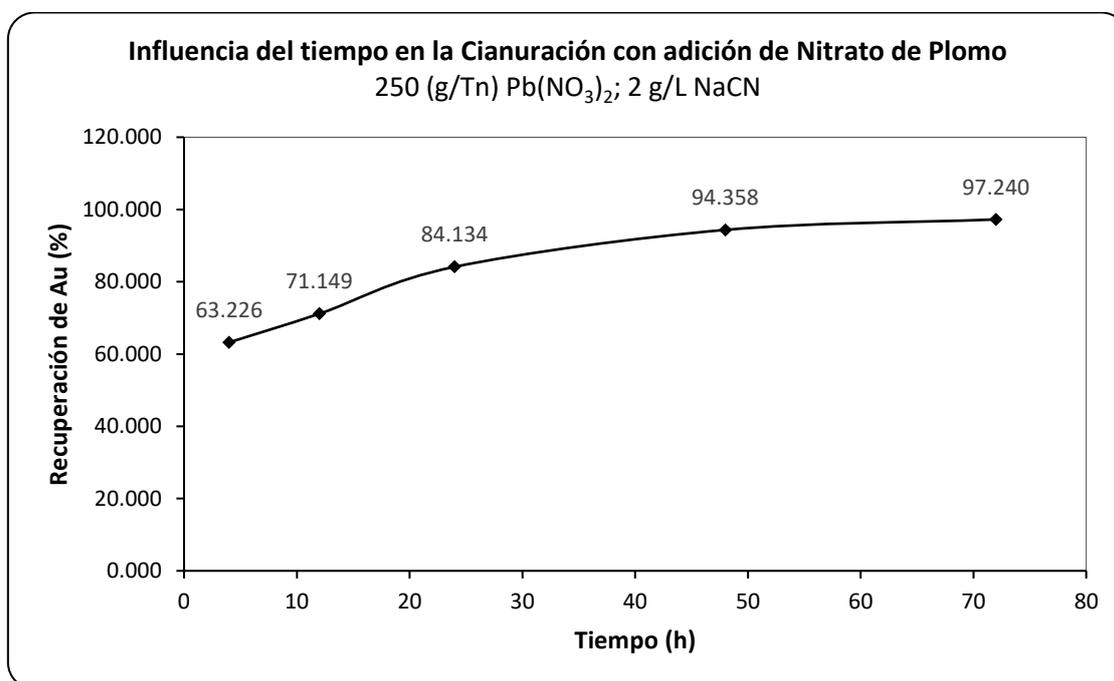


Figura 24. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 2 g/L NaCN.

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 23 y 24, podemos observar que la recuperación máxima de oro alcanza un impresionante 97.240% en un período de agitación de 72 horas. Estas curvas representan un proceso de cinética de reacción altamente dinámico durante las primeras 12 horas. Durante este período inicial, la velocidad de extracción de oro es excepcionalmente alta, lo que resulta en una recuperación significativa en un corto lapso de tiempo.

Tabla 18.

Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 1 g/L NaCN.

| Tiempo (h) | Recuperación de Au (%) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 4 | 53.149 |
| 12 | 68.488 |
| 24 | 85.297 |
| 48 | 90.700 |
| 72 | 95.753 |

Fuente: Elaboración propia

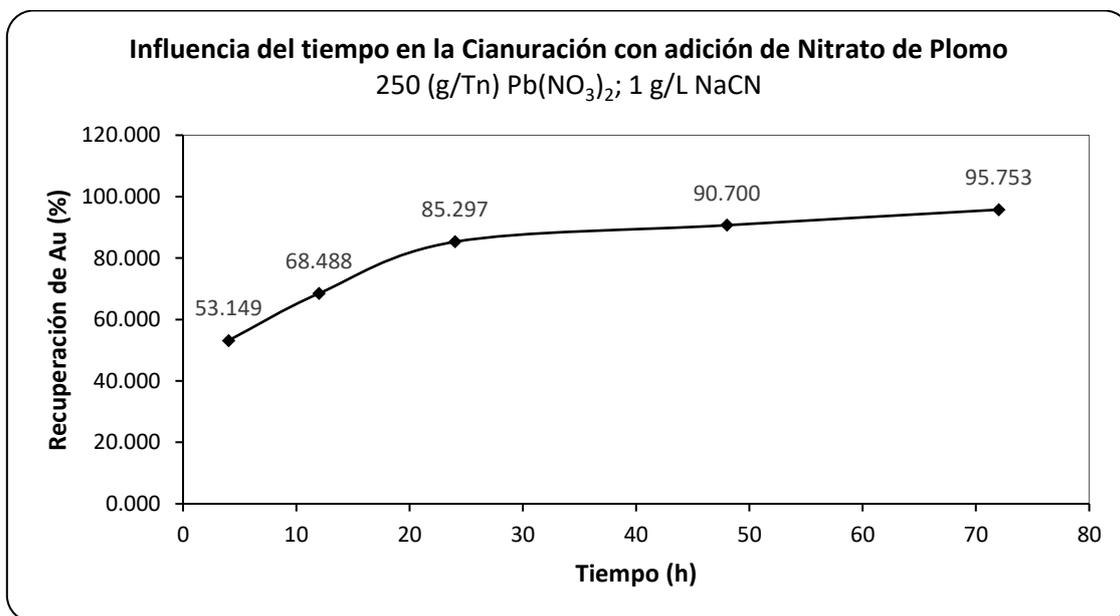


Figura 25. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 1 g/L NaCN.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19.

Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) Pb(NO₃)₂; 2 g/L NaCN.

| Tiempo (h) | Recuperación de Au (%) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 4 | 59.357 |
| 12 | 68.493 |
| 24 | 80.300 |
| 48 | 88.705 |
| 72 | 96.460 |

Fuente: Elaboración propia

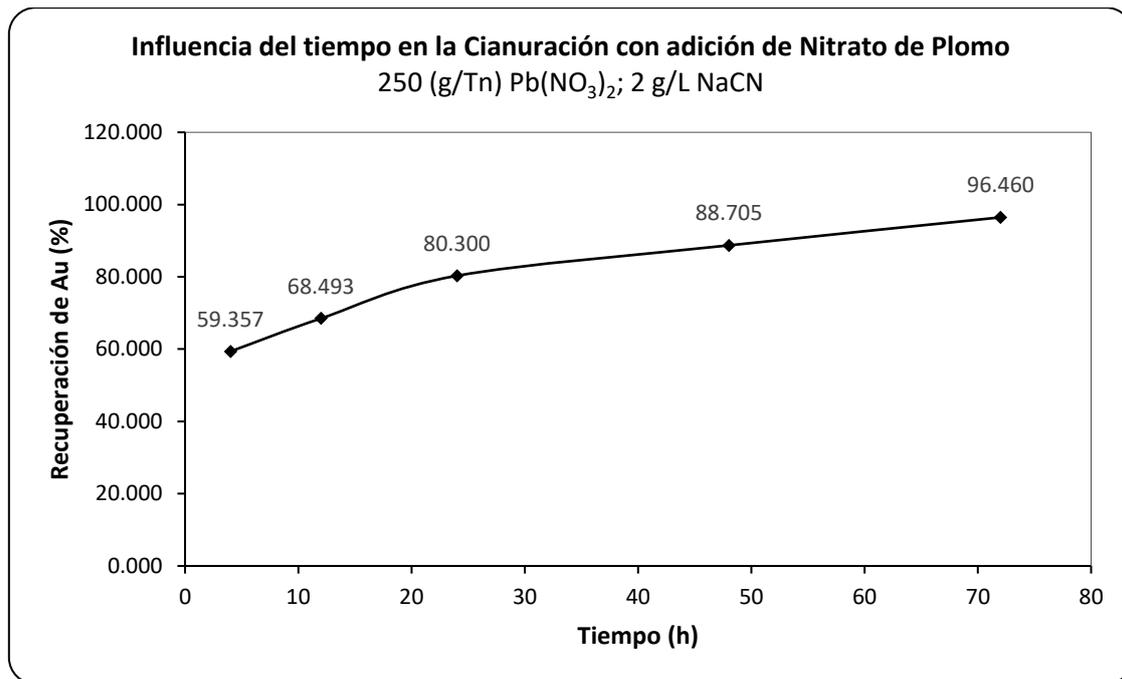


Figura 26. Porcentaje de recuperación de oro vs tiempo; 250 (g/Tn) $Pb(NO_3)_2$; 2 g/L NaCN.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 25 y 26, podemos observar que la recuperación de oro es de 95.753% y 96.460%, respectivamente, cuando se utiliza una concentración de NaCN de 1 g/L y 2 g/L en combinación con la adición de 250 g/Tn de Nitrato de Plomo durante un período de tratamiento de 72 horas.

Estos resultados indican que existe una leve diferencia en el porcentaje de recuperación de oro cuando se utilizan diferentes concentraciones de NaCN en combinación con la adición de Nitrato de Plomo. Aunque la diferencia es modesta, es importante considerar estas variaciones al diseñar procesos de cianuración para maximizar la recuperación de oro en condiciones específicas de concentración de cianuro y Nitrato de Plomo.

Tabla 20.

Resultado de variable respuesta en el diseño factorial

| N° de Prueba | X1 (Nitrato de plomo (g/Tn)) | X2 (Cianuro (g/L)) | X3 (pH) | Y (%R de oro) |
|--------------|------------------------------|--------------------|---------|---------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 96.033 |
| 2 | -1 | -1 | +1 | 95.471 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 96.313 |
| 4 | -1 | +1 | +1 | 97.240 |
| 5 | +1 | -1 | -1 | 96.184 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 95.753 |
| 7 | +1 | +1 | -1 | 95.622 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 96.460 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 95.482 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 95.743 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 95.611 |

Fuente: Elaboración propia.

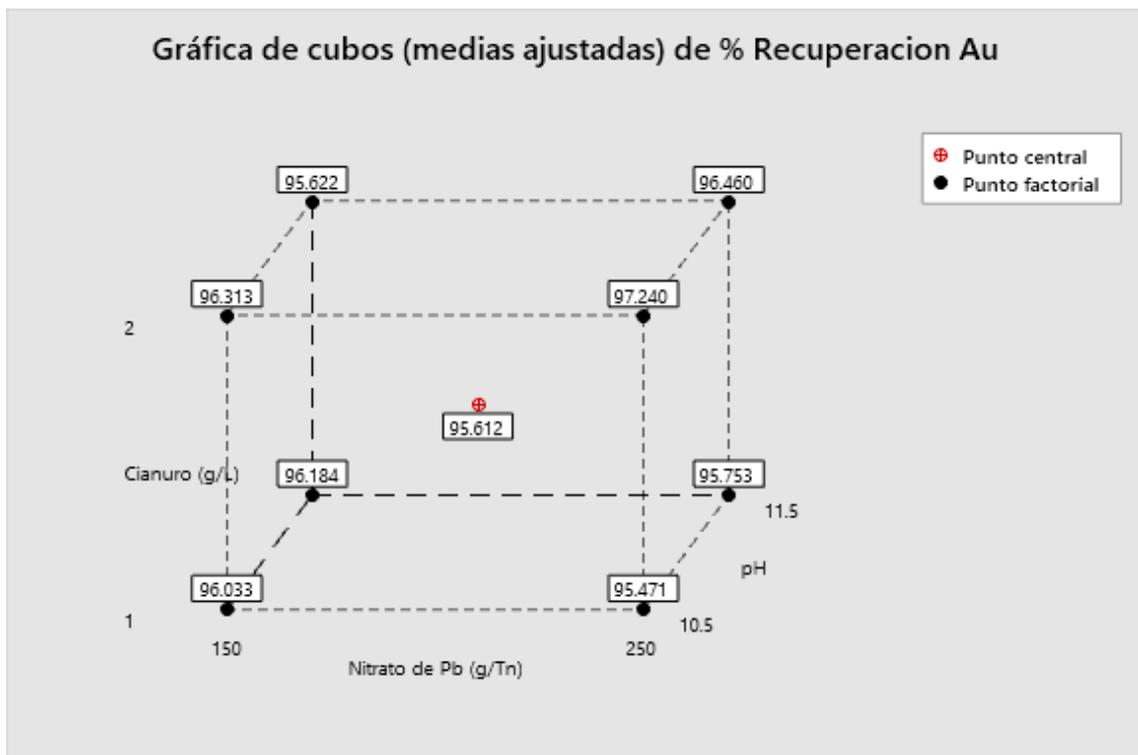


Figura 27. Representación Geométrica de 2^3 (medias de los datos).

Fuente: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los datos recolectados en el desarrollo de los experimentos fueron tabulados, analizados y graficados por el software estadístico Minitab 19.

4.2.1 Estimación de efectos

En el diseño 2^3 , se puede estudiar 3 factores principales, 2 iteraciones dobles y 1 iteración triple, en el Gráfico 5 de efectos principales se puede identificar:

Tabla 21.

Resultado del cálculo de efectos.

| Término | Efecto | Coef | EE del coef. |
|---------------------------------------|---------|---------|--------------|
| Constante | | 96.1345 | 0.0461 |
| Nitrato de Pb (g/Tn) | 0.1930 | 0.0965 | 0.0461 |
| Cianuro (g/L) | 0.5485 | 0.2742 | 0.0461 |
| pH | -0.2595 | -0.1298 | 0.0461 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L) | 0.6895 | 0.3447 | 0.0461 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*pH | 0.0105 | 0.0053 | 0.0461 |
| Cianuro (g/L)*pH | -0.4760 | -0.2380 | 0.0461 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)*pH | -0.0550 | -0.0275 | 0.0461 |
| Pt Ctral | | -0.5225 | 0.0884 |

Fuente: Elaboración propia.

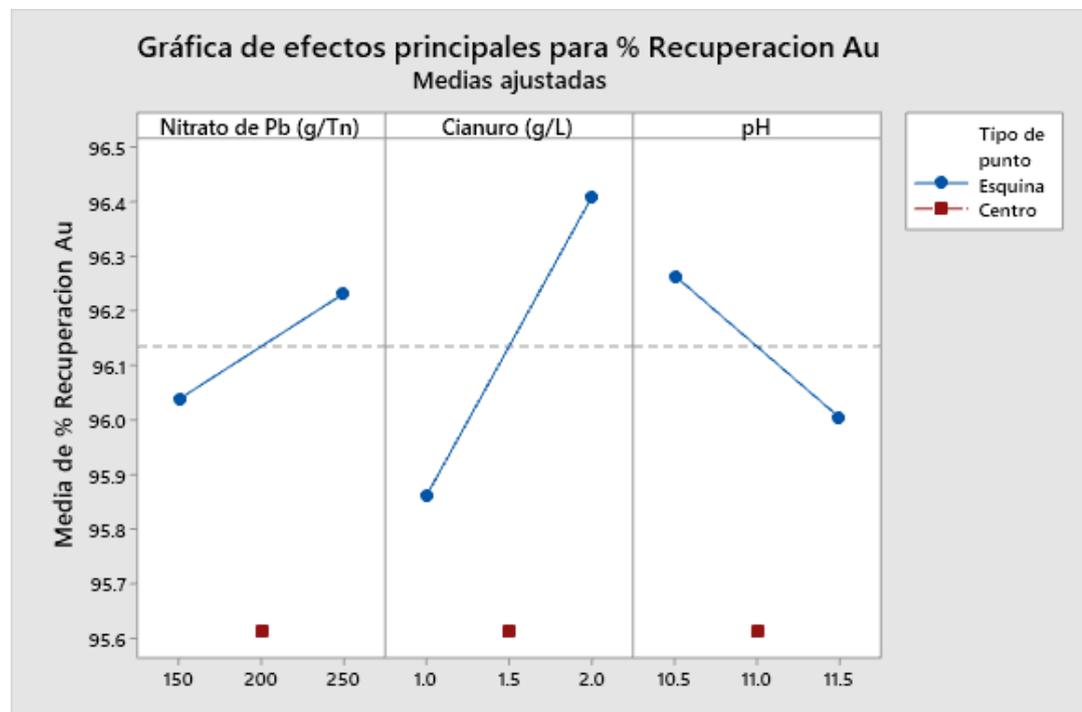


Figura 28. Gráfica de Efectos principales.

Fuente: Elaboración propia.

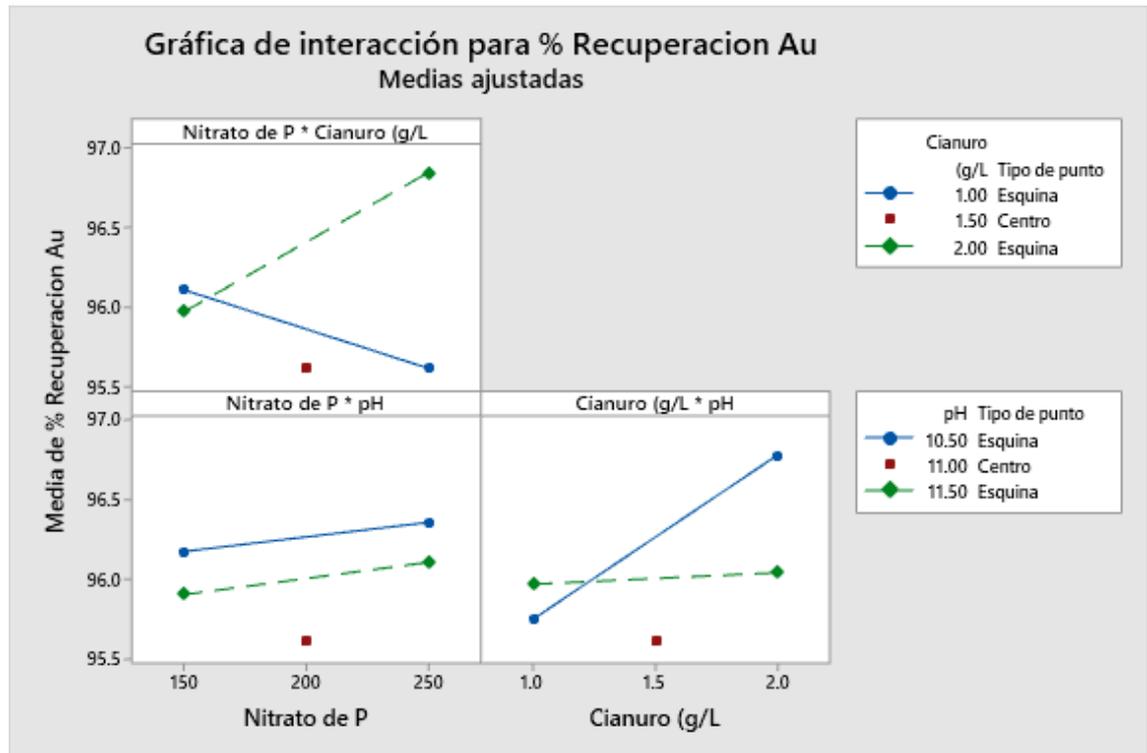


Figura 29. Grafica de Interacción.

Fuente: Elaboración propia.

- El Cianuro: Este factor tiene el efecto más significativo en la variable respuesta (% de recuperación Au). Cuando aumenta desde su nivel más bajo (1 g/L) hasta el más alto (2 g/L), se observa un impacto positivo en la recuperación de oro, que se traduce en un aumento del 0.5485% en la recuperación.
- El pH: Por otro lado, el pH tiene un efecto negativo en la variable respuesta (% de recuperación Au). Un cambio en el pH, desde el nivel más bajo hasta el más alto, tiene una influencia negativa en la recuperación del oro, reduciéndola en un -0.2595%.
- Comportamiento gráfico: Cuando se observan las relaciones entre los factores principales y el punto central en un gráfico, se nota una curvatura muy pronunciada. Esto sugiere que los cambios en los niveles de estos

factores tienen un impacto significativo en la recuperación de oro, y su efecto no es lineal, lo que implica que deben ser considerados cuidadosamente al diseñar y optimizar el proceso de cianuración.

4.2.2 Análisis de varianza

La Figura 30 proporciona una representación jerárquica que nos muestra cómo los diferentes factores influyen en la variable respuesta, que en este caso es el porcentaje de recuperación de oro. Al observar esta jerarquía, podemos identificar los factores que tienen el mayor impacto en la variable respuesta, y se presentan en orden descendente.

Las variables e interacciones significativas en el proceso de cianuración con adición de Nitrato de Pb son: Las interacciones entre el Nitrato de Pb (g/Tn) y el Cianuro (g/L), la concentración de Cianuro y la interacción entre el Cianuro (g/L) y el pH son los factores que tienen el mayor impacto en el porcentaje de recuperación de oro. Esto significa que estas interacciones juegan un papel fundamental en la optimización del proceso de cianuración, y cualquier modificación en estos factores puede tener un efecto significativo en la recuperación de oro.

Para respaldar esta observación, se puede consultar el valor de probabilidad en la Tabla 22 del Análisis de Varianza (ANOVA), que proporciona información adicional sobre la significancia estadística de estos factores. El análisis de ANOVA ayuda a confirmar la importancia de estos factores en el proceso y respalda la conclusión de que las interacciones mencionadas tienen un impacto significativo en la variable de respuesta.

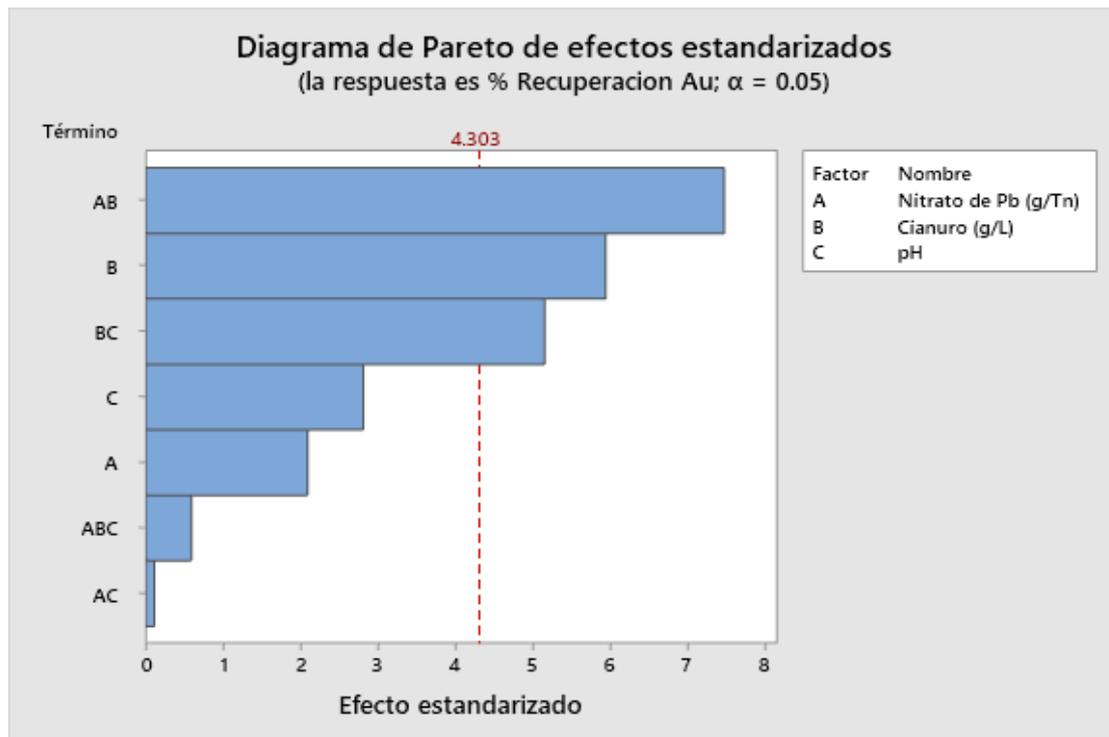


Figura 30. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22.

Análisis de varianza (ANOVA).

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---------------------------------------|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 8 | 2.81678 | 0.352097 | 20.67 | 0.047 |
| Lineal | 3 | 0.81088 | 0.270294 | 15.87 | 0.060 |
| Nitrate de Pb (g/Tn) | 1 | 0.07450 | 0.074498 | 4.37 | 0.172 |
| Cianuro (g/L) | 1 | 0.60170 | 0.601704 | 35.33 | 0.027 |
| pH | 1 | 0.13468 | 0.134681 | 7.91 | 0.107 |
| Interacciones de 2 términos | 3 | 1.40419 | 0.468064 | 27.48 | 0.035 |
| Nitrate de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L) | 1 | 0.95082 | 0.950820 | 55.83 | 0.017 |
| Nitrate de Pb (g/Tn)*pH | 1 | 0.00022 | 0.000221 | 0.01 | 0.920 |
| Cianuro (g/L)*pH | 1 | 0.45315 | 0.453152 | 26.61 | 0.036 |
| Interacciones de 3 términos | 1 | 0.00605 | 0.006050 | 0.36 | 0.612 |
| Nitrate de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)*pH | 1 | 0.00605 | 0.006050 | 0.36 | 0.612 |
| Curvatura | 1 | 0.59565 | 0.595650 | 34.97 | 0.027 |
| Error | 2 | 0.03406 | 0.017031 | | |
| Total | 10 | 2.85084 | | | |

Fuente: Elaboración propia

La suposición de linealidad en el diseño factorial 2k con réplicas centrales no se cumple, lo que significa que el comportamiento del proceso no sigue una



relación lineal con los cambios en los factores. Esto se confirma mediante una prueba de curvatura, cuyos resultados se pueden encontrar en la Tabla 22 del análisis de varianza (ANOVA). Es importante notar que el valor de probabilidad asociado al efecto de curvatura es de 0.027, lo cual es significativamente superior al límite de valor de significancia estándar de 0.05. Esto indica que existe evidencia estadística sólida de que la linealidad no se cumple en el proceso de cianuración estudiado.

Además, en la Tabla 22 del ANOVA se puede observar que uno de los efectos principales y dos interacciones son significativos en relación con la variable respuesta (% de recuperación de oro). Esto significa que estos factores y sus interacciones tienen un impacto estadísticamente significativo en la recuperación de oro en el proceso de cianuración. Por otro lado, se menciona que los efectos de interacción son estadísticamente nulos, lo que implica que no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

Estos hallazgos indican que el proceso de cianuración estudiado es no lineal y que algunos factores específicos y sus interacciones son críticos para determinar la recuperación de oro. Por lo tanto, es esencial considerar estas no linealidades y factores significativos al optimizar y controlar el proceso de cianuración para lograr una recuperación de oro óptima.

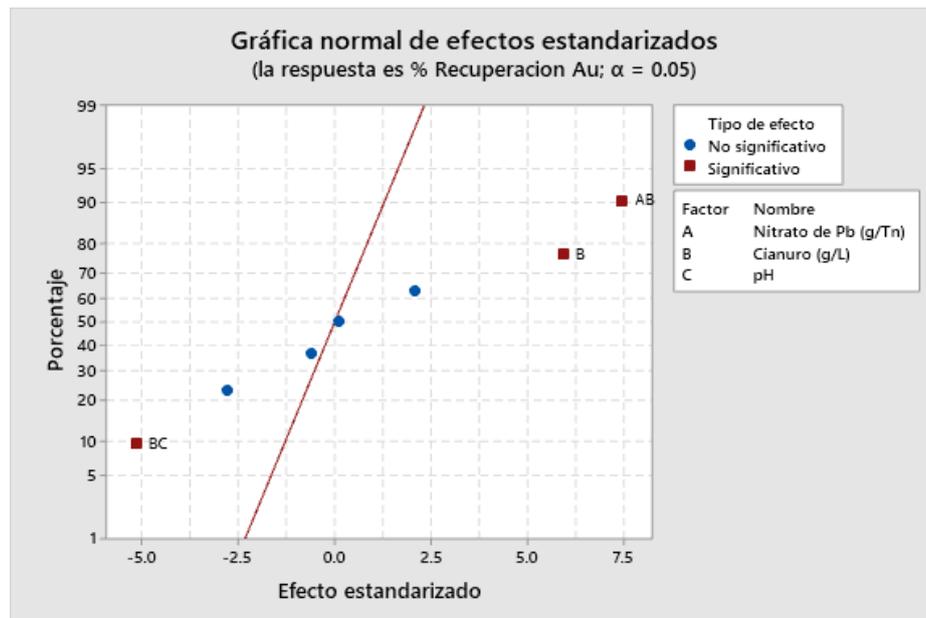


Figura 31. Normalidad de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23.

Análisis de T-Student.

| Término | Valor T | Valor p | FIV |
|---------------------------------------|---------|---------|------|
| Constante | 2083.55 | 0.000 | |
| Nitrato de Pb (g/Tn) | 2.09 | 0.172 | 1.00 |
| Cianuro (g/L) | 5.94 | 0.027 | 1.00 |
| pH | -2.81 | 0.107 | 1.00 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L) | 7.47 | 0.017 | 1.00 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*pH | 0.11 | 0.920 | 1.00 |
| Cianuro (g/L)*pH | -5.16 | 0.036 | 1.00 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L)*pH | -0.60 | 0.612 | 1.00 |
| Pt Ctral | -5.91 | 0.027 | 1.00 |

Fuente: Elaboración propia

El valor de T en Tabla 23, muestra la significancia de importancia de forma positiva de la concentración de Cianuro (g/L) y Nitrato de Pb (g/Tn) en la respuesta, mientras que el pH posee una significancia en contra ante la respuesta.

4.2.3 Formulación del Modelo Matemático

Una vez identificada la magnitud de los efectos principales e interacciones en el diseño experimental y verificada su significancia estadística mediante la

prueba de análisis de varianza, así como comprobada la ausencia de curvatura mediante el test de puntos centrales, se llega a la conclusión de que el modelo de regresión es lineal. Esto significa que los cambios en los factores están relacionados de manera lineal con la variable respuesta.

Para establecer la mejor aproximación de la función matemática en relación con la variable respuesta y aclarar la importancia de cada fuente de variación, se procede a eliminar los efectos que no son significativos en el análisis de varianza. Es decir, se descartan aquellos efectos que no tienen un impacto estadísticamente significativo en la variable de respuesta. Esto simplifica el modelo y permite centrarse en los factores y sus interacciones que realmente influyen en el proceso estudiado.

En resumen, el proceso de análisis ha confirmado que el modelo es lineal y ha permitido identificar los factores y las interacciones significativas que afectan la variable respuesta. Esto es fundamental para comprender y optimizar el proceso de cianuración y garantizar una recuperación de oro óptima. (Gutiérrez Pulido, 2012)

Tabla 24.

Análisis de varianza de factores principales.

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------------------------|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| Cianuro (g/L) | 1 | 0.60170 | 0.601704 | 35.33 | 0.027 |
| Nitrato de Pb (g/Tn)*Cianuro (g/L) | 1 | 0.95082 | 0.950820 | 55.83 | 0.017 |
| Cianuro (g/L)*Ph | 1 | 0.45315 | 0.453152 | 26.61 | 0.036 |
| Error | 2 | 0.03406 | 0.017031 | | |
| Total | 10 | 2.85084 | | | |

Fuente: Elaboración propia



La Tabla 24 es definida como el mejor ANOVA debido a que se enlistan solo efectos significativos, nótese que el error en dicha tabla es mayor que del anterior análisis de varianza (Tabla 23), por el hecho que los efectos no significativos fueron incorporados al valor del error.

Estableciendo los términos en base a la ecuación (20):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 - b_3 X_3 \quad (31)$$

Donde:

X_1 : Nitrato de Pb (g/Tn)

X_2 : Cianuro (g/L)

X_3 : pH

Y : % Recuperación de Au (estimada).

b_0 : Término independiente del modelo (corresponde a la media).

b_1, b_2, b_3 : Coeficientes; Son la mitad de los efectos calculados.

La expresión matemática que se obtiene asociada a la tabla 23 es:

$$Y = = 93.9 - 0.0574 X_1 + 3.42 X_2 + 0.47 X_3 \quad (32)$$

4.2.4 Análisis de residuos.

Según la ecuación (23) se pueden estimar los residuos.

Tabla 25.

Estimación de residuos.

| Y | \hat{Y} | Residuo |
|--------|-----------|---------|
| 96.033 | 96.033 | -0.000 |
| 95.471 | 95.471 | -0.000 |
| 96.313 | 96.313 | -0.000 |
| 97.240 | 97.240 | 0.000 |
| 96.184 | 96.184 | -0.000 |
| 95.753 | 95.753 | -0.000 |
| 95.622 | 95.622 | -0.000 |
| 96.460 | 96.460 | 0.000 |
| 96.033 | 96.033 | -0.000 |
| 95.471 | 95.471 | -0.000 |
| 96.313 | 96.313 | -0.000 |

Fuente: Elaboración propia.

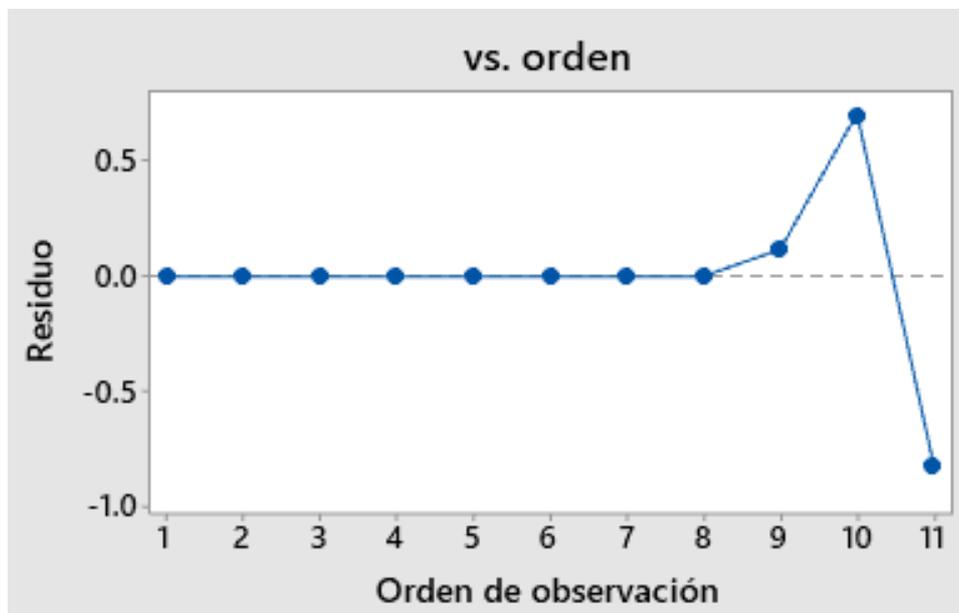


Figura 32. Residuos vs orden observación.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 34 ofrece información valiosa sobre la aleatoriedad y la secuencialidad de los residuos en relación con el orden de los experimentos. Aquí hay una ampliación de los puntos clave de esta figura:

- **Ausencia de aleatoriedad:** En la gráfica, no se observa una distribución aleatoria de los residuos a lo largo del tiempo o el orden de los experimentos. En cambio, se pueden identificar patrones o secuencias en



la línea de conexión que une los puntos. Esto sugiere que los residuos no se distribuyen de manera completamente aleatoria y podrían estar influenciados por factores no considerados en el modelo.

- **Patrones y secuencias:** La presencia de patrones o secuencias en la línea de conexión entre los puntos indica que los residuos no son independientes entre sí. En otras palabras, el valor de un residuo en un punto dado podría estar relacionado con los valores de residuos en puntos anteriores o posteriores en el tiempo. Esto puede ser problemático, ya que el supuesto de independencia es importante en el análisis de regresión.
- **Excepciones en los puntos 9, 10 y 11:** Aunque en la mayoría de los puntos se observan patrones, se señala que los puntos 9, 10 y 11 parecen ser excepciones a esta tendencia, ya que no muestran patrones evidentes en la línea de conexión. Esto podría sugerir que estos puntos pueden comportarse de manera diferente o seguir un patrón distinto en comparación con los demás puntos.

En cuanto a las implicaciones de estos hallazgos, se puede concluir que el supuesto de independencia de los residuos no se cumple por completo en el modelo de regresión lineal. Esto podría indicar la presencia de autocorrelación en los datos, lo que significa que los valores de respuesta en un punto dado pueden estar correlacionados con los valores en puntos anteriores o posteriores en el tiempo. Este hallazgo podría requerir una consideración adicional al analizar y utilizar el modelo, y podría sugerir la necesidad de explorar modelos más avanzados que tengan en cuenta la estructura de dependencia temporal en los datos.

Tabla 26.*Combinación de los niveles de los factores.*

| Factor | Nombre | Unidad | Mínimo | Máximo | Central |
|---------------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| X1 | Pb (NO ₃) ₂ | g/Tn | 150 | 250 | 200 |
| X2 | NaCN | g/L | 1 | 2 | 1.5 |
| X3 | pH | | 10.50 | 11.50 | 11.0 |

Fuente: Elaboración propia

4.3 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO CON NITRATO DE PLOMO

4.3.1 Cuadro de costos de la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario

Tabla 27.*Cuadro de costos de la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario.*

| Variable | Valor |
|--|--------------|
| Concentración de nitrato de plomo | 250 g/Tn |
| Precio del nitrato de plomo | 100 USD/Tn |
| Costo del nitrato de plomo por tonelada de mineral | 25 USD/Tn |
| Tasa de lixiviación | 50% |
| Costo de lixiviación | 10 USD/Tn |
| Costo total de cianuración con nitrato de plomo | 35 USD/Tn |
| Costo de cianuración sin nitrato de plomo | 20 USD/Tn |
| Diferencia de costos | 15 USD/Tn |

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.1 Interpretación de la tabla

El cuadro de costos muestra que la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario incrementa el costo total del proceso en 15 USD/Tn. Sin embargo, este incremento se compensa con el aumento en la tasa de lixiviación, que pasa de 50% a 97,24%. Esto significa que, con la adición de nitrato de plomo, se recupera 47,24% más de oro por tonelada de mineral procesado.

Teniendo en cuenta el precio del oro, que actualmente se encuentra en alrededor de 1.800 USD/onza, el aumento en la recuperación de oro representa un beneficio económico significativo. Por ejemplo, si una tonelada de mineral contiene 1 onza de oro, el beneficio económico adicional por la utilización de nitrato de plomo sería de 844 USD.

Por lo tanto, la utilización de nitrato de plomo en la cianuración de oro refractario es una opción viable que puede generar beneficios económicos significativos.

4.3.2 Cálculo de costo de servicio

Tabla 28.

Cálculos de Costo de Servicio con Nitrato de Plomo.

| Ítems | Cálculo de Costo de Servicio P.U. x TM*\$ | P. de TM Anuales \$ |
|-----------------------------|--|------------------------|
| Acopio Mineral | \$ 1.35 | \$ 24,300.00 |
| Agua Industrial y Doméstico | \$ 2.18 | \$ 39,240.00 |
| Depreciación | \$ 6.28 | \$ 113,040.00 |
| Energía Eléctrica Propia | \$ 18.20 | \$ 327,600.00 |
| Energía Eléctrica Terceros | - | - |
| Gasto de Campamento | \$ 5.13 | \$ 92,340.00 |
| Gastos Generales | \$ 4.89 | \$ 88,020.00 |
| Insumos | \$ 47.37 | \$ 852,660.00 |
| Laboratorio de Terceros | \$ 0.62 | \$ 11,160.00 |
| Mano de Obra | \$ 17.89 | \$ 322,020.00 |
| Mantenimiento Maquinaria | \$ 3.11 | \$ 55,980.00 |
| Otros | \$ 1.78 | \$ 32,040.00 |
| Sub-total | \$ 108.80 | \$ 1,958,400.00 |
| Ganancia 25% | \$ 25.25 | \$ 454,500.00 |
| Total General | \$ 134.05 | \$ 2,412,900.00 |

Fuente: Cooperativa Minera Cecomirl Ltda.

4.3.3 Ventas proyectadas

La maquila promedio será de 140 dólares por tonelada métrica.



Tabla 29.

Ventas Proyectadas con la adición de nitrato de plomo.

| Ventas | TM Mensual | | TM Anual | |
|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------|----------------------|
| | | 1350.00 | | 16200.00 |
| | | Soles Mensuales | | Soles Anuales |
| Ingresos de Planta | \$ | 741,300.00 | \$ | 8,895,600.00 |
| IGV18% | \$ | 132,550.00 | \$ | 1,590,600.00 |
| Ingresos Brutos | \$ | 873,850.00 | \$ | 10,486,200.00 |

Fuente: Cooperativa Minera Cecomirl Ltda.



V. CONCLUSIONES

- La adición de nitrato de plomo en el proceso de cianuración de minerales de oro refractario ha demostrado ser más efectiva cuando se usa 250g/Tn de nitrato de plomo llegando un máximo de recuperación del 97.24%
- Las pruebas de lixiviación demostraron que la concentración de Cianuro optimo es de 2g/L justificando estadísticamente el aumento de 0.5485 %, a 0.6895%.
- El uso de nitrato de plomo como catalizador en el proceso de cianuración es efectivo cuando este se trabaja a un Ph 10.5, aumentando la recuperación de oro hasta 97.24%.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el uso de nitrato de plomo en el proceso de cianuración de minerales de oro refractario de manera continua y a gran escala. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales indican que esta adición mejora significativamente la recuperación de oro, lo que puede traducirse en mayores ganancias para la cooperativa minera.
- Es importante llevar a cabo un monitoreo constante de los parámetros de operación, como la concentración de nitrato de plomo, cianuro de sodio y pH, para asegurar que se mantengan en los niveles óptimos determinados en este estudio. Esto garantizará una eficiente recuperación de oro y minimizará cualquier impacto negativo en el medio ambiente.
- Se sugiere realizar investigaciones adicionales para evaluar la viabilidad de utilizar otros aditivos o catalizadores en el proceso de cianuración de minerales de oro refractario. Esto permitirá explorar otras alternativas que puedan mejorar aún más la recuperación de oro y optimizar los procesos de tratamiento y recuperación en la Cooperativa Minera Cecomirl Ltda.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antony, J. (2003). Fundamentals of design of experiments. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, 6–16.
- Arce, V. A., Falcón, R. C., Santibañez, L. P., & Dávila, D. L. (2005). Refractariedad de concentrados auríferos. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 8(16), 5–14.
- Barsky, G., Swainson, S. J., & Hedley, N. (1934). Dissolution of gold and silver in cyanide solutions. *Trans. AIME*, 112, 660–677.
- Bosqui, F. L. (1950). Dorr: Cyanidation and concentration for gold and silver ores. *McGrall-Hill, New York*.
- Cáceres, G. (1993). Cianuración de minerales de oro. *Seminario Presentado En La Universidad de Chile, Santiago*.
- Chambi Viraca, L. C. (2010). GOLD AND SILVER RECOVERY BY A ZADRA TYPE ELECTROLYTIC PROCESS. *Revista Institucional de Ciencias, Tecnología e Innovación Investig@ UMSA*, 1, 31.
- Chimenos, J. M., Segarra, M., Guzman, L., Karagueorguieva, A., & Espiell, F. (1997). Kinetics of the reaction of gold cyanidation in the presence of a thallium (I) salt. *Hydrometallurgy*, 44(3), 269–286.
- Chok, J. T., Harper, J. M., & Luiselli, J. K. (2005). *Introduction to functional analysis*.
- Deitz, G. A. (1952). *The reaction of silver with cyanide solutions under oxygen pressure*. University of British Columbia.
- Deschênes, G. (2016). Advances in the cyanidation of gold. In *Gold Ore Processing* (pp. 429–445). Elsevier.
- Deschenes, G., Lastra, R., Brown, J. R., Jin, S., May, O., & Ghali, E. (2000). Effect of lead nitrate on cyanidation of gold ores: progress on the study of the mechanisms. *Minerals Engineering*, 13(12), 1263–1279.



- Deschênes, G., Xia, C., Fulton, M., Cabri, L. J., & Price, J. (2009). Evaluation of leaching parameters for a refractory gold ore containing aurostibite and antimony minerals: Part I—Central zone. *Minerals Engineering*, 22(9–10), 799–808.
- Diez Canseco, E. (1974). *Metalurgia del oro y la plata*.
- Domic Mihovilovic, E. (2001). M. Lixiviación de Metales. *Hidrometalurgia Fundamentos, Procesos y Aplicaciones. Santiago de Chile: Null*, 187–222.
- Egan, J., Bazin, C., & Hodouin, D. (2016). Effect of particle size and grinding time on gold dissolution in cyanide solution. *Minerals*, 6(3), 68.
- Escalante, V., Domínguez, J. D., López, J. A. D., Botero, G. J., Paenza, A., Botero, G. J., Solomons, G., Anton, H., Rorres, C., & Anton, H. (2014). Diseño y análisis de experimentos. *Editorial Limusa*.
- Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial*.
- Gutiérrez Pulido, H. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*.
- Habashi, F. (1967). *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*. Montana College of Mineral Science and Technology Butte.
- Janin, L. (1892). *Cyaniding Gold and Silver Min*. Ind.
- Maclaurin, J. S. (1895). XXII.—Action of potassium cyanide solutions on New Zealand gold and silver. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 67, 199–212.
- Marsden, J., & House, I. (2006). *The chemistry of gold extraction*. SME.
- Mina, J. A., & Mercado, R. P. (1995). Optimización por Diseños Experimentales. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC, Impreso En Lima-Perú*.
- Montgomery, D. C., & Verbeek, D. V. (2004). *Control estadístico de la calidad* (Issue 658.562 M66 2004.). Limusa Wiley.
- Nagy, I., Mrkusic, P., & McCULLOCH, H. W. (1993). *Tratamiento químico de menas refractarias de oro*. Eduniversity.
- Peñate Zúñiga, Y. (2004). Desarrollo de Correlaciones entre Mineralogía y Extracción de Oro en Minerales Auríferos Mediante Datos de Lixiviación Diagnostico. *Postgrado*



En Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander. UIS. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga, 36–84.

Pietsch, H. B., WM, T., & GH, R. (1983). *Research of pressure leaching of ores containing precious metals.*

Rojas Reyes, N. R. (2003). *Recuperación de oro y plata desde residuos ferríticos mediante cianuración.*

Rose, T. K., & Newman, W. A. C. (1898). *The metallurgy of gold: London. Charles Griffin and Co., Ltd.*

Samikhov, S. R., Zinchenko, Z. A., & Bobokhonov, B. A. (2012). Kinetics of cyaniding of gold comprising ores. *Izvestiya Akademii Nauk Tadzhikskoj SSR. Otdelenie Fiziko-Matematicheskikh, Khimicheskikh i Geologicheskikh Nauk*, 1(146), 85–91.

Suero Iquiapaza, P. A. (2018). *Introducción a la hidrometalurgia.*

Varela, P. D. M., & Reyes, A. M. L. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados. *Scientia et Technica*, 1(47), 101–106.

Vargas Gallardo, J. (1981). *Metalurgia del oro y la plata.* Editorial San Marcos, Lima.

Xue, T., & Osseo-Asare, K. (1985). Equilibrio Heterogéneo en los Sistemas Au-CN-H₂O y Ag-CN-H₂O. *Metallurgical Transactions B*, 16.

Yannopoulos, J. C. (2012). *The extractive metallurgy of gold.* Springer Science & Business Media.



ANEXOS

ANEXO N° 1: ANÁLISIS DE ORO

1. En los crisoles de arcilla se coloca la muestra para ser analizada.
2. Cabeza y relave 20 g Concentrado 5 g
3. Se agrega a cada uno de ellos la siguiente mezcla fundente: 2 cucharaditas cuando se trata de cabeza y relave y 1 cucharadita cuando se trata de concentrado.
4. Se añade una pizca de pizca de nitrato de plata. 4.- Se agrega $\frac{1}{4}$ de cucharadita de harina.
5. Se mezcla todo el contenido para homogenizar.
6. Se agrega una cucharadita de litargirio puro de modo que cubra todo el contenido.
7. Se adiciona mezcla fundente de manera que cubra todo el contenido anterior. 8.- Se añade $\frac{1}{4}$ de cucharadita de sal.
8. Luego, se coloca los crisoles en la mufla la cual debe estar a 900 °C.

FUNDICION EN LA MUFLA

1. Los crisoles permanecen en la mufla hasta que su contenido haya fundido del todo, esto ocurre aproximadamente de 25 a 30 min.
2. Ocurrido esto, se procede a retirar en orden los crisoles de la mufla y sus contenidos se vacían en la lingotera.
3. Una vez solidificado los contenidos en la lingotera, mediante golpes son desprendidos y se llevan para separar la escoria del regulo.

COPELACIÓN

1. Las copelas se introducen en la mufla y deben calentar hasta el rojo blanco.
2. Los régulos obtenidos se colocan en orden en sus respectivas copelas para volatilizar el plomo.
3. Conforme se volatiliza el plomo el círculo que se observa decrece hasta el punto en que desaparece.

SEPARACION DE ORO

1. El glóbulo obtenido se limpia y se coloca en un crisol de porcelana.
2. Se agrega ácido nítrico (100 ml de ácido en 400 ml de agua). Para separar la plata en forma de solución y se lava dos veces con agua destilada fría.



3. Una vez lavado se agrega unas gotas de ácido nítrico para ir sacando las impurezas que todavía contenga.
4. Se desecha el ácido nítrico y se lava nuevamente dos veces.
5. Se seca y se pesa en la balanza analítica de precisión.



ANEXO N° 2: DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIÓN MÉTODO CHIDDY

El método de Chiddy es un método gravimétrico para determinar el oro en soluciones cianuradas. Este método se basa en la reacción del oro con el zinc para formar un precipitado de oro-zinc. El precipitado se separa por centrifugación y se pesa para determinar la cantidad de oro presente.

Materiales:

- Balanza
- Centrifuga
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL
- Bureta de 50 mL
- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Solución de cianuro de sodio 0,1 M
- Solución de zinc metálico
- Solución de ácido clorhídrico 1 M
- Solución de indicador de ferrocianuro de potasio
- Muestra de solución cianurada

Procedimiento:

- Pese 5 g de muestra de solución cianurada en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Adicione 50 mL de agua destilada al matraz Erlenmeyer.
- Adicione 5 mL de solución de cianuro de sodio 0,1 M al matraz Erlenmeyer.
- Adicione 5 mL de solución de zinc metálico al matraz Erlenmeyer.
- Caliente el matraz Erlenmeyer a 80 °C durante 15 minutos.
- Centrifugue la solución durante 5 minutos a 1000 rpm.
- Retire el precipitado de la centrífuga y séquelo a 100 °C durante 30 minutos.
- Pesa el precipitado de oro-zinc.

Cálculo:

El contenido de oro en la solución se puede calcular utilizando la siguiente **fórmula**:

$$\% \text{ Au} = (m * 197) / (V * M)$$

donde:



- m es la masa del precipitado de oro-zinc (g)
- 197 es el peso atómico del oro (g/mol)
- V es el volumen de la solución cianurada (mL)
- M es la molaridad de la solución de cianuro de sodio (mol/L)

Ejemplo:

Masa del precipitado de oro-zinc = 0,5 g

Volumen de la solución cianurada = 50 mL

Molaridad de la solución de cianuro de sodio = 0,1 M

$$\% \text{ Au} = (0,5 \text{ g} * 197) / (50 \text{ mL} * 0,1 \text{ M})$$

$$\% \text{ Au} = 19,7\%$$

Conclusiones:

El método de Chiddy es un método sencillo y preciso para determinar el oro en soluciones cianuradas. Sin embargo, es importante seguir los procedimientos adecuados para minimizar los errores potenciales.



ANEXO N° 3: DETERMINACION DE CIANURO LIBRE Y TOTAL DE SOLUCIONES CIANURADAS

MATERIALES

- 1 bureta de 25 ml.
- 2 erlenmeyer de 200 ml.
- 2 vasos de precipitación de 400 ml.
- 1 varilla de vidrio.
- Soporte para bureta.

CIANURO LIBRE

REACTIVOS

- Nitrato de Plata (AgNO_3), solución estándar (4,33 gr. /Lt)
- Agua destilada 1 litro

PROCEDIMIENTO

Se toma 25 ml de muestra a analizar en un erlenmeyer seco, se titula con la solución estándar de nitrato de plata hasta que la brillantez original de la solución se vea apagada por una bruma azulada.

1 ml de la solución estándar = 0,01% de cianuro de sodio (NaCN) ml de solución estándar
* 0,2 = lbs. Cianuro de sodio/ ton de solución

lbs. de cianuro de sodio/ton de solución / 2,205 = Kg. De cianuro de sodio/ ton de solución

CIANURO TOTAL

REACTIVOS

- Nitrato de Plata (AgNO_3) , solución estándar (4,33 gr. /Lt)
- Solución alcalina de yoduro de potasio (KI)
- Agua destilada 1 litro

PROCEDIMIENTO

Se toma 25 ml de muestra a analizar en un vaso de 400 ml, se le añade 4 ml de yoduro de potasio como indicador, se titula con la solución estándar de nitrato de plata hasta que aparezca una opalescencia amarilla en la solución al finalizar la titulación.



1 ml de la solución estándar de nitrato de plata = 0,01 % de cianuro de sodio

(NaCN) ml de nitrato de plata * 0,2 = lbs. de cianuro de plata/ ton de solución

lbs. de cianuro de sodio/ton de solución / 2,205 = Kg. De cianuro de sodio/ ton de solución.



ANEXO N° 4: DETERMINACION DE ALCALI LIBRE (CaO) O PROTECTOR

El procedimiento para determinar el álcali libre (CaO) consiste en la reacción del carbonato de calcio con ácido clorhídrico para formar cloruro de calcio y dióxido de carbono. El dióxido de carbono se libera en forma de gas, mientras que el cloruro de calcio se precipita en forma de sólido blanco. La cantidad de cloruro de calcio precipitado es proporcional a la cantidad de carbonato de calcio presente, por lo que se puede utilizar para determinar el contenido de álcali libre.

Materiales:

- Balanza
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL
- Bureta de 50 mL
- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Solución de ácido clorhídrico 0,1 M
- Solución de indicador de fenolftaleína
- Muestra de mineral

Procedimiento:

- 1) Pese 0,5 g de muestra de mineral en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- 2) Agregue 50 mL de agua destilada al matraz Erlenmeyer.
- 3) Adicione 2 gotas de solución de indicador de fenolftaleína al matraz Erlenmeyer.
- 4) Titule la solución con ácido clorhídrico 0,1 M hasta que la solución cambie de color de rosa a incoloro.
- 5) Registre el volumen de ácido clorhídrico consumido.

Cálculo:

El contenido de álcali libre (CaO) se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\% CaO = (V * M * 40) / (m * 1000)$$

Donde:

- V es el volumen de ácido clorhídrico consumido (mL)
- M es la molaridad del ácido clorhídrico (mol/L)
- 40 es el peso molecular del carbonato de calcio (g/mol)



- m es la masa de la muestra de mineral (g)

Ejemplo:

Volumen de ácido clorhídrico consumido = 20 mL

Molaridad del ácido clorhídrico = 0,1 M

Masa de la muestra de mineral = 0,5 g

$$\% \text{CaO} = (20 \text{ mL} * 0,1 \text{ mol/L} * 40 \text{ g/mol}) / (0,5 \text{ g} * 1000)$$

$$\% \text{CaO} = 1,6\%$$

Conclusiones:

El procedimiento para determinar el álcali libre es un método sencillo y preciso que se puede realizar en el laboratorio. Sin embargo, es importante seguir los procedimientos adecuados para minimizar los errores potenciales.

Errores potenciales:

- **Error de pesaje:** El error de pesaje es el error más común en la determinación del álcali libre. Para minimizar este error, es importante utilizar una balanza calibrada y pesar la muestra de mineral en condiciones similares.
- **Error de titulación:** El error de titulación es el error que se produce al determinar el punto final de la titulación. Para minimizar este error, es importante utilizar un indicador de fenolftaleína de buena calidad y realizar la titulación con cuidado.
- **Error de cálculo:** El error de cálculo es el error que se produce al calcular el contenido de álcali libre. Para minimizar este error, es importante utilizar fórmulas correctas y realizar los cálculos con cuidado.

Recomendaciones:

- Se recomienda utilizar una balanza de precisión para pesar la muestra de mineral.
- Se recomienda utilizar un indicador de fenolftaleína de buena calidad para la titulación.
- Se recomienda realizar la titulación con cuidado para obtener un punto final preciso.
- Se recomienda utilizar fórmulas correctas para calcular el contenido de álcali libre.





ANEXO N° 5: DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL MINERAL

El método de la fiola es un método sencillo y preciso para determinar la gravedad específica del mineral. Este método se basa en el principio de Arquímedes, que establece que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del fluido desalojado.

Materiales:

- Fiola de vidrio
- Balanza
- Agua destilada
- Mineral

Procedimiento:

- 1) Pese la fiola vacía y registre el peso.
- 2) Llene la fiola con agua destilada y pese nuevamente.
- 3) Retire el agua de la fiola y enjuáguela con agua destilada.
- 4) Agregue una pequeña cantidad de mineral a la fiola y pese nuevamente.
- 5) Calcule la gravedad específica del mineral utilizando la siguiente fórmula:

$$G.E = \frac{M-P}{[W+(M-P)-S]}$$

Donde:

P = Peso de la fiola en gramos.

M = Peso de la fiola más mineral en gramos.

W = Peso de la fiola más agua en gramos.

S = Peso de la fiola más mineral y agua en gramos.

G.E. = Gravedad específica.

Errores potenciales:

- **Error de pesaje:** El error de pesaje es el error más común en la determinación de la gravedad específica del mineral. Para minimizar este error, es importante



utilizar una balanza calibrada y pesar el mineral y la fiola en condiciones similares.

- **Error de medición del volumen:** El error de medición del volumen es menor que el error de pesaje, pero aún puede ser significativo. Para minimizar este error, es importante utilizar una fiola de vidrio de precisión y medir el volumen del mineral con cuidado.
- **Error de contaminación:** El mineral puede contaminar la fiola, lo que puede afectar la medición de la gravedad específica. Para minimizar este error, es importante enjuagar la fiola con agua destilada después de cada medición.

Recomendaciones:

- Se recomienda utilizar una fiola de vidrio de 50 mL.
- Se recomienda utilizar agua destilada para llenar la fiola. El agua destilada no contiene impurezas que puedan afectar la medición de la densidad.
- Se recomienda pesar el mineral y la fiola a temperatura ambiente. La temperatura afecta la densidad del agua y del mineral.

Conclusiones:

El método de la fiola es una técnica sencilla y precisa para determinar la gravedad específica del mineral. Sin embargo, es importante seguir los procedimientos adecuados para minimizar los errores potenciales.

Procedimiento detallado:

- 1) Pesar la fiola vacía: Coloque la fiola vacía en la balanza y registre el peso.
- 2) Llenar la fiola con agua destilada: Llene la fiola con agua destilada hasta que el menisco esté al ras del borde.
- 3) Pesar la fiola llena de agua: Coloque la fiola llena de agua en la balanza y registre el peso.
- 4) Vaciar la fiola: Vacíe la fiola con agua destilada.
- 5) Agregar el mineral: Agregue una pequeña cantidad de mineral a la fiola.
- 6) Pesar la fiola con el mineral: Coloque la fiola con el mineral en la balanza y registre el peso.
- 7) Calcular la gravedad específica: Utilice la siguiente fórmula para calcular la gravedad específica del mineral.

Ejemplo:



Datos:

P_{min}: = 5

P: Peso de la fiola en gramos = 59

M: Peso de la fiola mas mineral en gramos = 64

W: Peso de la fiola más agua en gramos = 159

S: Peso de la fiola mas mineral y agua en gramos = 162.15

$$G.E = \frac{M-P}{[W+(M-P)-S]}$$

$$G.E. = \frac{64 - 59}{159 + (64 - 59) - 162.15} = 2.70 \text{ g/cm}^3$$

G.E.: Gravedad especifica = 2.70 g/cm³



ANEXO N° 6: % SOLIDOS SECOS A PARTIR DE LA DENSIDAD DE PULPA

Datos: $W = 1250 \text{ g/ cm}^3$

$G.E. = 2.70 \text{ g/ cm}^3$

$$K = \frac{G.E-1}{G.E} = ((2.7 - 1)/2.7) = 0.629$$

$$\% S = \frac{W-1000}{WK} * 100 = ((1250-1000)/(1250*0.629)) = 32\%$$

$\%S = 32\%$ solidos secos

ANEXO N° 8: Fotos de los equipos utilizados en las pruebas de laboratorio.



Figura 33. Preparando la muestra de mineral.



Figura 34. Realizando la colada para análisis por ensayo al fuego.



Figura 35. Canal por donde pasa el relave.

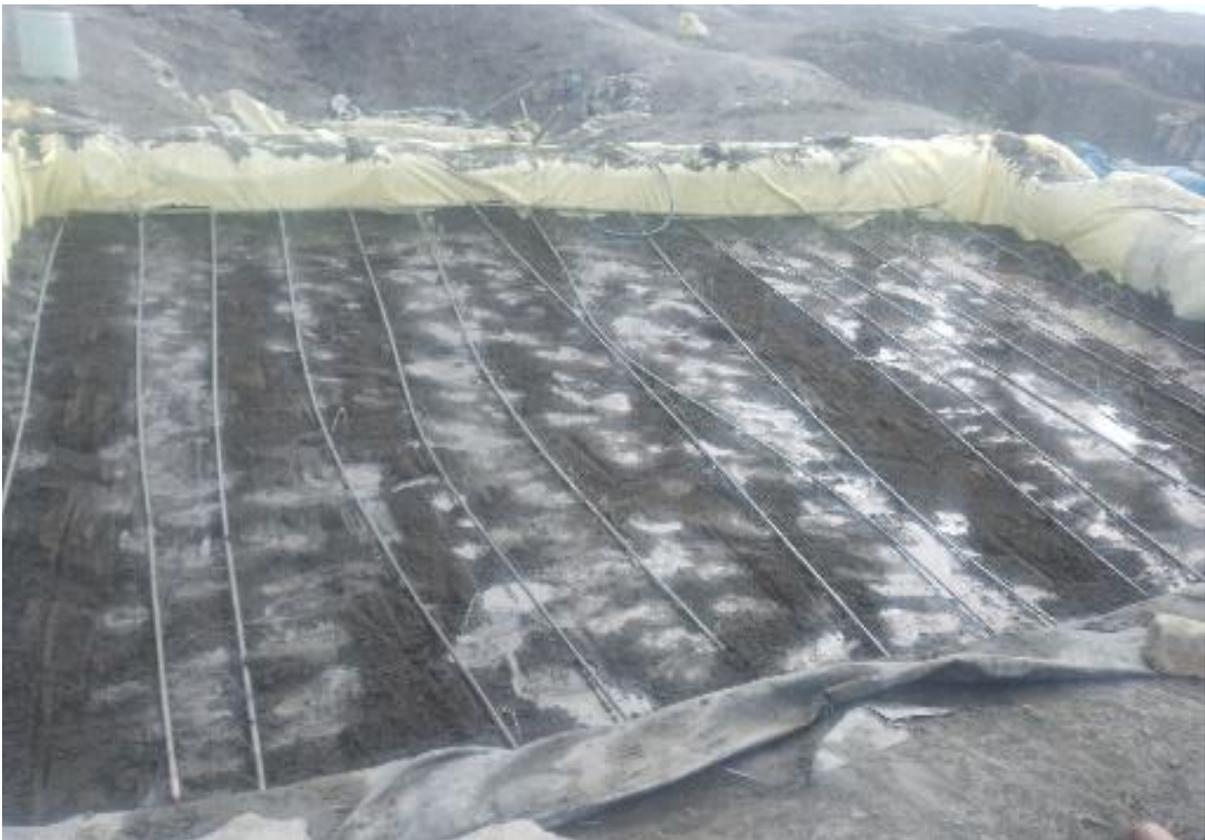


Figura 36. Riego con solución de NaCN y NaOH.



Figura 37. Toma de muestra de carbón activado.



Figura 38. Cosecha de Carbón Activado.



Figura 39. Cosecha de lana de Acero.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Juan Carlos Angles Betancurt
identificado con DNI 46627362 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional. Programa de Segunda Especialidad. Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Metalúrgica

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Evaluación de la cianuración con adición de nitrato de plomo en mineral
de oro refractario para mejorar la recuperación en la cooperativa minera (Cocomiv) S.A.S.
" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 04 de diciembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Juan Carlos Angles Betancurt
identificado con DNI 46627362 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Metalúrgica

.informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Evaluación de la lianuvación con adición de nitrato de plomo en mineral de oro refractario para mejorar la recuperación en la cooperativa minera ceromiel l.t.d.a

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 04 de Diciembre del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella