



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**RECUPERACIÓN DE ORO DEL RELAVE DE FLOTACIÓN
MEDIANTE LA CIANURACIÓN EN LA PLANTA DE BENEFICIO**

BELEN – AREQUIPA

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ALEXANDER PARI ACHATA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

**RECUPERACIÓN DE ORO DEL RELAVE DE
FLOTACIÓN MEDIANTE LA CIANURACIÓN
EN LA PLANTA DE BENEFICIO BELEN -
AREQUIPA**

AUTOR

ALEXANDER PARI ACHATA

RECUENTO DE PALABRAS

15817 Words

RECUENTO DE CARACTERES

78517 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

97 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

14.5MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 12, 2023 6:14 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 12, 2023 6:16 PM GMT-5

● **2% de similitud general**

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

- 2% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% 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)


Msc. Julio Alberto Tapuyera Gil
ASESOR


V.B. 
Dra. Darsy Argélida Carpio Ramos
Directora de la Unidad de Investigación
EPIM



DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis padres, quienes han sido mi fuente constante de inspiración y fortaleza a lo largo de mi vida. Su amor, sacrificio y apoyo incondicional me han guiado en cada paso de mi camino académico. Todo lo que he logrado es un testimonio de su inquebrantable confianza en mí. A ustedes, mi eterno agradecimiento y amor.

Alexander



AGRADECIMIENTO

- Agradezco sinceramente a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y a mis profesores, por su orientación experta y sabiduría compartida, que han sido los pilares de mi formación académica.
- También quiero expresar mi gratitud a mis amigos y compañeros de clase, quienes han compartido este viaje conmigo, brindando apoyo, ánimo y risas en los momentos más desafiantes.
- Agradezco a los ingenieros de Minera Titan Del Peru S.R.L quienes contribuyeron a este logro, les estoy agradecido profundamente por su generosidad, paciencia y aliento.

Alexander



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1. Problema general.....	16
1.2.2. Problema específico	16
1.3. JUSTIFICACIÓN	16
1.4. OBJETIVOS.....	17
1.4.1. Objetivo general.....	17
1.4.2. Objetivos específicos	17
1.5. HIPÓTESIS	18
1.5.1. Hipótesis generales	18
1.5.2. Hipótesis específicas	18

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1.	ANTECEDENTES	19
2.2.	BASES TEÓRICAS	25
2.2.1.	El oro.....	25
2.2.2.	Cianuración	27
2.2.3.	Cianuración de oro	28
2.2.4.	Factores que afectan a la reacción de cianuración	33
2.2.5.	Cianuración de oro en relaves	37
2.2.6.	Adsorción	38
2.2.7.	Adsorción de oro con carbón activado.....	38
2.2.8.	Factores que afectan en la adsorción del oro	42
CAPITULO III		
MATERIALES Y MÉTODOS		
3.1.	ZONA DE ESTUDIO.....	45
3.1.1.	Ubicación	45
3.1.2.	Ubicación geográfica	45
3.1.3.	Acceso	46
3.1.4.	Clima y temperatura.....	47
3.1.5.	Flora y fauna	47
3.2.	METODOLOGIA	48
3.2.1.	Tipo de investigación	48
3.2.2.	Diseño de la investigación	48
3.2.3.	Población.....	48
3.2.4.	Muestra.....	48
3.3.	MATERIALES.....	49
3.3.1.	Materiales.....	49



3.3.2. Equipos.....	49
3.3.3. Reactivos.....	50
3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	50
3.4.1. Variable independiente	50
3.4.2. Variable dependiente.....	51
3.5. DISEÑO FACTORIAL	51
3.5.1. Matriz de diseño experimental.....	52
3.6. TÉCNICA E INSTRUMENTO DE RECOLECCION DE DATOS	53
3.7. PROCEDIMIENTO	53

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO DE CIANURACION DEL RELAVE DE FLORACION	55
4.1.1. Resultados de las 11 pruebas experimentales del diseño propuesto	55
4.1.2. Balance metalúrgico general de la flotación	73
4.1.3. Evaluación económica del proceso de cianuración de oro de los relaves de flotación.....	77
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
V. CONCLUSIONES.....	82
VI. RECOMENDACIONES	83
VII. REFERENCIAS.....	84
ANEXOS.....	90

Área : Metalurgia Extractiva

Tema : Procesos Metalúrgicos de Oro

Fecha de sustentación: 13 de setiembre del 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de lixiviación con cianuro de oro.....	30
Figura 2. Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones cianuradas	32
Figura 3. Diagrama de equilibrio potencial Eh-pH para el sistema Au – H ₂ O – CN ⁻ a 25 °C	32
Figura 4. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata	34
Figura 5. Ubicación de la planta concentradora.....	46
Figura 6. Procedimiento experimental	54
Figura 7. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 1	56
Figura 8. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 2	57
Figura 9. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 3	58
Figura 10. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 4	59
Figura 11. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 5	60
Figura 12. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 6	61
Figura 13. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 7	62
Figura 14. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 8	63
Figura 15. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 10	64
Figura 16. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 11	65
Figura 17. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 11	66
Figura 18. Comparación de los % de recuperación	67
Figura 19. Diagrama de Pareto Estandarizado para Recuperación de Au	70
Figura 20. Grafica de Efectos principales	71



Figura 21.	Superficie de respuesta	71
Figura 22.	Contorno de superficie de respuesta	72
Figura 23.	Comparación de ley de oro en el relave - 2022	76
Figura 24.	Comparación de la recuperación de oro con cianuración - 2022	76
Figura 25.	Molinos de bolas 5x10 ft – 5x8 ft de la planta flotación	93
Figura 26.	Circuito de flotación Celdas Sub-A 24x24.....	93
Figura 27.	Molinos de Bolas 6x6 ft – 5x6 ft – 5x8 ft del circuito de cianuración	93
Figura 28.	Tanques de cianuración	94
Figura 29.	Equipo de trabajo unidad Minera Titan del Perú S.R.L – Planta Belen....	94
Figura 30.	Diagrama de flujo Planta Belen.....	95



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Acceso a la ciudad de chala.....	46
Tabla 2. Operacionalización de Variables.....	51
Tabla 3. Matriz de experimentos para selección de variable.....	52
Tabla 4. Experimento numero 1	55
Tabla 5. Experimento numero 2	56
Tabla 6. Experimento numero 3	57
Tabla 7. Experimento numero 4	58
Tabla 8. Experimento numero 5	59
Tabla 9. Experimento numero 6	60
Tabla 10. Experimento numero 7	61
Tabla 11. Experimento numero 8	62
Tabla 12. Experimento numero 9	63
Tabla 13. Experimento numero 10	64
Tabla 14. Experimento numero 11	65
Tabla 15. Recuperación de oro	66
Tabla 16. Factores considerados para el análisis.....	67
Tabla 17. Análisis de varianza para porcentaje de recuperación.....	68
Tabla 18. Coeficiente de regresión para la recuperación.....	69
Tabla 19. Camino de Máximo Ascenso para Recuperación.....	72
Tabla 20. Balance metalúrgico Planta Belén– flotación (2021).....	74
Tabla 21. Balance metalúrgico Planta Belén– flotación (2022).....	74
Tabla 22. Balance metalúrgico Planta Belén– flotación – Cianuración de relaves (2022)	75



Tabla 25.	Resumen Tratamiento Relaves de Flotación por Cianuración	77
Tabla 26.	Costo cianuración de relaves año 2022	77
Tabla 27.	Costo operativo.....	78
Tabla 28.	Análisis de Rentabilidad, año 2022	78



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- m	: malla pasante
%	: Porcentaje
Eh	: Equilibrio potencial o diagrama potencial
°C	: Grados centígrados
NaCN	: Cianuro de sodio
KCN	: Cianuro de potasio
AgNO₃	: Nitrato de plata
KI	: Ioduro de potasio
g/L	: Gramos por litro
h	: Hora
mg/L	: Miligramos por litro
pH	: Potencial de hidrogeniones
ppm	: Partes por millón
TM	: Toneladas métricas
TMS	: Toneladas métricas solidas
km	: Kilómetros
kg	:Kilogramo
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
ml	: Mililitros
Tc	: Toneladas cortas
t	:Toneladas
Oz	: Onza



RESUMEN

La presente tesis titulada “RECUPERACIÓN DE ORO DEL RELAVE DE FLOTACIÓN MEDIANTE LA CIANURACIÓN EN LA PLANTA DE BENEFICIO BELEN – AREQUIPA” con el objetivo de recuperar el oro del relave de flotación mediante el proceso de cianuración en la planta de beneficio Belén – Arequipa. Donde se realizan bajas recuperaciones del oro, teniendo pérdidas en los relaves. Se realizó las pruebas experimentales de cianuración del oro a nivel laboratorio considerando los factores del tiempo, concentración de cianuro, densidad y granulometría. Obteniendo como resultado, tras el análisis estadístico, que los factores concentración de cianuro y granulometría influyentes en la recuperación del oro y tras el análisis de pendiente máximo ascenso manteniendo fijo en valor centrado el tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l se tuvo una recuperación máxima del 72.96% a una [NaCN] de 0.151 % y una granulometría de 85.0 % - m200. Por ende, aplicando los resultados a nivel laboratorio a escala industrial, el balance metalúrgico de la Planta de Beneficio Belén correspondiente al año 2022 indicó una recuperación máxima del Au del 94.44 % de una cantidad de 61 690.08 TMS de mineral tratado, el cual es superior a la recuperación del 85.7 % de Au del año 2021 de una cantidad de 57 128.33 TMS de mineral tratado. Concluyendo que tras la aplicación de los parámetros óptimos logrados a nivel laboratorio en la recuperación del oro de relave de flotación mediante la cianuración, la Planta de Beneficio Belén correspondiente al año 2022, tuvo una rentabilidad del 55,5 % y una utilidad del 1 303 344.27 dólares US \$, lo cual es beneficio para la planta.

Palabras Clave: Granulometría, Concentración, densidad, tiempo, recuperación de oro, relave de flotación.



ABSTRACT

This thesis entitled "RECOVERY OF GOLD FROM THE FLOATING TAILINGS THROUGH CYANIDATION AT THE BELEN - AREQUIPA BENEFIT PLANT" with the objective of recovering gold from the flotation tailings through the cyanidation process at the Belen - Arequipa beneficiation plant. Where low gold recoveries are made, having losses in the tailings. Experimental gold cyanidation tests were carried out at the laboratory level considering the factors of time, cyanide concentration, density and granulometry. Obtaining as a result, after the statistical analysis, the cyanide concentration and granulometry factors influencing the gold recovery and after the analysis of the maximum slope ascent, keeping the time centered at a fixed value of 24 hours and the density 1320 g/l, there was a maximum recovery of 72.96% at a [NaCN] of 0.151% and a granulometry of 85.0% - m200. Therefore, applying the results at the laboratory level to an industrial scale, the metallurgical balance of the Belén Beneficiation Plant corresponding to the year 2022 indicates a maximum recovery of Au of 94.44%, which is higher than the recovery of 85.9% of Au for the year 2021. Concluding that after the application of the optimal parameters achieved at the laboratory level in the recovery of gold from flotation tailings through cyanidation, the Belén Beneficiation Plant corresponding to the year 2022, it had a profitability of 55.5% and a profit of 1,303,344.27 US dollars, which is a benefit for the plant.

Keywords: Granulometry, concentration, density, time, gold recovery, flotation tailings.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación de relaves en el mundo actual es inmensa, ya que por cada tonelada de mineral procesado solo se extraen onzas o libras de metales. En 2022, se estimó que más de 14 mil millones de toneladas métricas de relaves mineros se produjeron por año en el mundo a partir de la extracción de metales y minerales (Cacciuttolo & Deyvis , 2022).

Actualmente, muchos problemas ambientales asociados con el manejo de relaves tanto en Chile como en Perú están relacionados con la posible contaminación del suelo, el agua (superficial/subterránea) y el aire. En años recientes, hubo avances significativos en las tecnologías de deshidratación de relaves (Cacciuttolo & Deyvis , 2022; Menéndez & Muñoz, 2021). En ese sentido, uno de los problemas en la explotación de recursos mineros en el Perú son los tratamientos de relaves, debido a que algunas compañías mineras grandes o pequeñas no le toman en cuenta y no tienen conciencia, generando daños al medio ambiente, así como a las mismas compañías mineras, agravando los derechos de los ciudadanos debido a la contaminación de aire, suelo y agua que causa un grave impacto al entorno. En ese sentido, los problemas globales sobre el medio ambiente que dañan a la tierra son el calentamiento global, cambio del clima, pérdida biológica y degradación del suelo (Rodríguez Romaní, 2019).

En la Unidad minera Minera Titán del Perú S.R.L en la planta de beneficios Belen-Arequipa, no se realiza el tratamiento de sus relaves de flotación que genera problemas ambientales y genera pérdidas económicas para la compañía, dándonos a conocer que



gran parte del metal valioso (oro) se está perdiendo en los relaves a falta de la implementación de recuperación del oro del relave; por ende, la finalidad de la investigación, fue recuperar el oro del relave de flotación mediante el proceso de cianuración en la Planta de Belen – Arequipa, optimizando parámetros de tiempo, concentración de cianuro, densidad y granulometría. Estos resultados contribuirán a la compañía a una buena rentabilidad tras la aplicación del proceso de cianuración en la planta con los parámetros optimizados en la investigación a nivel laboratorio.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Será posible recuperar el oro del relave de flotación mediante el proceso de cianuración en la planta de beneficio Belen – Arequipa

1.2.2. Problema específico

- ¿Cuáles son las variables del proceso de cianuración del relave de flotación que mejore la recuperación de oro?
- ¿Cuál es el aporte de la recuperación en el balance metalúrgico general de la flotación?
- ¿Cuál es la viabilidad económica del proceso de cianuración de oro de los relaves de flotación?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La Unidad minera Minera Titán del Perú S.R.L cuenta con una buena reserva de minerales, que tras el proceso de flotación el relave presenta una ley de oro elevado mayor al 0.92 g/t que se estaría perdiendo, con una recuperación del solo 85% del Au. El cual genera pérdidas económicas a la compañía minera. Siendo necesario un proceso de



recuperación del Au del relave, motivo por el cual se lleva a cabo la presente investigación para optimizar los parámetros de cianuración.

Por lo tanto, se espera optimizar las variables en la cianuración y beneficiar la recuperación del Au a nivel laboratorio para aplicar a nivel industrial; por ende, la investigación es relevante ya que está orientado a maximizar la recuperación del Au del relave de flotación.

En la parte económica, los resultados de la investigación incrementarán los ingresos de la Planta Belén, debido al aumento de la recuperación de Au, mediante la aplicación de cianuración en el relave de flotación que implicará una mayor producción de Au y una buena rentabilidad a la empresa.

Finalmente, de la viabilidad de la cianuración en el relave de flotación de oro, para su recuperación se acondicionaría la planta con su implementación y funcionamiento y con ello generar una fuente de trabajo para los habitantes de la región.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Recuperar el oro del relave de flotación mediante el proceso de cianuración en la planta de beneficio Belén – Arequipa.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables del proceso de cianuración del relave de flotación que mejore la recuperación de oro.
- Determinar el aporte de la recuperación en el balance metalúrgico general de la flotación.



- Formular la viabilidad económica del proceso de cianuración de oro de los relaves de flotación.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis generales

Es posible alcanzar la mayor recuperación de oro del relave de flotación mediante el proceso de cianuración en la planta de beneficio Belen – Arequipa.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Es posible identificar las variables del proceso de cianuración del relave de flotación que mejore la recuperación de oro.
- Es posible determinar el aporte porcentual en el balance metalúrgico general de la flotación.
- Es posible formular la viabilidad económica del proceso de cianuración de oro de los relaves de flotación.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Se describieron los antecedentes tanto nacionales e internacionales que se utilizaron como referencia para la ejecución de la presente investigación fueron las siguientes:

Respecto a los antecedentes nacionales se tiene a Chilón y Mejía (2018) en su tesis tuvieron como fin que mediante procesos por los cuales buscaron recuperar el oro y plata del relave que está en la zona de Calpa en Arequipa, en su diseño experimental los procesos llevados a cabo fueron la flotación, la biolixiviación y la cianuración, tomaron como referencia a una población en donde realizaron calicatas, es por ello que tomaron por muestra a 50 kg y posterior homogenizado y cuarteado tuvo 25 kg donde se realizaron todas las pruebas. Por lo que se demostró como resultados que las posibilidades de recuperar estos minerales son muy altas por los procesos de flotación, la biolixiviación y cianuración. La prueba que más destaco por sus resultados positivos fue usando una dosis de 70 g/t de xantato Z-11 realizado por el proceso de flotación, resultando en el concentrado a 19.72 gr/TM y la mayor recuperación de oro fue de 96.31 %. Llevando a cabo una remolienda el concentrado biolixiviado con el fin de evaluar sus parámetros se obtuvo que respecto a una granulometría de 90.1% - 200m, teniendo en cuenta la cianuración por un tiempo a 36 horas, se tuvo una recuperación de 95.38 % de oro; por último, la cianuración con una remolienda se obtuvo 95.38 % de Au a 36 h, granulometría 83.29% -200 malla y 4,15 kg/t.



En su investigación Rodríguez (2019) tuvo como finalidad de recuperar el Au a partir de relaves mediante lixiviación utilizando bateas en una minera de oro en la región de Puno, donde la empresa tiene baja recuperación de Au, con 5.3g/t de ley de cabeza y relave de 2.5 g/t generando pérdidas a la unidad minera. En su diseño experimental propuso 8 experimentos evaluando en niveles máximo y mínimo los factores de granulometría, concentración del cianuro y el tiempo. Como resultado óptimo tuvo el experimento 8 con una concentración de cianuro de 0.2 g/l; 0.63 mm malla # 30 de granulometría y 10 días de tiempo; con una recuperación de Au del 79.8% beneficiando a la unidad minera. El autor concluye que la recuperación de Au del 79.8% del relave en la Unidad Minera fue obtenido con los parámetros evaluados, considerados óptimas.

También se tiene a Vilcapoma (2021) en su tesis el cual busco como propósito determinar y mejorar los procesos llevado por cianuración para la recuperación de minerales en este caso para el oro por medio del método de diseño central compuesto 2^k con puntos centrales, con lo cual se basó como modelo de una metodología de tipo experimental, cuantitativa, como muestra se basó en un muestreo sistemático el cual se llevó a cabo en el ingreso de área de chancado de la planta, las variables evaluadas fueron: pH, % sólidos, [NaCN], tamaño de partícula y tiempo. Para lo cual tuvo como resultados respecto al grado de influencia que tuvo sobre la lixiviación está en primer lugar al factor tiempo, tamaño, concentración de NaCN, pH y % sólido. En conclusión, se logró una máxima recuperación fue 90.49 % de Au a las condiciones de pH = 10, 735.85 mg/l de [NaCN], tiempo de 24h y 35% de sólidos.

Rojas y Villanueva (2018) en su trabajo tuvieron como propósito de evaluar técnica y económicamente para la obtención de Au de la cancha de relaves por parte de una compañía minera en la Libertad específicamente; además busca la evaluación de que método es el cual sería el mejor para la recuperación del mineral viéndolo desde la



perspectiva de la metalurgia y la viabilidad del proyecto, para lo cual trabajaron mediante un modelo de metodología de diseño experimental, así como de enfoque cuantitativo y cualitativo, la muestra que trataron fue aproximadamente de 164 kg procedentes de la cancha de relave, previamente seleccionados según la afinidad. De este modo tuvieron el extracto de su trabajo que la recuperación del mineral el método o técnica más viable se da mediante una prueba de concentración mixta, consecuentemente la cianuración de las colas con un nivel de concentración de cianuro al 0.13% para de este modo recuperar un 46.15% de Au, de manera total logrando un 84% de recuperación. Se su evaluación económica para la recuperación de Au estimó en 8 510 481,79 soles con una TIR 80.24 e IR 179.60%. Concluyendo de la evaluación económica como positivos, haciendo viable el desarrollo del proyecto.

Cutti (2021) se propuso identificar las variables más relevantes en la optimización de la cianuración para mejorar la recuperación de Au en la Compañía Minera Horizonte S.A. El enfoque de investigación utilizado fue de tipo cuantitativo y experimental. Los resultados principales revelaron que, utilizando una malla Tyler -400 y durante 24 horas con una solución barren que contiene una concentración de NaCN del 0,0750%, se logró una extracción de Au del 63.50%. Además, se registró un consumo de 0.43 kg de NaCN /TM y 0.72 kg de óxido de calcio/TM. Por otro lado, observó que utilizando una granulometría + m-100, que equivale a una abertura mayor a 147 micrones, se alcanzó la mayor extracción de oro, con un porcentaje del 72,92% en un tiempo de cianuración de 24 horas y una concentración de NaCN del 0,0750%. El análisis también señaló que el factor tiempo fue el más significativo en la obtención de Au en las muestras repulpadas con agua reciente, liquido de flotación y unas partículas de m-400. En conclusión, los resultados del estudio demostraron la importancia de la optimización de la cianuración para mejorar significativamente la recuperación de oro en la unidad minera.



Chávez y Ramírez (2020) tuvieron como finalidad evaluar la recuperación de minerales de Au y plata (Ag) a través de la cianuración en Ayacucho, para este fin se basó en una metodología de tipo cuantitativa, así como un diseño experimental, se dice que también fu de tipo aplicada, para lo cual trabajaron con una muestra de 6 compositor de taladras de perforación los cuales esta etiquetados entre M-01 al M-06. Como resultado, la obtención de Au y Ag a una granulometría p80 de m-200, 500 mg/l de [CN] incrementó a 86.5 y 78.5 %, respectivamente. Concluyendo estos parámetros los ideales para la mejora de la recuperación de los minerales.

Por otro lado, respecto a lo antecedentes internaciones se tiene a Ruiz et al. (2019) en su artículo realizó la evaluación de las circunstancias adecuadas para una eficiente recuperación del Au mediante un análisis factorial 2k en el proceso de la cianuración, para ello trabajó tomando como referencia a 120 kg de este mineral, todo esto fue realizado en una vereda de Santa Cruz. Mostrando como resultados que presenta una gran lixiviabilidad en cianuro representando una obtención del mineral en 89.35%, además, aseguro que el diseño experimental estadístico como ayuda a establecer las condiciones óptimas del proceso de cianuración, por eso a través del diseño estadístico se logró establecer los parámetros ideales para la máxima recuperación del oro, con granulometría -200 mallas Tyler, [NaCN] de 2.5 g/m³ y un tiempo de 7 h.

Herrera (2022) en la tesis su propósito principal fue lograr una elevada recuperación de Au y reducir el impacto medioambiental en comparación con el proceso de amalgamación. Para ello se trabajó mediante un diseño experimental, así como un enfoque cuantitativo, también se mencionó que es el tipo aplicada, en este caso se dice que se trabajó con una muestra de 40 kilogramos de mineral de veta proveniente de la mina de la municipalidad de Andes, Antioquia. Los hallazgos revelaron que el mineral estudiado tenía un tenor de oro de 14 gramos por tonelada, lo cual indica su potencial



para la extracción de oro. Mediante la representación geoquímica y la prueba al fuego, se determinaron los tenores de oro en los concentrados, mixtos y colas obtenidos en la mesa Wilfley, los cuales fueron de 51 gramos por tonelada, 10,3 gramos por tonelada y 5,8 gramos por tonelada, respectivamente. Al analizar el proceso de cianuración, se observó que 4, 6, 8 y 16 horas de tiempos de lixiviación se producían la recuperación del Au muy cercano cuando se utilizaban [NaCN] de 2,5 o 5 kg por tonelada. Según el análisis estadístico, se concluyó que, a nivel industrial, sería más beneficioso emplear una concentración de cianuro de 2,5 kg por tonelada y un tiempo de lixiviación de 4 horas, ya que esto implicaría un menor consumo de reactivos, un tiempo de lixiviación más corto, menor consumo de energía y, por ende, mejores resultados económicos. En resumen, el autor propuso una alternativa al proceso de amalgamación al caracterizar y modelar estadísticamente la cianuración de un mineral aurífero en el municipio de Andes. Los resultados indicaron que se pueden lograr altas recuperaciones de oro al utilizar una concentración de cianuro de 2,5 kg por tonelada y un tiempo de lixiviación de 4 horas, lo cual conlleva beneficios económicos y ambientales.

Ichau (2019) en su trabajo de investigación tuvo como meta principal a definir los parámetros ideales para el proceso de extracción de oro en Argentina, por el cual tuvo como objetivo principal establecer los parámetros óptimos de en el proceso de extracción de oro para una muestra de mina proveniente de Buenos Aires, para ello trabajo con una metodología de tipo cuantitativa así como un diseño experimental además de un nivel explicativo, además de mencionar que se trabajó como referencia a 20 Kg de mineral. Se dedujo que para la mejor prueba tomando en cuenta cada factor se llegó a que mediante el tamaño de partícula de 500 micrómetros se produce una recuperación al 98.13%, asimismo se obtuvo una lenteja de oro producto de una extracción de oro al 93.86% de



recuperación, para posteriormente se caracterizó a la lenteja por fluorescencia de rayos X teniendo como resultado a 91,57% de cantidad recuperada de oro

Yahya et al. (2020) en su artículo el cual tuvieron por objetivo el desarrollar un modelo de simulación del proceso de lixiviación mediante el uso de solvente de cianuro para la disolución de oro usando el simulador HSC, para lo cual se trabajó usando una metodología de tipo cuantitativa, así como experimental, además de un nivel explicativo. Para ello se puede afirmar como producto de la investigación que la cloración, el proceso da una mayor cantidad de oro (Au) disuelto en el solvente en comparación con el proceso de cianuración. El modelo de proceso de desarrollo proporciona un medio eficaz para estudiar el proceso de lixiviación sólido líquido en el futuro. Además de mencionar que el error que tuvo respecto a otras investigaciones como la de Aspen Plus y muestra muy buena concordancia con un error muy pequeño ($<1.5\%$).

Arham et al. (2021) en el cual mencionan en su artículo el cual tuvieron por objetivo determinar las características del mineral de oro de Babakan Loa y el comportamiento de lixiviación en cianuro solución, para lo cual de la misma manera que las investigaciones anteriores se trabajaron con una metodología de tipo aplicada, experimental y de enfoque cuantitativo, por el cual se usó como muestra a el mineral de oro de Babakan Loa en Indonesia. Para de este modo afirmar que el proceso de lixiviación mostró que el mayor porcentaje de datos de extracción de oro de 92,7% se obtuvo en experimentos con 1000 mg/l de [NaCN], 10% de porcentaje de sólidos y tamaño de grano de 104-149 μm . Creciente el porcentaje de sólidos y la reducción del tamaño de grano provocaron una disminución del porcentaje de oro extracción. Se sospechó que el contenido de arcilla era la causa de la ineficacia de la lixiviación proceso en este estudio.



2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. El oro

El símbolo químico del oro es Au, un metal precioso ampliamente reconocido. Su característica distintiva radica en su existencia en forma metálica, a diferencia de otros metales que se encuentran en formas compuestas. Una de sus propiedades destacadas es su alta densidad, solo superada por el osmio, el iridio y el platino. Es buenamente soluble en "agua regia" o en composiciones que contienen cloro. También se disuelve en soluciones de cianuro oxigenado y puede fundirse con mercurio sin dificultad, formando amalgamas líquidas en las que el mercurio es el metal dominante (López, 2007).

A lo largo de la historia humana, se estima que se han extraído más de 100 000 t de oro de la corteza terrestre. De este total, aproximadamente el 70% ha sido extraído en los últimos 100 años. Hasta la antigüedad tardía, se calcula que se cosechaban alrededor de 10.000 toneladas de oro, con un promedio anual de poco más de tres toneladas. En ese período, cerca del 20% del oro extraído provenía de la Península Ibérica. Sin embargo, durante la Edad Media, la producción de oro fue muy baja, con un promedio anual de unos 700 kg, debido a las limitaciones tecnológicas y científicas de la época. El descubrimiento de las Américas marcó un cambio significativo, dando lugar a un impresionante aumento en la producción de oro a partir de 1850. Esto se vio impulsado por la famosa "fiebre del oro" en América, Australia y Sudáfrica. A medida que avanzó el siglo XX, la producción de oro continuó aumentando gradualmente gracias a los avances tecnológicos, alcanzando un pico en 2001 con alrededor de 2.870 toneladas anuales. En la actualidad, la producción de oro está en declive, lo que se refleja en el caso de



Sudáfrica, el principal productor mundial, que solo produjo 275 toneladas en 2006, su nivel más bajo desde 1922, cuando la producción era de 218 toneladas por año. Los principales yacimientos de oro se encuentran en Sudáfrica, Estados Unidos (especialmente en California), Canadá, los Urales en Rusia y Australia. En Latinoamérica, destacan como productores Brasil, México y Ecuador, mientras que Venezuela, Colombia y Perú también contribuyen en menor medida. En Europa, la extracción de oro se realiza principalmente en Rumania y Hungría, y en menor medida en Francia, Alemania e Italia (López, 2007).

Cada mina cuenta con su propia planta de procesamiento de minerales para extraer el oro presente en la superficie. El procedimiento inicia con la trituración del mineral hasta convertirlo en polvo. Posteriormente, este polvo se lleva a extensas áreas recubiertas con plástico, aislándolas del suelo para evitar la infiltración, y en estas áreas se recupera el oro utilizando principalmente cianuro de sodio como agente. El uso del cianuro para disolver el oro fue descubierto por Carl Wilhelm Scheele en 1783, pero fue en 1887 cuando John Stuart MacArthur perfeccionó este proceso y lo utilizó para separar el oro de los minerales que lo contenían. Este método fue conocido como el proceso MacArthur-Forrest, en honor a los hermanos Forrest, quienes brindaron apoyo financiero en el desarrollo del proceso en Glasgow. Las grandes reservas de mineral son rociadas con cianuro durante un periodo de tiempo, y el líquido resultante, que tiene un color amarillo característico, se recolecta en estanques. Posteriormente, muchas minas adoptaron el proceso Merrill-Crow, mediante el cual el oro es separado de la solución de cianuro mediante la adición de polvo de zinc, ya que el zinc tiene una mayor afinidad por los iones de cianuro que el oro. En este proceso, también se depositan la plata y el cobre. El resultado del proceso es un precipitado que luego se funde



para producir las conocidas "barras" o "doré", que son barras con bajo contenido de oro que requieren un proceso de refinamiento adicional para obtener oro y plata puros. En años recientes, se han superado estos métodos tradicionales de procesamiento. Por ejemplo, se ha implementado que el aurocianuro puede ser adsorbido por carbón activado, así como es posible con procesos electrolíticos como en celdas de tipo EMEW, desarrollado por una empresa australiana, que utiliza un ánodo de titanio y un cátodo de acero inoxidable para obtener el oro y otros metales de forma más eficiente (López, 2007; Serna et al., 20017).

2.2.2. Cianuración

Es atribuido generalmente al cianuro de sodio, NaCN. Cabe resaltar, que el trabajo inicial en cianuración se referencio por el uso de cianuro de potasio y otras concentraciones, así como formulas básicas que están relacionadas a la sustancia química mencionada. Cabe señalar que el radical cianógeno (CN) en realidad tiene la capacidad de poder disolver, la base alcalina de potasio, calcio o sodio simplemente le da una estabilidad química al compuesto (Michaud, 2012).

Se diferencia principalmente los cianuros alcalinos, además de su costo, por su capacidad relativa para disolver minerales, la cual está directamente determinada por el porcentaje de radical cianógeno presente. Los procedimientos fundamentales de cianuración esta representada por las soluciones alcalinas débiles donde estas presentan una acción disolvente directa y preferencial en los minerales. En la estirpe de oro, las operaciones mineras emplean soluciones disueltas en cianuro de sodio, generalmente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (equivalente a 100 a 500 partes por millón). La temperatura de la solución también tiene relevancia como factor en juega un papel crucial en el mantenimiento de una



disolución eficiente. Es común calentar las soluciones, especialmente en climas fríos, hasta alrededor de 70 °F. No obstante, es importante evitar superar esta temperatura, ya que podría provocar una pérdida significativa de cianuro debido a su descomposición. En teoría, el oro se disuelve más rápidamente en una solución a una temperatura de 138 °F (Michaud, 2012).

2.2.3. Cianuración de oro

Como se ha señalado, este reactivo es barato, pero muy nocivo ya que es muy efectivo en la recuperación de minerales de baja ley y desechos mineros. A pesar de sus ventajas, se considera un enfoque inaceptable y altamente peligroso. Debido a la peligrosidad es que se tiene mucha cautela respecto a la seguridad y salud en el uso del cianuro como agente de lixiviación surgieron después de la ocurrencia de varios accidentes tecnológicos que dañaron gravemente el medio ambiente (Neag et al., 2020). El proceso de cianuración de Au puede llevarse a cabo de dos maneras (Marsden y House, 2006):

La lixiviación directa de cianuro es un método ideal para minerales no refractarios, es decir, aquellos en los que el oro se libera o lixivía fácilmente. Este proceso implica la disolución directa del oro mediante cianuro alcalino diluido, así como la concentración mediante gravedad y cianuración.

Por otro lado, la lixiviación indirecta de cianuro (concentración y cianuro) se aplica a minerales resistentes al calor, donde el oro está fuertemente ligado a otras partículas minerales o se encuentra en un tamaño extremadamente pequeño. Este proceso implica flotar el mineral en cuestión para eliminar el material estéril, cianurado y refractario, permitiendo así obtener un concentrado con alto contenido de oro y plata.



El proceso de cianuración tiene concurrencia a ser usado con fines de recuperación el Au a partir de minerales. El uso de la lixiviación con cianuro para la recuperación de oro toma como referencia a las características del oro, se basa en las propiedades del oro. Además, el oro no es soluble en ácido sulfúrico, clorhídrico o nítrico, pero puede disolverse en agua regia (una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico). Por otro lado, el hecho más crucial sobre el oro, en este caso, es que es soluble al mezclar con cianuro diluido. Por esta razón, el cianuro se utiliza como lixivante durante el proceso de lixiviación para realizar la extracción de oro mediante el uso de este proceso hidrometalúrgico (Deschênes, 2005)

La Figura 1 muestra el proceso hidrometalúrgico que comienza con los agitadores de lixiviación, donde la lechada entra en contacto con cianuro, oxígeno, agua y cal, y así se lleva a cabo el proceso de lixiviación. Durante el proceso de lixiviación, se forman otros complejos de cianuro, como minerales de sulfuro de cobre y plata (Medina y Anderson, 2020).

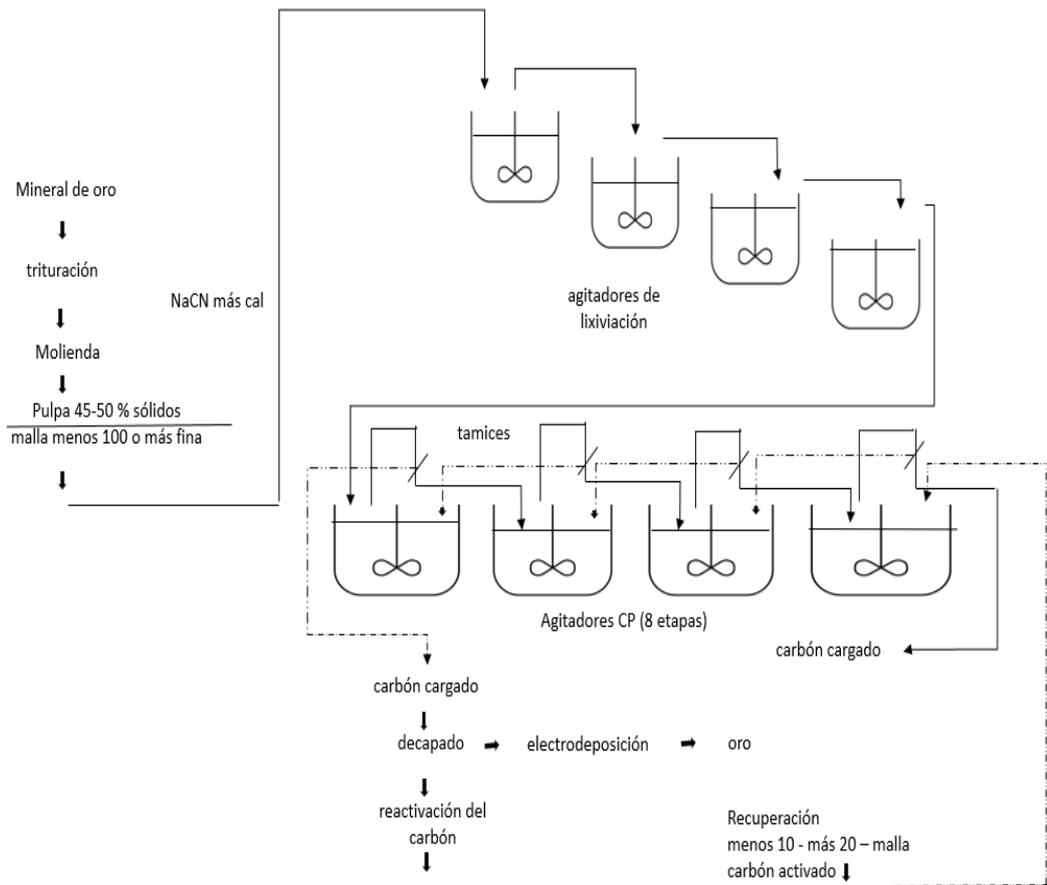
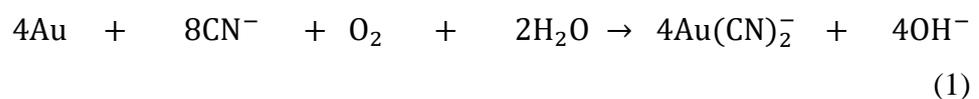


Figura 1. Diagrama de lixiviación con cianuro de oro

Nota. Lixiviación con cianuro de oro usando recuperación de carbón activado. Reproducido y adaptado de Stephen (1986).

2.2.3.1. Química de la cianuración del oro

El fundamento del cianuro se basa en que las soluciones débilmente alcalinas presentan una reacción predominante directa con el oro que se encuentra en el mineral. La reacción más comúnmente utilizada para disolver oro en una solución de cianuro es denominada como la Ecuación de Elsner (ecuación 1) que sugiere que se requiere oxígeno para llevar a cabo la disolución del oro en una solución de cianuro (Deschênes, 2005).



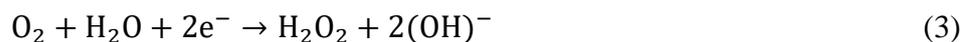


2.2.3.2. Termodinámica de la cianuración

La lixiviación del oro puede tener lugar mediante distintos mecanismos y reacciones. Entre ellos se encuentran los mecanismos químicos y electroquímicos, en los cuales, en el caso del cianuro en solución, se aplican principios electroquímicos parecidos sobre los que son llevados a cabo en la consunción de los metales. Estos mecanismos electroquímicos se derivan en dos tipos según la reacción: reacciones anódicas y catódicas. Por parte anódica, el oro se oxida con el fin de constituir un complejo de cianuro estable llamado complejo aurocianida en el mineral. La cual se puede representar mediante la Ecuación 2 (Garcia-Rosales et al., 2021):



Por otro lado, para la reacción catódica el O_2 proviene del aire y el agua que se encuentra en la solución que forman peróxido de hidrógeno y aniones OH^- los cuales son transportados de la solución. La descripción previa se muestra en la reacción de la Ecuación 3:



Por lo tanto, la oxidación del Au sucede en el ánodo mientras que la desoxidación ocurre en la superficie del metal en la región del cátodo. Esto es resultado del flujo de electrones que se da entre la fase líquida, que contiene oxígeno disuelto y cianuro, y la fase sólida, inducida por el Au. La capa límite de Nernst, ubicada entre las fases catiónica y aniónica, varía en espesor dependiendo del método de lixiviación y la tasa de agitación. Para ello se muestra una representación gráfica de las reacciones anódicas (Ecuación 2) y catiónicas (Ecuación 3) involucradas en este proceso en la Figura 2 (Garcia-Rosales et al., 2021).

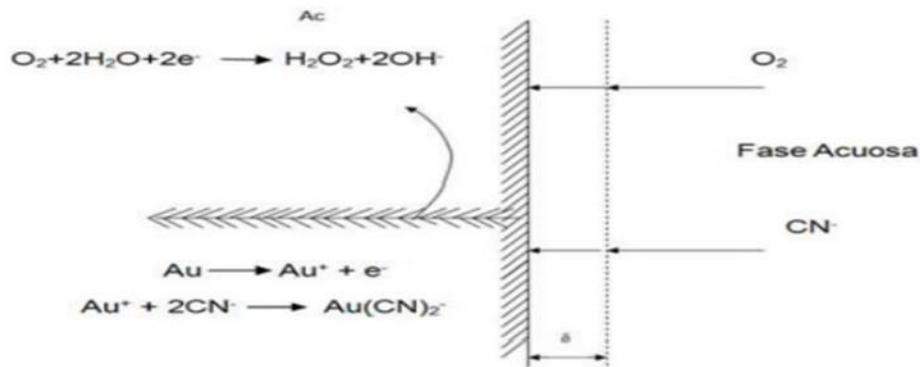


Figura 2. Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones cianuradas

Nota. ^a es la capa de Nerst

La cianuración de Au, se lleva a cabo por la termodinámica representados por Eh-pH (Equilibrio potencial -pH). En la Figura 3, se observa el diagrama Eh-pH de la cianuración de Au, que brinda información del proceso de cianuración (Garcia-Rosales et al., 2021).

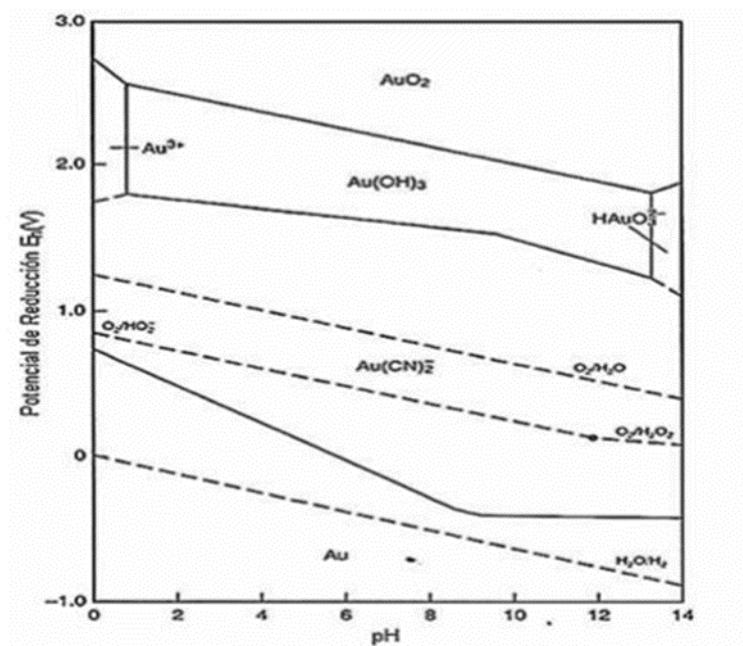


Figura 3. Diagrama de equilibrio potencial Eh-pH para el sistema Au – H₂O – CN⁻ a 25 °C

Nota. [Au]= 10⁻⁴M, [CN]=10⁻³ M. Obtenida de Marsden y House (2006):



A partir del esquema de estabilidad acuosa se informa que el $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ destaca como el principal complejo aniónico teniendo un extenso campo de estabilidad, que menciona en la solución que la fuerza de conducción electroquímica representa el potencial de la formación de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ se reduce a valores de pH de 9-12. Para una cianuración de oro optima se da en un medio alcalino para no tener perdidas por hidrolisis del cianuro, para determinadas ocasiones es usado un pH bajo con el fin de disminuir la concentración de cianuro residuales y para no tener reacciones adversas (Garcia-Rosales et al., 2021).

2.2.4. Factores que afectan a la reacción de cianuración

2.2.4.1. Efecto de la concentración del cianuro

La concentración de cianuro es el factor de mucha influencia en la cinética del proceso. Este factor es fácilmente controlable agregando una solución o un compuesto solido de cianuro. Asimismo, se puede mostrar en la figura 4 como varia el oxígeno disuelto sobre la cianuración con condiciones a 25°C y con concentración de 8.2 mg/L, siendo variable según la altitud y temperatura. La optimización de la recuperación del Au se da en 0.1% g/L NaCN, así como la óptima velocidad se da en 3 mg/plug²/h (Garcia-Rosales et al., 2021; Bustillo, 2017).

Un incremento del grado de cianuro conduce la reacción de cianuración hacia la derecha. Debe haber suficientes iones de cianuro libres en la solución para disolver todo el oro, de lo contrario se perderá en los relaves. Cuanto más oro hay que lixiviar, más cianuro se necesita. En la práctica, se busca un equilibrio para que haya suficiente cianuro para lixiviar el oro, pero no tanto como para que al final del proceso de

adsorción quede un exceso de cianuro que se pierda en los relaves. Esto no solo aumentaría el costo de producción, sino que también plantearía mayores problemas ambientales (Bustillo, 2017).

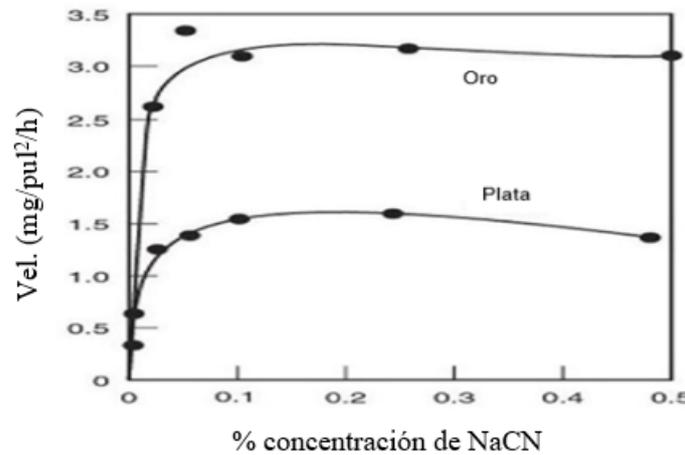


Figura 4. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata

Nota. obtenido de Garcia-Rosales et al. (2021)

2.2.4.2. Efecto de tamaño de partícula

Es un factor importante en el proceso, se busca que la partícula sea el tamaño más pequeño para recaer en más área expuesta al cianuro, permitiendo que el proceso sea más rápido y efectiva. Según la rotura en la superficie del mineral, el oro tendrá una mayor cantidad de liberación (Bustillo, 2017). A medida del tamaño de la partícula varia se recuperará más oro, cuanto más sea el tamaño será menor la recuperación y viceversa (Garcia-Rosales et al., 2021).

2.2.4.3. Tiempo de residencia

Se determina el tiempo de residencia según el material tratado y estos deben hacerse mediante una prueba. Este tiempo varía desde horas



hasta días. Para ello la lixiviación se realiza en varias etapas y este se determina por el número de etapas y el número de etapas dependen del caudal de la lechada, el tiempo de residencia requerido y la eficiencia del equipo de mezcla utilizado. Se entiende que cuanto más tiempo estén las partículas de oro en contacto con el cianuro en la suspensión más oro se lixiviará (Bustillo, 2017).

2.2.4.4. Densidad de lodo

El consumo de reactivo se minimiza optimizando la densidad de la suspensión, por lo que es posible lograr óptimas soluciones tomando mínimas dosis, a causa de las reducciones de volumen por cada unidad en la masa de material (Bustillo, 2017).

2.2.4.5. Oxígeno disuelto

Debe haber suficiente formación oxígeno en la suspensión. Aumentando de la concentración de oxígeno impulsa la reacción a la derecha. El flujo de oxígeno debe ser tal que las burbujas se rompan y se dispersan finamente en la suspensión. Si el caudal es demasiado alto, entonces las burbujas no se romperán, sino que se estallar en la superficie. Esto es ineficaz como el oxígeno se libera a la atmosfera en lugar de disolverse y, por lo tanto, reaccionar en la lechada. El caudal debe ser ajustado para que la superficie del tanque sea cubierta con un montón de pequeñas burbujas romper suavemente en lugar de una menor cantidad de burbujas grandes que se rompen violentamente (Bustillo, 2017).



2.2.4.6. Cianocidas y Consumidores de Oxígeno

Muchos otros metales y minerales además del oro también se disuelven en una solución alcalina de cianuro. Alguno de estos metales y minerales tienen el potencial de consumir cianuro y oxígeno, así como producir sustancias que pueden reducir la eficiencia de la lixiviación de oro. Los minerales que provocan un consumo excesivo de cianuro se denominan cianocidas. Ejemplos incluyen minerales de cobre, níquel, hierro y sulfuros. Si están presentes en el mineral, cianuro adicional debe agregarse lo que puede aumentar considerablemente el costo de lixiviación del oro. Otros minerales, como el arsénico, pueden reaccionar con el oxígeno y disminuir la tasa de disolución de oro (Bustillo, 2017; Garcia-Rosales et al., 2021).

2.2.4.7. pH de la suspensión

La modificación del pH se logra agregando cal al mineral antes de la molienda, lo que hace a la suspensión alcalina (pH alto). El nivel de pH en los tanques es monitoreado regularmente por técnico del proceso responsable del circuito. El término pH es la unidad de medida de la alcalinidad o acidez de una solución. se calcula en términos de concentración de iones de hidrógeno. Cuando se agrega cianuro de sodio (NaCN) al agua, la porción de cianuro de la molécula se disocia de la porción de sodio (Ecuación 4) (Bustillo, 2017).





Dependiendo del pH de la suspensión, el cianuro puede reaccionar con el hidrógeno en el agua para formar gas letal de cianuro de hidrógeno (Ecuación 4).



Si el pH de la suspensión es bajo, la reacción procederá a la derecha formando gas de cianuro de hidrógeno. Por otro lado, si el pH es alto, la reacción se moverá hacia la izquierda y el ion cianuro libre será la especie estable. La formación de gas de cianuro de hidrógeno reduce la cantidad de cianuro disponible para lixiviar el oro y también es potencialmente fatal si se inhala en ciertas concentraciones. Por lo tanto, es importante que se mantengan niveles altos de pH para evitar la formación de gas HCN y el consumo excesivo de cianuro.

2.2.5. Cianuración de oro en relaves

Por ejemplo, la producción de concentrados de cobre a partir de minerales de sulfuro de cobre y oro mediante flotación por espuma generalmente genera relaves con valores de cobre, plata y oro. La cianuración de relaves de flotación de cobre que contienen sulfuros para la recuperación de oro es un ejemplo de la formación de complejos de cianuro con cobre y plata durante el proceso de lixiviación. Se realizaron estudios para analizar la recuperación de oro por lixiviación con cianuro en los relaves de flotación de este mineral. Hubo cantidades considerables de cobre y plata en los relaves probados que podrían formar complejos de cianuro durante la lixiviación con cianuro. La planta de beneficio en esta mina en particular en México produce un concentrado de cobre, sin embargo, su circuito de flotación solo recupera alrededor del 75% del oro; el



resto se pierde en los relaves. Se encontró resultados de la lixiviación con cianuro realizada en los relaves de flotación de manera eficiente usando una concentración de NaCN de 0.5 mg/L (Medina y Anderson, 2020). Como señala Medina y Anderson (2020) los valores porcentuales de recuperación de cobre y plata en una mina en Mexico fueron 33% y 35%, respectivamente, lo que significa que la mayoría de los valores de cobre y plata se perdieron en los relaves de lixiviación.

2.2.6. Adsorción

Se define como un proceso mediante el cual se transfiere masa, por el cual se da con un adsorbente y un adsorbato, las cuales interactúan con fuerzas intermoleculares atrayéndose entre ellas. Evaluando la magnitud de la fuerza se pueden dividir en adsorción física y química. La adsorción física se da por la atracción de fuerzas intermoleculares conocidas como van der Waals; y la adsorción química se da mediante la fuerza de sus enlaces químicos, asimismo se puede decir que este proceso da como la destrucción y construcción de los enlaces químicos (Hu y Xu, 2020). Tomando como referencia el proceso de adsorción del oro con el carbón activado (CA) se dice que, se da una adsorción química interactuando sus enlaces químicos atrayéndose con cierto grado de fuerza también llamado quimisorción, también se da la adsorción física en el proceso llamado fuerzas de van der Waals en donde según su peso molecular o la polaridad de estas tienden a ser atraídas respecto al tipo de elemento (Martínez-Peñuñuri et al., 2023).

2.2.7. Adsorción de oro con carbón activado

En recuperación de Au, el ion complejo de cianuro de oro $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en la solución de cianuración se recupera mediante un procedimiento diferente, por



ejemplo, extracción con solvente, cementación con zinc, precipitación, intercambio iónico y adsorción sobre CA. En el rubro hidrometalúrgica del oro, el Au se extrae de la solución de lixiviación con cianuro mediante adsorción en CA. Las principales ventajas del carbón activado son su alta selectividad hacia el Au en relación con los metales base, su facilidad de elución y su gran tamaño de partícula. Además, el carbón activado tiene otras ventajas significativas, como alta capacidad de adsorción, estructura porosa, gran superficie, naturaleza ecológica y altos estándares de pureza (Khosravi et al., 2017).

El mecanismo de adsorción de carbones de metales preciosos en soluciones de cianuro tiene las siguientes características principales (Martínez-Peñuñuri et al., 2023):

- La extracción mejora en presencia de electrolitos como CaCl_2 y KCl ;
- La cinética de adsorción y la carga de equilibrio aumentan a medida que disminuye el pH;
- El pH se ve modificado por la adsorción de Au en la solución;
- Los complejos de cianuro neutro, se adsorben fuertemente independientemente de la fuerza iónica de la solución;
- Se considera como un proceso reversible la adsorción, este depende de las condiciones para su nivel de tasa de extracción;
- Se puede afirmar que el potencial de reducción esté relacionado con la adsorción que pueda tener;
- Comúnmente se tiene que las condiciones esta sugestionado por la relación moral del oro y un nivel de nitrógeno donde es 0.5:1.0, lo que es coherente con la presencia de $\text{Au}(\text{CN})_2$;
- La adsorción es influencia con la variación de la temperatura;



- El mecanismo de adsorción se puede representar mediante la Ecuación 6:



El consumo medio de CA en plantas de adsorción, desorción y reactivación (ADR) es de 40 g de CA por tonelada de mineral procesado. Este consumo se atribuye a varios factores durante la producción de partículas finas de CA, resultantes de la mezcla de circuitos de adsorción (40 %), la transferencia de carbono entre etapas (incluida la transferencia a elución: 6 %), el proceso de elución (incluida la transferencia de regeneración: 7 %) y regeneración (incluyendo enfriamiento y calibrado final: 47%). Se estima que el 41 % de la pérdida de CA dentro del circuito de adsorción (la adsorción más la transferencia de CA entre etapas equivale al 46 %) se pierde en los relaves finales y solo el 5 % se recupera en la pantalla de seguridad de relaves. El CA perdido en los relaves contiene oro adsorbido durante el proceso de adsorción. A medida que esta CA se mueve a través del circuito de adsorción, no queda claro si libera el oro contenido o lo transfiere a partículas con cargas de oro más bajas. Esto se debe a que la CA fina generada pasa rápidamente a través de un circuito con la suspensión, y es poco probable que haya equilibrio o una carga de oro (Martínez-Peñuñuri et al., 2023).

2.2.7.1. Proceso de adsorción de carbón para la recuperación de oro

Para llevar a cabo este proceso se lleva a cabo mediante los siguientes procesos (Marsden y House, 2006):

Cargado. El oro es adsorbido de la solución de cianuración en las partículas de carbón.



Elución y reactivación. Los minerales como la plata y el oro son recogidos del carbón luego es regenerado el carbón y devuelto al circuito.

Recuperación. El Oro es recuperado mediante la electrodeposición o mediante la precipitación por polvo de zinc, el resultado de esta es llevada de vuelta a la elución, así como a la reactivación, y el metal precioso recobrados son moldeados en una barra de Dore.

Prosiguiendo estos procesos se toman como los más desarrollados para la cianuración del mineral (Mullar et al., 2002):

Carbón en pulpa (CIP): Se hace llamar también como pulpa preñada. Se basa en esencia en adicionar carbón a la pulpa luego del proceso de agitación. Posteriormente se pone en contracorriente al flujo de la pulpa donde está la solución y las partículas cianuradas. Para finalmente tamizar la pulpa para obtener el carbón cargado.

Carbón en lixiviación (CIL): El CA junto a la pulpa son introducidos en el tanque de cianuración. Para que los procesos de cianuración y adsorción ocurran en el mismo lugar siendo adsorbido el oro inmediatamente. Se dice que la lixiviación es un proceso más lento comparado con la adsorción dado por el carbón activado.

Carbón en columna (CIC): es en donde el CA es conducido a una solución de preñada clarificada. Comúnmente este proceso se da en columnas de tabiques horizontales, para esto el carbón fluye en contracorriente respecto al flujo de la solución y es en forma intermitente.

Diferenciando procesos como el CIL y CIP se puede decir (Marsden y House, 2006):



- Costo de capital de inversión: refiriéndonos al CIL es necesario una mayor inversión, casi tanto como una planta CIP. Por ello se dice que predomina el mejorar la eficiencia de CIP para compensar esa mínima diferencia.
- Costos de operación: tomando un circuito CIL se dice que requiere una mayor cantidad en el inventario comparado con una CIP. Por lo que aumenta el inventario del metal, así como las pérdidas del carbón causando mayores costos en el manejo de este.
- Recuperación de oro: durante el circuito CIP el oro es disuelto, conllevando a que el carbón interactúe con este antes de conducirse al residuo. Por el contrario, en los procesos referidos al CIL, el oro que es disuelto al final tiene menos tiempo para poder ser adsorbido por el carbón antes que este pase a la cola.
- Pérdidas de producción por mantenimiento: si un TK de CIL estar sin servicio conlleva a una pérdida de oro, ya que el tiempo que interactúa con el carbón es reducida.
- Variaciones de la ley de oro en cabeza: cuando se da el CIL conlleva a una alta vulnerabilidad a la variabilidad del contenido de oro a diferencia de un circuito CIP.

2.2.8. Factores que afectan en la adsorción del oro

La formación de complejos de cianuro de cobre y plata también afecta la adsorción de oro durante la etapa CIP durante la lixiviación. La adsorción de especies de metal-cianuro ocurre de forma selectiva, dependiendo de los diámetros iónicos de los complejos metal-cianuro. La adsorción de cianuros metálicos sobre CA es selectiva y el complejo adsorbido más potente es $\text{Au}(\text{CN})_2^-$.



Por otro lado, el complejo de cianuro de plata $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ se adsorbe rígidamente sin embargo no como el complejo de cianuro de oro (Medina y Anderson, 2020).

Los complejos de cianuro de cobre $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ y $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ son diferenciados respecto a los demás referido a la adsorción, con el complejo $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ adsorbiendo más rígidamente que el complejo $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$. La hidratación es un aspecto esencial de la adsorción de carbono porque hace que los complejos de metal-cianuro aumenten el diámetro de su molécula debido al hecho de que es probable que el ion metálico haya tenido una hidratación predeterminada que puede afectar la adsorción de metal-cianuro de carbono. La clasificación de los que se adsorben más fuertemente a los que se absorben menos es: $\text{Au} > \text{Ag} > \text{Cu}$, donde la Ag y el Cu tienen un efecto sobre la recuperación de oro durante la lixiviación. Establecer una elevada carga de cianuro libre resta el grado de otros complejos de cobre adsorbidos. Al incremento de la capacidad de adsorción de cianuro de cobre sobre niveles bajos de carga de cianuro traerá consigo dificultades en la adsorción de oro, como se mencionó anteriormente (Medina y Anderson, 2020).

A continuación, se describen algunos factores que afectan a la eficiencia de adsorción (Bustillo, 2017):

Tiempo: Cuanto más tiempo esté el carbón en contacto con la suspensión, más oro adsorberá. Sin embargo, aunque al principio la adsorción del cianuro de oro es muy rápida, se ralentizará a medida que se carga más oro en el carbono.

Concentración de oro: La tasa de adsorción de oro y la capacidad de carga del carbón aumentan con el aumento concentración de oro en solución.



Densidad de lodo: La tasa de adsorción de cianuro de oro disminuye al aumentar la densidad de la suspensión. Sin embargo, si la densidad del lodo es demasiado baja, es posible que las partículas de carbón no permanezcan en suspensión y se hundan hasta el fondo de los tanques.

Temperatura: La tasa de adsorción aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura, sin embargo, la carga se reduce la capacidad. La lixiviación y la adsorción se realizan a temperatura ambiente.



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación

La ubicación de Planta de Beneficio Belén propiedad de la Minera Titán del Perú S.R.L. esta en el distrito de Chala de la provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, al sur del Perú. Colinda por el norte con el distrito de Atiquipa, por el Sur con el distrito de Cháparra y por el Oeste con el océano Pacífico.

- Altitud 80 msnm
- latitud 5°52'00" Sur.
- Longitud 74°14'50" Oeste.
- Superficie 378.38 Km²

3.1.2. Ubicación geográfica

Chala es un activo puerto pesquero y comercial, tan dinamizado por la Carretera Panamericana Sur del km 620, que los valles de alta montaña de la provincia de Caravelli brindan, además de la extracción artesanal de oro, una intensa y frenética actividad en la comercialización de metales preciosos en las calles de la región. En la Figura 5 se muestra la Ubicación de la Planta.



Figura 5. Ubicación de la planta concentradora

Nota. Obtenido de Google Maps.

3.1.3. Acceso

La accesibilidad de la ciudad de Puno puede llevarse por vía terrestre hasta la ciudad de Chala. Siguiendo la ruta asfaltada Puno – Arequipa – Camana – Chala con un recorrido de 679 km en un tiempo aproximado de 12 h.

La accesibilidad desde la ciudad de Lima puede llevarse a cabo por vía terrestre hasta la ciudad de Chala. Siguiendo la ruta asfaltada Lima – Ica – Nasca – Chala con un recorrido de 614 km en un tiempo aproximado de 10 h. en la tabla 1 se detalla el acceso a Chala.

Tabla 1.

Acceso a la ciudad de chala

CIUDAD		LONGITUD	CARRETERA	TIEMPO
DESDE	HACIA	(km.)		(h)
Puno	Chala	679	Asfaltada	12
Lima	Chala	614	Asfaltada	10
Chala	Planta Belen	3	Trocha Carrosable	0.20



3.1.4. Clima y temperatura

Por estar ubicada en la zona costera, pertenece al desierto pre montañoso, el clima es semicálido, seco y árido con vientos frecuentes. La variación mensual máxima de la humedad relativa es del 91% en agosto y del 77% en enero. Por otro lado, la humedad relativa mínima es del 45% en julio y del 35% en octubre.

La temperatura en la zona corresponde al clima semicálido registrado en la estación de la cuenca y al clima fresco superior con una temperatura media anual de 18.2°C; Por lo general, la temperatura media máxima es de 21,9 °C y la temperatura mínima es de 14,7 °C.

3.1.5. Flora y fauna

La vegetación en el área varía dependiendo de las características del suelo y la presencia del agua. Así, se distingue entre la vegetación costera, la hierba salada, la vegetación estuarina como los manglares, la vegetación ribereña como los matorrales, los juncos y la vegetación de las tierras altas como la tara, los mitos, etc.

Como en la región Chala se incluye a las islas y al mar, es difícil establecer una fauna propiamente terrestre. Se enumeran como especies características las aves guano como los guanayes, los lobos marinos y las anchovetas que son las especies más comunes en el mar. Además, existen los llamados búhos como aves típicas de la costa, también es hogar de otras aves como garzas, parihuanas; por otro lado, los zorros del desierto y pequeños reptiles.



3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Tipo de investigación

La investigación esta referido a un tipo aplicada ya que tiene por fin resolver algún problema en la sociedad basándose en otras investigaciones de tipo básica (Ñaupas et al., 2018), en este caso busca solucionar el problema de la recuperación de oro del relave de flotación mediante cianuración evaluando las variables influyentes.

3.2.2. Diseño de la investigación

Fue experimental dentro de ella, se asumió el diseño factorial fraccionado de 2^{4-1} con tres replicas centrales, ya que se evaluó las variables del proceso para la mejor recuperación del oro, por ende, este tipo de investigación manipula variables de forma premeditada en este caso los niveles de las variables granulometría, tiempo, densidad y la concentración del cianuro. Por otro lado, se tuvo una investigación transversal que implica que la recolección de los datos recolectados comprende un momento dado y por única vez (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2.3. Población

La población para este trabajo de investigación está conformada por los depósitos de relaves de la Planta Beneficio Belén de Minera Titán del Perú S.R.L.

3.2.4. Muestra

La muestra para el presente trabajo de investigación está constituida por los relaves de la Unidad Minera muestra 11 kg. Por otro lado, la unidad de análisis fue de 1 kg del mineral, utilizado para cada experimento del diseño propuesto.



3.3. MATERIALES

3.3.1. Materiales

- Agua destilada
- Balde
- Botellas de plástico
- Bureta
- Cronometro
- Embudo
- Erlenmeyer
- Espátula
- Frasco de muestra
- Malla 200
- Papel de filtro
- Papel phanpea
- Pipeta
- Pizeta
- Probeta
- Relave de Flotación
- Sacos
- Vaso de precipitado

3.3.2. Equipos

- Agitador mecánico-eléctrico de 15Hp.
- Balanza Analítica, de 3 decimales (Marca Suminco).
- Molino de Bolas de Laboratorio (Marca ITIS).



3.3.3. Reactivos

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Nitrato de plata
- Cianuro de sodio
- Yoduro de potasio

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.4.1. Variable independiente

Granulometría: es la distribución de tamaño de granos y es un factor importante en el proceso de cianuración, se busca que la partícula sea el tamaño más pequeño para recaer en más área expuesta al cianuro, permitiendo que el proceso sea más rápido y efectiva (Garcia-Rosales et al., 2021).

Concentración de cianuro: representa la concentración de solución de NaCN en % o g/L. Debe haber suficientes iones de cianuro libres en la solución para disolver todo el oro (Bustillo, 2017).

Tiempo de cianuración: El tiempo de cianuración es el tiempo que tarda las partículas de oro en contacto con el cianuro, y es una consideración operativa importante (Bustillo, 2017).

Densidad: es la relación sólido-líquido de la pulpa, que puede afectar directamente la velocidad de difusión de los componentes y luego afectar la velocidad y la velocidad de lixiviación del oro. Se sugiere determinar la densidad de pulpa adecuada a través de la prueba de procesamiento de minerales (Marsden y House, 2006).



3.4.2. Variable dependiente

Recuperación de oro de relaves: La recuperación es el porcentaje de oro en relave de flotación recolectado en la cianuración. Por ejemplo, una recuperación del 85 % significa que el 85 % del oro se reporta en el concentrado y la parte restante en las colas (Marsden y House, 2006).

En la Tabla 2 se muestra la descripción de las variables en sus indicadores y escala de medición.

Tabla 2.

Operacionalización de Variables

Variabes	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente:		
Granulometría	Mallas ASTM	% - m200
Concentración de Cianuro Libre	[NaCN]	%
Tiempo	Horas	h
Densidad		g/l
Variable dependiente:		
Recuperación de oro	Porcentaje	%

3.5. DISEÑO FACTORIAL

Utilizado el diseño factorial fraccionado de 2^{k-1} el cual es la mitad de un diseño factorial completo de 2^k , donde $k > 2$ con $\frac{1}{2}2^k = 2^{k-1}$. Para la investigación fue el diseño 2^{4-}



¹ con tres replicas centrales, considerando cuatro factores y dos niveles para cada factor (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

$$N=2^{k-1} = 2^{4-1} \quad (7)$$

Donde:

N: Cantidad de experimentos = 8

k: Cantidad de variables o factores = 4 factores

Para la investigación de consideró el diseño $2^{4-1}=8$ con tres replicas centrales, por ende, se tuvo 11 pruebas experimentales.

3.5.1. Matriz de diseño experimental

En la Tabla 3 se muestra la codificación ((bajo (-), central (0), alto (+)) y las variables reales o factores (granulometría, [NaCN], tiempo y densidad) y la variable de respuesta de recuperación de oro (%R) de los 11 experimentos.

Tabla 3.

Matriz de experimentos para selección de variable

0	Variables Codificadas				Variables Reales				%R
	X1	X2	X3	X4	Granulometría	[NaCN]	Tiempo (h)	Densidad	
1	-	-	-	-	45	0.06	12	1300	%R1
2	+	-	-	+	85	0.06	12	1340	%R2
3	-	+	-	+	45	0.18	12	1340	%R3
4	+	+	-	-	85	0.18	12	1300	%R4
5	-	-	+	+	45	0.06	36	1340	%R5
6	+	-	+	-	85	0.06	36	1300	%R6
7	-	+	+	-	45	0.18	36	1300	%R7
8	+	+	+	+	85	0.18	36	1340	%R8
9	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	%R0
10	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	%R0
11	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	%R0



3.6. TÉCNICA E INSTRUMENTO DE RECOLECCION DE DATOS

Técnicas: La técnica que se utilizó en el trabajo de investigación fue la observación, en específico la observación experimental, como indica Ñaupas et al. (2018, p. 287) esta es una observación hecha en estudios experimentales usando métodos experimentales. Esto implica un estudio cuidadoso de la influencia de la variable independiente manipulada en la variable dependiente. No hay experimento sin observación.

Instrumentos: El instrumento utilizado fue la ficha de observación. Como señala Arias y Covinos (2021) la ficha de observación utilizada cuando el investigador procura medir, analizar o evaluar un objeto en específico; es decir, sirve para recoger datos e informaciones, en un trabajo de campo, en laboratorio o dicho objeto. En la investigación se realizó el registro de los resultados de la recuperación de oro según el diseño experimental propuesto.

3.7. PROCEDIMIENTO

El procedimiento llevado a cabo en la investigación se muestra en la Figura 6. Para el proceso de cianuración del relave para la recuperación del Au a nivel laboratorio, comprende: el muestreo del relave de flotación, la preparación mecánica, el análisis químico, el desarrollo de las pruebas del diseño experimental, el análisis de resultados de las pruebas metalúrgicas, mediante figuras y tablas utilizando Microsoft Excel y para contrastar las hipótesis Statgraphics Centurión. Por último, de los resultados obtenidos a nivel laboratorio, se realizó la aplicación en el proceso metalúrgico de recuperación de oro del relave de flotación en la planta de Beneficios de Belén.

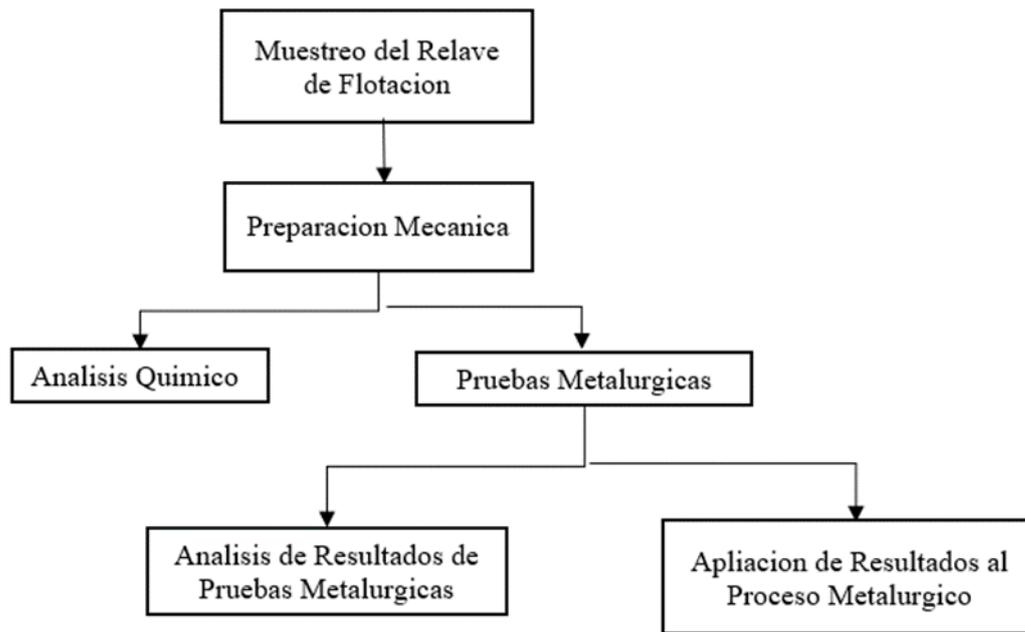


Figura 6. Procedimiento experimental



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO DE CIANURACION DEL RELAVE DE FLORACION

4.1.1. Resultados de las 11 pruebas experimentales del diseño propuesto

Experimento 1: Se trabajo con una concentración de cianuro de 0.06 %, densidad de 1300 g/L, granulometría 45 % -m 200 y tiempo 12 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 4 y Figura 7, respectivamente).

Tabla 4.

Experimento numero 1

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.060	1.09	0.00
2	11.50	0.058	0.85	22.02
4	11.25	0.056	0.72	33.94
6	11.25	0.054	0.50	54.13
8	11.20	0.052	0.48	55.96
10	11.20	0.050	0.46	57.80
12	11.00	0.048	0.35	67.89

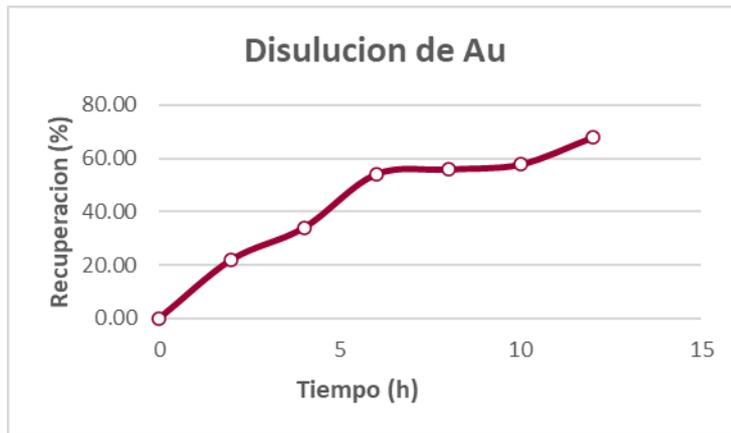


Figura 7. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 1

Trabajando con los parámetros se alcanzó un 67.89 % de recuperación por lo que nos indica que tampoco las condiciones son adecuadas.

Experimento 2: Se trabajo con una concentración de cianuro de 0.06 %, densidad de 1340 g/L, granulometría 85 % -m 200 y tiempo 12 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 5 y Figura 8, respectivamente).

Tabla 5.

Experimento numero 2

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.060	1.09	0.00
2	11.50	0.058	0.85	21.83
4	11.25	0.056	0.73	33.49
6	11.25	0.054	0.55	49.54
8	11.20	0.052	0.48	55.96
10	11.20	0.050	0.46	57.80
12	11.00	0.047	0.33	69.72

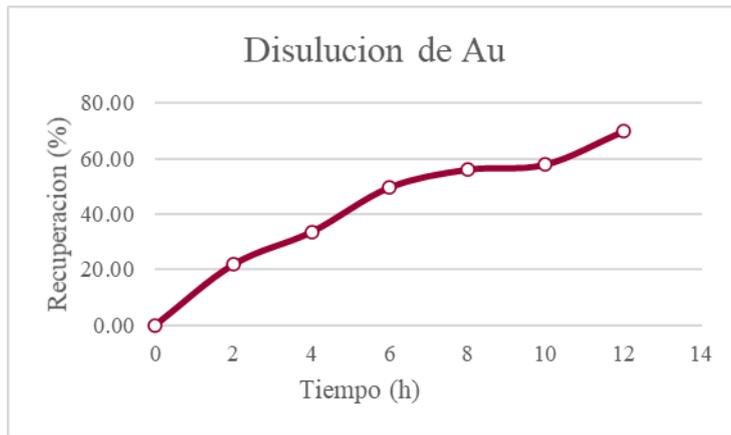


Figura 8. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 2

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 69.72 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 3: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.18 %, densidad de 1340 g/L, granulometría 45 % -m 200 y tiempo 12 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 6 y Figura 9, respectivamente).

Tabla 6.

Experimento numero 3

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.180	1.09	0.00
2	11.50	0.178	0.70	35.78
4	11.25	0.176	0.49	55.05
6	11.25	0.174	0.45	58.72
8	11.20	0.172	0.40	63.30
10	11.20	0.170	0.40	63.30
12	11.00	0.166	0.35	68.35

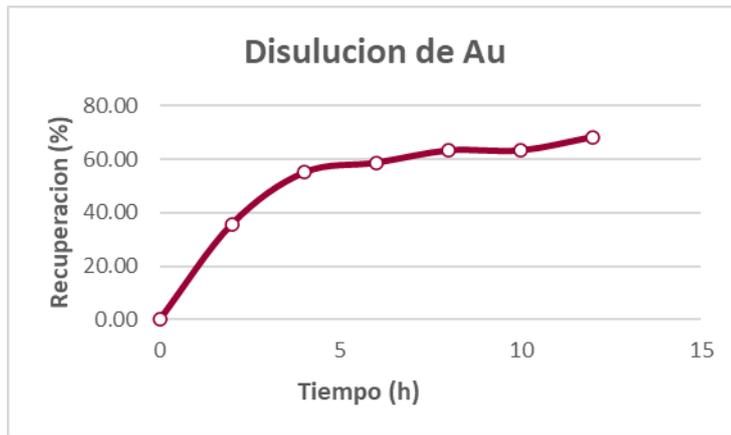


Figura 9. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 3

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 68.35 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 4: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.18 %, densidad de 1300 g/L, granulometría 85 % -m 200 y tiempo 12 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 7 y Figura 10, respectivamente).

Tabla 7.

Experimento numero 4

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.180	1.09	0.00
2	11.50	0.178	0.65	40.37
4	11.25	0.176	0.50	54.13
6	11.25	0.174	0.50	54.13
8	11.20	0.172	0.40	63.30
10	11.20	0.170	0.35	67.89
12	11.00	0.169	0.29	73.39

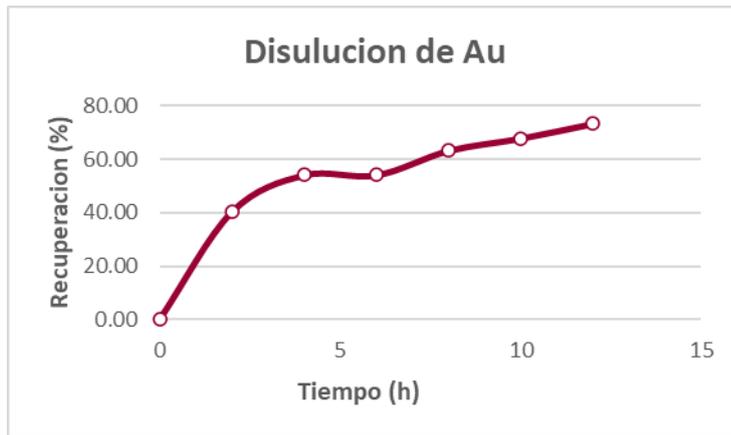


Figura 10. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 4

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 73.39 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 5: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.06 %, densidad de 1340 g/L, granulometría 45 % -m 200 y tiempo 36 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 8 y Figura 11, respectivamente).

Tabla 8.

Experimento numero 5

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.060	1.09	0.00
6	11.50	0.058	0.80	26.61
12	11.25	0.056	0.60	44.95
18	11.25	0.054	0.55	49.54
24	11.20	0.052	0.50	54.13
30	11.20	0.050	0.50	54.13
36	11.00	0.048	0.38	65.14

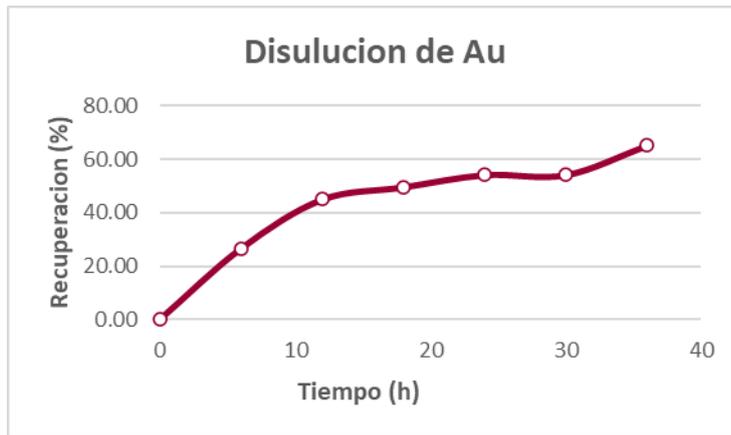


Figura 11. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 5

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 65.14 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 6: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.06 %, densidad de 1300 g/L, granulometría 85 % -m 200 y tiempo 36 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 9 y Figura 12, respectivamente).

Tabla 9.

Experimento numero 6

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.060	1.09	0.00
6	11.50	0.058	0.75	31.19
12	11.25	0.056	0.65	40.37
18	11.25	0.054	0.49	55.05
24	11.20	0.052	0.45	58.72
30	11.20	0.050	0.33	70.18
36	11.00	0.048	0.32	70.64

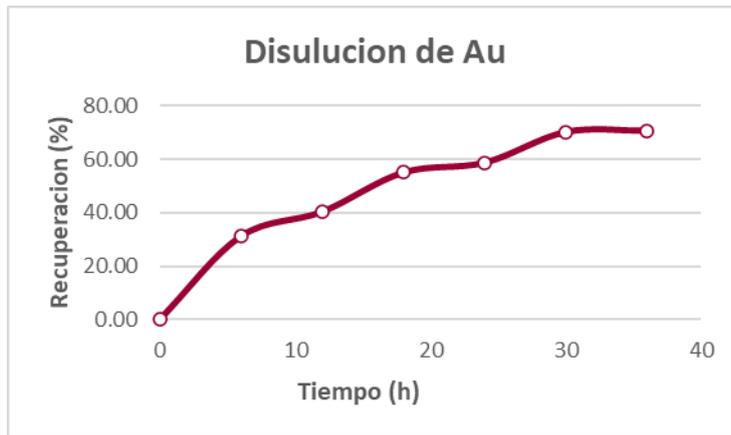


Figura 12. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 6

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 70.64 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 7: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.18 %, densidad de 1300 g/L, granulometría 45 % -m 200 y tiempo 36 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 10 y Figura 13, respectivamente).

Tabla 10.

Experimento numero 7

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.180	1.09	0.00
6	11.50	0.178	0.60	44.95
12	11.25	0.176	0.45	58.72
18	11.25	0.174	0.40	63.30
24	11.20	0.172	0.38	65.14
30	11.20	0.170	0.36	66.97
36	11.00	0.120	0.36	67.43

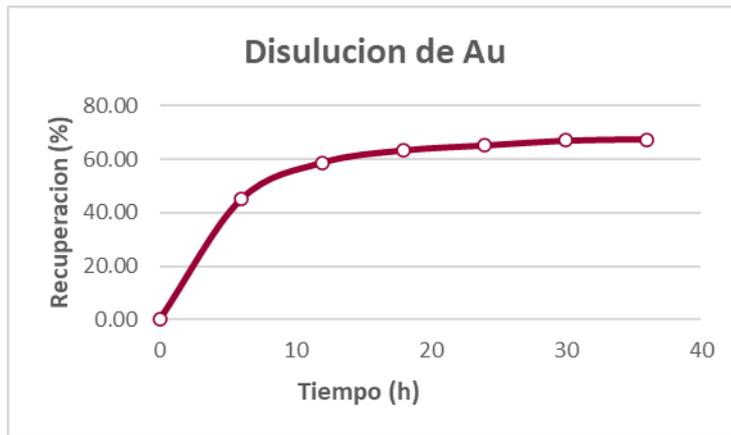


Figura 13. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 7

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 67.43 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 8: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.18 %, densidad de 1340 g/L, granulometría 85 % -m 200 y tiempo 36 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 11 y Figura 14, respectivamente).

Tabla 11.

Experimento numero 8

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.180	1.09	0.00
6	11.50	0.178	0.50	54.13
12	11.25	0.176	0.40	63.30
18	11.25	0.174	0.36	66.97
24	11.20	0.172	0.32	70.64
30	11.20	0.170	0.30	72.48
36	11.00	0.168	0.28	74.31

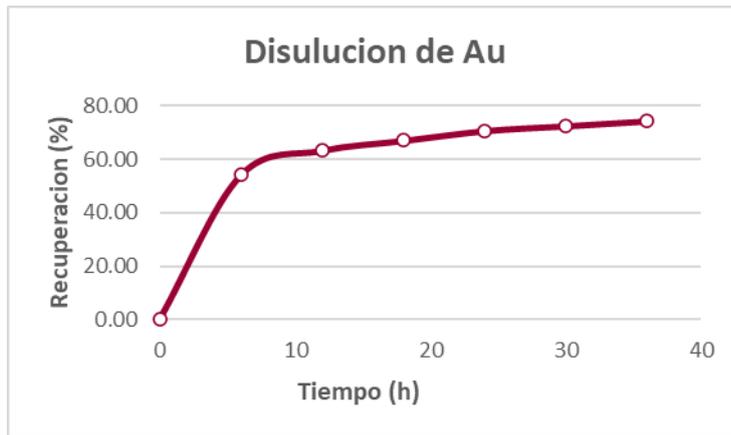


Figura 14. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 8

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 74.31 % de Au, lo que indica que las condiciones son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 9: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.12 %, densidad de 1320 g/L, granulometría 65 % -m 200 y tiempo 24 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 12 y Figura 15, respectivamente).

Tabla 12.

Experimento numero 9

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.120	1.09	0.00
4	11.50	0.118	0.50	54.13
8	11.25	0.116	0.40	63.30
12	11.25	0.114	0.38	65.14
16	11.20	0.112	0.35	67.89
20	11.20	0.110	0.35	67.89
24	11.00	0.108	0.33	70.18

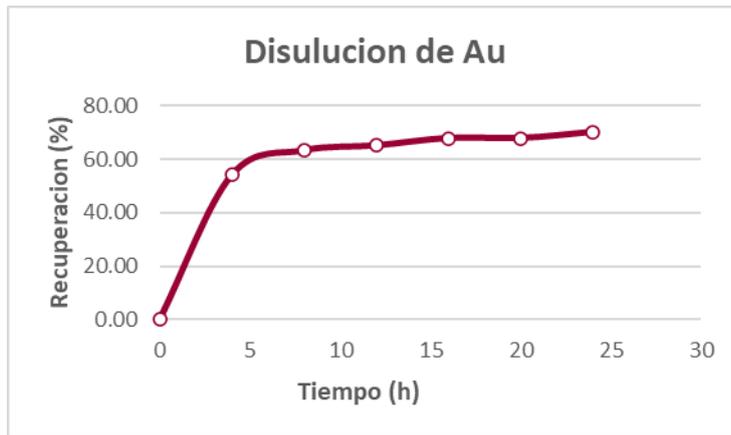


Figura 15. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 10

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 70.18 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 10: Se trabajo con una concentración de cianuro de 0.12 %, densidad de 1320 g/L, granulometría 65 % -m 200 y tiempo 24 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 13 y Figura 16, respectivamente).

Tabla 13.

Experimento numero 10

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.120	1.09	0.00
4	11.50	0.118	0.50	54.13
8	11.25	0.116	0.40	63.30
12	11.25	0.114	0.38	65.14
16	11.20	0.112	0.38	65.14
20	11.20	0.110	0.35	67.89
24	11.00	0.108	0.32	71.10

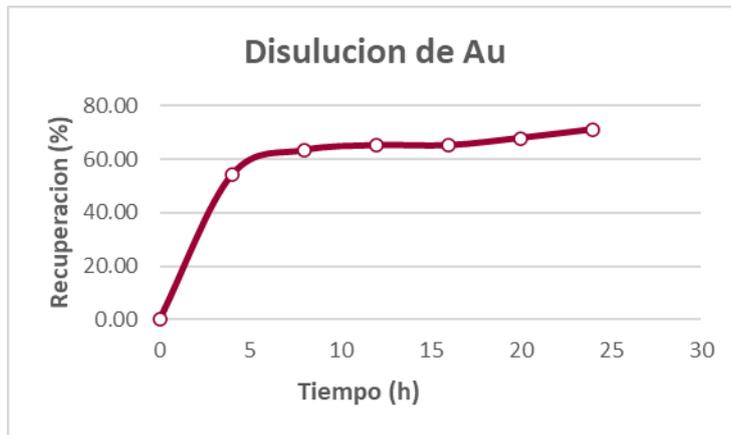


Figura 16. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 11

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 71.10 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

Experimento 11: Se trabajó con una concentración de cianuro de 0.12 %, densidad de 1320 g/L, granulometría 65 % -m 200 y tiempo 24 h (los datos de la recuperación y cinética de muestran en la Tabla 14 y Figura 17, respectivamente)

Tabla 14.

Experimento numero 11

Tiempo	pH	[CN]	Ley Au	Recup.
h		%	g/t	%
0	11.50	0.120	1.09	0.00
4	11.50	0.118	0.60	44.95
8	11.25	0.116	0.50	54.13
12	11.25	0.114	0.45	58.72
16	11.20	0.112	0.35	67.89
20	11.20	0.110	0.35	67.89
24	11.00	0.108	0.32	70.64

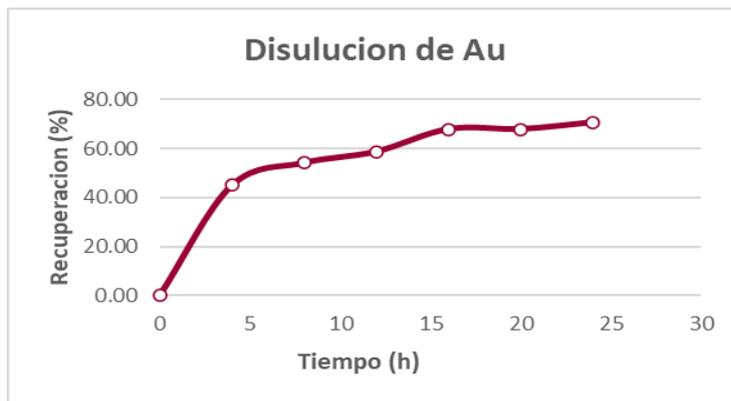


Figura 17. Tiempo (horas) y porcentaje de recuperación de oro 11

Con las condiciones evaluadas se tuvo una máxima recuperación del 70.64 % de Au, lo que indica que las condiciones no son adecuadas para maximizar la recuperación del oro.

En la Tabla 15 se muestra el resumen de los 11 resultados experimentales obtenidos de la recuperación de oro, con las variables evaluadas; donde se tuvo mayor recuperación de oro en el experimento número 8 del 74.31 %.

Tabla 15.

Recuperación de oro

N°	Variables Codificadas				Variables Reales			Función Respuesta	
	X1	X2	X3	X4	Granulometría	[NaCN]	Tiempo (h)	Densidad	R %
1	-	-	-	-	45	0.06	12	1300	67.89
2	+	-	-	+	85	0.06	12	1340	69.72
3	-	+	-	+	45	0.18	12	1340	68.35
4	+	+	-	-	85	0.18	12	1300	73.39
5	-	-	+	+	45	0.06	36	1340	65.14
6	+	-	+	-	85	0.06	36	1300	70.64
7	-	+	+	-	45	0.18	36	1300	67.43
8	+	+	+	+	85	0.18	36	1340	74.31
9	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	70.18
10	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	71.10
11	0	0	0	0	65	0.12	24	1320	70.64

En la Figura 18 se muestra la comparación de los % de recuperación en las pruebas experimentales, con una máxima recuperación del 74.31% en la prueba número 8, seguida del 73.39 % de la prueba 4.

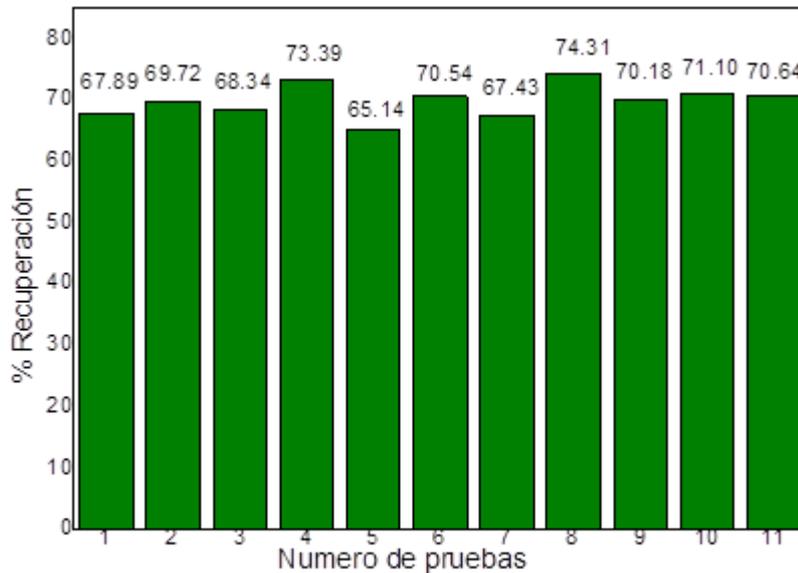


Figura 18. Comparación de los % de recuperación

Para el análisis estadístico ANOVA factorial, se tuvo en consideración los factores propuestos en la Tabla 16, considerando la respuesta en % de recuperación de oro.

Tabla 16.

Factores considerados para el análisis

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Granulometría	45	85	% - m200	Sí
[NaCN]	0.06	0.18	%	Sí
Tiempo	12	36	h	Sí
Densidad	1300	1340	g/l	Sí

En la Tabla 17, se muestra el análisis el cual permite determinar la significancia de los factores evaluados y sus respectivas interacciones, además de la curva en los resultados experimentales obtenidos, es decir el análisis permite

encontrar los efectos primordiales que se debe incluir en el modelo matemático propuesto.

Tabla 17.

Análisis de varianza para porcentaje de recuperación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Granulometria	46.3203	1	46.3203	50.65	0.0057
B: [NaCN]	12.726	1	12.726	13.92	0.0336
C: Tiempo	0.418613	1	0.418613	0.46	0.5472
D: Densidad	0.418613	1	0.418613	0.46	0.5472
AB+CD	2.63351	1	2.63351	2.88	0.1883
AC+BD	3.79501	1	3.79501	4.15	0.1344
AD+BC	0.418613	1	0.418613	0.46	0.5472
Error total	2.74351	3	0.914504		
Total (corr.)	69.4742	10			

Nota. Obtenido de Statgraphics Centurión. R-cuadrado = 96.051 %

En la Tabla 17 se pudo observar que la granulometría al igual que la variable concentración de cianuro tuvieron un efecto significativo en la variable de respuesta, para un coeficiente de correlación del 96.051 %. Además, se observó que el cuadro medio de error fue de 0.914, siendo la varianza del error, este valor es inferior a la unidad por ende la variación de la data es óptima para el trabajo ejecutado. En esta investigación, 2 variables presentaron un efecto de p-valor inferior al 0.05, señalando que son significativamente distintos de cero con una confiabilidad del 95.0 %.

Por otro lado, los coeficientes para la ecuación de regresión ajustado a los datos se muestran en la tabla 18.

Tabla 18.

Coefficiente de regresión para la recuperación

Coeficiente	Estimado
Constante	59.5472
A: Granulometría	0.120312
B: [NaCN]	21.0208

Nota. Obtenido de Statgraphics

La ecuación del modelo ajustado para las variables significativas en el proceso se muestra en la Ecuación 7:

$$\text{Recuperación} = 59.5472 + 0.120312 \times \text{Granulometría} + 21.0208 \times [\text{NaCN}] \quad (8)$$

En donde la constante de modelo, viene ser el promedio de los valores del vector respuesta, así como el valor inicial del proceso de investigación que además es positivo que señala que está como mínimo que es favorable para su maximización y alcanzar su valor adecuado.

El diagrama de Pareto de la Figura 19 ha sido elaborado en base a los valores de la Tabla 17, indica a cada uno de los factores con sus efecto e interacciones siendo los factores de granulometría y [NaCN] significativos, donde la granulometría fue más significativa y cualquiera variación en ella afecta la recuperación del oro en mayor grado. La línea azul señala el rango de variación del sistema. Los colores reflejan la representatividad de las variables y sus combinaciones sin indicar correlación serial en los residuales.

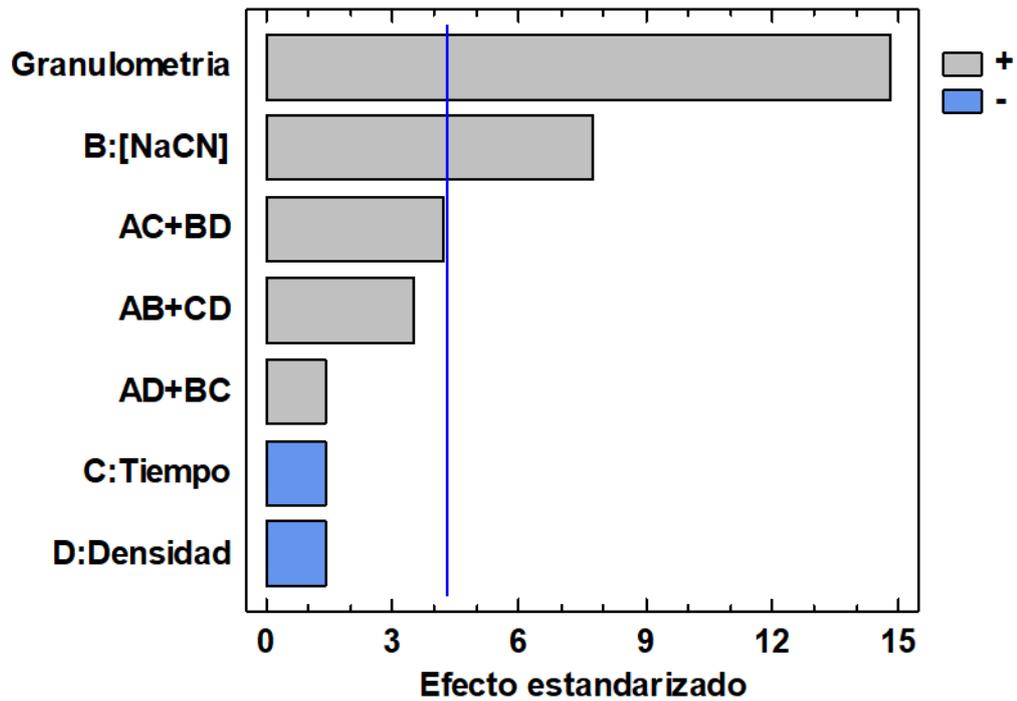


Figura 19. Diagrama de Pareto Estandarizado para Recuperación de Au

Nota. Muestran gráficamente la significancia de aquellos factores o interacciones, para un nivel 95% de significancia. Obtenido de Statgraphics.

En la Figura 20 se muestra el diagrama de efectos principales de las dos variables; donde ambas cuentan con un vector de pendiente positivo, siendo esta directamente proporcional a la recuperación de Au. Se visualiza como varía la recuperación de Au con los valores máximos y mínimos de los factores significativos.

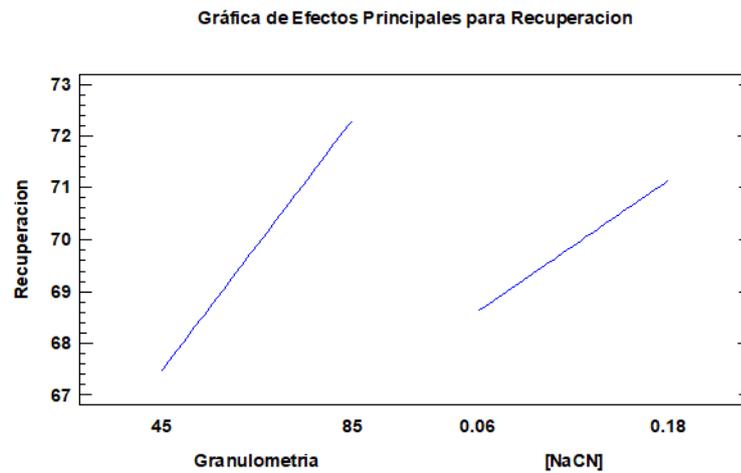


Figura 20. Gráfica de Efectos principales

Nota. Obtenido de Statgraphics

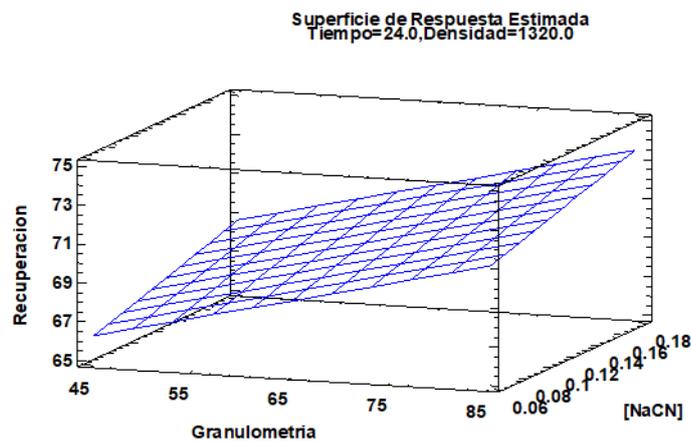


Figura 21. Superficie de respuesta

Nota. Obtenido de Statgraphics

De la figura de superficie de respuesta (Figura 21 y Figura 22) se observa que el % de recuperación es proporcional a la granulometría y la concentración de cianuro fijándolo en valor centrado el tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l.

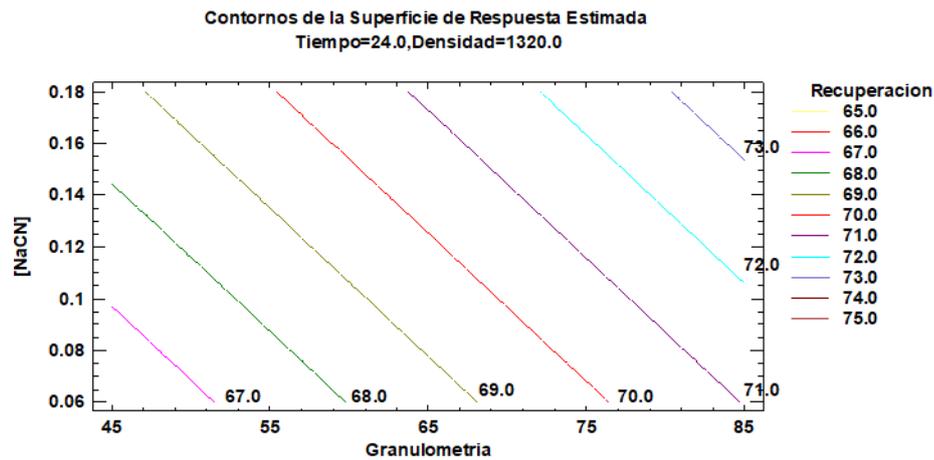


Figura 22. Contorno de superficie de respuesta

Nota. Obtenido de Statgraphics

Finalmente, con los valores fijos del tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l, se realizó el análisis de pendiente máximo ascenso, obteniendo una recuperación máxima del 72.96 % a una concentración del cianuro de 0.151 % con una granulometría de 85.0 % - m 200 (Tabla 19).

Tabla 19.

Camino de Máximo Ascenso para Recuperación

				Predicción para
Granulometría [% - m200]	[NaCN] (%)	Tiempo (h)	Densidad (g/l)	Recuperación (%)
65.0	0.12	24.0	1320.0	69.89
66.0	0.121572	24.0	1320.0	70.0434
67.0	0.123145	24.0	1320.0	70.1967
68.0	0.124717	24.0	1320.0	70.3501
69.0	0.12629	24.0	1320.0	70.5035
70.0	0.127862	24.0	1320.0	70.6568
71.0	0.129435	24.0	1320.0	70.8102
72.0	0.131007	24.0	1320.0	70.9636
73.0	0.13258	24.0	1320.0	71.1169
74.0	0.134152	24.0	1320.0	71.2703



75.0	0.135725	24.0	1320.0	71.4237
76.0	0.137297	24.0	1320.0	71.577
77.0	0.13887	24.0	1320.0	71.7304
78.0	0.140442	24.0	1320.0	71.8838
79.0	0.142015	24.0	1320.0	72.0371
80.0	0.143587	24.0	1320.0	72.1905
81.0	0.145159	24.0	1320.0	72.3439
82.0	0.146732	24.0	1320.0	72.4972
83.0	0.148304	24.0	1320.0	72.6506
84.0	0.149877	24.0	1320.0	72.804
85.0	0.151449	24.0	1320.0	72.9573
86.0	0.153022	24.0	1320.0	73.1107
87.0	0.154594	24.0	1320.0	73.2641
88.0	0.156167	24.0	1320.0	73.4174
89.0	0.157739	24.0	1320.0	73.5708
90.0	0.159312	24.0	1320.0	73.7242

Nota. Obtenido de Statgraphics

4.1.2. Balance metalúrgico general de la flotación

En la Tabla 20 se presenta el balance metalúrgico de la Planta Beneficio Belén correspondiente al año 2021, el cual representa la recuperación del oro sin el proceso de cianuración propuesto en la presente investigación. Donde se tenía una máxima recuperación de oro del 85.7 %.

Tabla 20

Balance metalúrgico Planta Belén–flotación (2021)

Descripción	Leyes Cabeza				Contenido Metálico				Recuperación (%)		
	TMS	K	Au g/t	Ag oz/Tc	Cu %	Au g	Ag oz	Cu TM	Au	Ag	Cu
Cabeza	57128.33		5.83	0.23	0.26	332900.26	14792.16	146.49	100.00	100.00	100.00
Concent. Cu	3354.68	17.03	85.00	1.59	3.04	285161.37	5870.90	101.90	85.66	39.69	69.57
Relave Final	53773.66		0.89	0.15	0.08	47738.89	8921.27	44.58	14.34	60.31	30.43
									85.7	39.7	69.6

Nota. datos obtenidos de la Planta Beneficio Belén de Unidad Minera Titán del Perú S.R.L.

Por otro lado, la Tabla 21 presenta el balance metalúrgico correspondiente al año 2022 de enero a diciembre, el balance corresponde a la posible recuperación del oro (83.51 %) que se hubiera obtenido sin la aplicación de los resultados del presente estudio.

Tabla 21.

Balance metalúrgico Planta Belén–flotación (2022)

Descripción	Leyes Cabeza				Contenido Metálico				Recuperación (%)		
	TMS	K	Au g/t	Ag oz/Tc	Cu %	Au g	Ag oz	Cu TM	Au	Ag	Cu
Cabeza	61690.08		6.06	0.28	0.27	373847.55	19087.20	165.23	100.00	100.00	100.00
Concent. Cu	3987.94	15.47	78.29	1.57	3.12	312203.38	6906.87	124.50	83.51	36.19	75.34
Relave Final	57702.14		1.07	0.19	0.00	61644.17	12180.33	40.74	16.49	63.81	24.66
									83.51	36.19	75.34

Nota. datos obtenidos de la Planta Beneficio Belén de Unidad Minera Titán del Perú S.R.L.

Por último, la Tabla 22 presenta el balance metalúrgico correspondiente al año 2022, tras la aplicación de los resultados del estudio en la planta, donde observa una recuperación máxima del 94.44 % de Au, el cual significa un gran beneficio para la Unidad Minera.

Tabla 22.

Balance metalúrgico Planta Belén–flotación – Cianuración de relaves (2022)

Descripción	Leyes Cabeza			Contenido Metálico				Recuperación (%)			
	TMS	K	Au g/t	Ag oz/Tc	Cu %	Au g	Ag oz	Cu TM	Au	Ag	Cu
Cabeza	61690.08		6.06	0.28	0.27	373847.55	19087.20	165.23	100.00	100.00	100.00
Concent. Cu	3987.94	15.47	78.29	1.57	3.12	312203.38	6906.87	124.50	83.51	36.19	75.34
Relave Flot	57702.14		1.07	0.19	0.07	61644.17	12180.33	40.74	16.49	63.81	24.66
Cianuración						40876.94	757.44		10.93	3.97	
Relave	57702.14		0.36	0.18	0.07	20767.23	11422.88	40.74	5.56	59.85	24.66
									94.44	40.15	75.34

Nota. datos obtenidos de la Planta Beneficio Belén de Unidad Minera Titán del Perú S.R.L.

En la Figura 23, se puede observar la comparación de la ley de oro en el relave de flotación que variaba de 0.81 a 1.23 y tras el proceso de cianuración la ley de Au en el relave final fue baja y varió de 0.29 a 0.45.

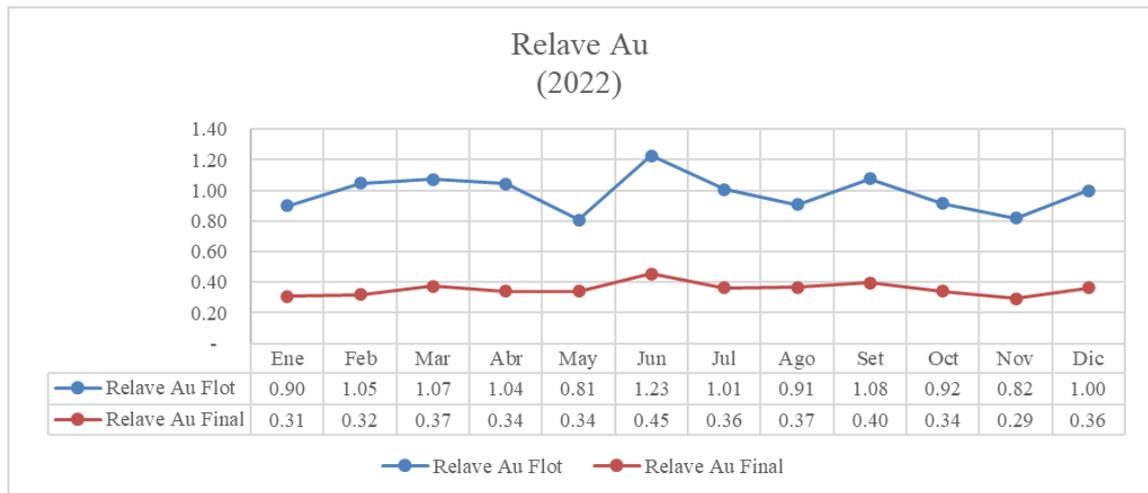


Figura 23. Comparación de ley de oro en el relave - 2022

En la Figura 24, se puede observar la comparación de la recuperación de oro de la flotación que se hubiera obtenido sin la aplicación de los resultados del presente estudio de un mínimo de 80.02 % a máximo de 86.59 % durante los meses del año 2022 y tras la aplicación de los resultados del estudio en el proceso de cianuración la recuperación de oro final varió de un mínimo de 93.07 % y máximo de 95.46 %.

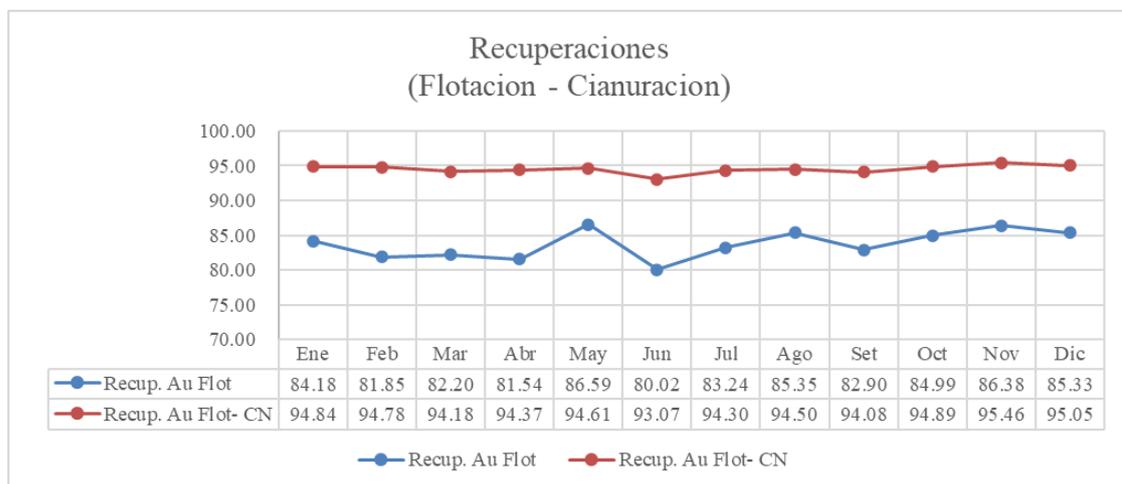


Figura 24. Comparación de la recuperación de oro con cianuración - 2022

4.1.3. Evaluación económica del proceso de cianuración de oro de los relaves de flotación.

En la Tabla 25 se muestra la recuperación de oro en cianuración del 66.87%, la Tabla 26 muestra los respectivos costos de la cianuración del relave y la Tabla 27 los costos fijos (14 %) y variables (86%); mientras la Tabla 28 muestra el análisis de rentabilidad, donde se tuvo una rentabilidad del 55,5 %, utilidad del 1 303 344.27 dólares US \$ y con unas ventas del 2 343 764.54 dólares US \$ en el año 2022 con una recuperación solamente en la cianuración del relave del 66.87 % del Au.

Tabla 23.

Resumen Tratamiento Relaves de Flotación por Cianuración

BM Cianuración de Relaves		Total 2022
Volumen		
Relave a cianurar	TMS	57,702
Ley		
Relave a cianurar	g/TM	1.06
Finos		
Relave a cianurar	g	61,164.12
Recuperación en cianuración	%	66.83%
Fino Recuperado	g	40,877

Tabla 24.

Costo cianuración de relaves año 2022

	US \$	\$/TM	% Dist.	\$/oz
ALMACÉN	255,429	4.14	67%	121.49
Cianuro	204,521	3.32	53%	97.28
Bola de acero	27,918	0.45	7%	13.28
Soda caustica	22,990	0.37	6%	10.94
GASTOS DE PERSONAL	34,824	0.56	9%	16.56
Planilla	28,314	0.46	7%	13.47
Alimentación	6,510	0.11	2%	3.10
Varios	0	0.00	0%	0.00
DEPRECIACIÓN	19,530	0.32	5%	9.29
Depreciación	19,530	0.32	5%	9.29
GASTOS GENERALES	73,821	1.20	19%	35.11
Energía	43,980	0.71	11%	20.92
Servicios Desorción	29,840	0.48	8%	14.19
Total, general	383,603	6.22	100%	182.46

Nota. Costos y Presupuestos. Contabilidad Planta Beneficio Belén de Unidad Minera Titán del Perú S.R.L.

Tabla 25*Costo operativo*

Costo US\$	2022	%
COSTOS FIJOS	54,354	14%
COSTOS VARIABLE	329,249	86%
Total	383,603	100%
\$/tm		
COSTOS FIJOS	0.88	14%
COSTOS VARIABLE	5.34	86%
Total \$/tm	6.22	100%

Nota. Costos y Presupuestos. Contabilidad Planta Beneficio Belén de Unidad Minera Titán del Perú S.R.L.

Tabla 26*Análisis de Rentabilidad, año 2022*

Análisis de Rentabilidad	Total 2022
Valor Relave 100%	\$/tm 57.13
Valor Relave Recuperado	\$/tm 37.99
Costo de tratamiento	\$/tm 6.22
Utilidad	\$/tm 31.77
Rentabilidad	% 55.61%
Ventas	US \$ 2,343,764.59
Utilidad	US \$ 1,303,458.38

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según los resultados obtenidos de la evaluación de la concentración del cianuro, el tiempo, la granulometría y la densidad, se encontró que los efectos más significativos en la recuperación del oro fue la concentración de NaCN y la granulometría. Siendo los valores adecuados 0,18 % de [NaCN] y 85 % -m200 de granulometría que tuvieron un efecto significativo en la recuperación del oro en un 74.31 %; por otro lado, realizando el análisis de pendiente máximo ascenso para la concentración del cianuro y la granulometría, manteniendo fijo en valor centrado el tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l se obtuvo una recuperación máxima del 72.96% a una [NaCN] de 0.151 % con una granulometría de 85.0 % - m200. Resultados similares obtuvieron Chilón y Mejía



(2018) quienes lograron tras la cianuración con una remolienda un 95.38 % de recuperación de Au a 36 h, granulometría 83.29% -200 malla y 4,15 kg/t. Asimismo, resultados cercanos obtuvo Cutti (2021) quien alcanzó la mayor extracción de oro, con un porcentaje del 72,92% en un tiempo de cianuración de 24 horas y una concentración de NaCN del 0,0750%, indicando la importancia de la optimización del proceso de cianuración para mejorar significativamente la recuperación de oro. En ese sentido, Chávez y Ramírez (2020) tras evaluar la recuperación de minerales como el oro y la plata a través de la cianuración en Ayacucho, la recuperación de Au y Ag a una granulometría p80 de m-200, 500 mg/l de [CN] incrementó a 86.5 y 78.5 %, respectivamente. Por otro lado, Rodríguez (2019) en su experimento a una concentración de cianuro de 0,2 g/l; 0,63 mm malla # 30 de granulometría y 10 días de tiempo tuvo una recuperación de Au del 79.8% de relaves de lixiviación beneficiando a la unidad minera.

Por otro lado, del balance metalúrgico de la Planta Beneficio Belén correspondiente al año 2021 se tuvo una recuperación máxima 85.7 %, pero con la aplicación de los parámetros óptimos de la presente investigación en el año 2022 se logró una recuperación máxima del Au del 94.44 %, además se evidencia que la recuperación del oro hubiera sido del 83.51 % en el año 2022 sin la aplicación la cianuración para la recuperación del Au del relave de flotación. En ese sentido Rodríguez (2019) señala que la recuperación de Au del 79.8% del relave en la Unidad Minera fue obtenido con los parámetros de cianuración evaluados, considerados optimas beneficiando económicamente a la empresa. Asimismo, Chávez y Ramírez (2020) encontraron parámetros ideales para la máxima recuperación de oro del a 86.5% en la cianuración en una minera de Ayacucho. En ese sentido Cutti (2021) señala la importancia de la optimización del proceso de cianuración para mejorar significativamente la recuperación de oro en las compañías mineras.



Finalmente, de la evaluación económica de la recuperación de oro tras el proceso de cianuración del relave de flotación en la Planta Beneficio Belén correspondiente al año 2022, se tuvo una rentabilidad del 55,5 %, utilidad del 1 303 344.27 dólares US \$ y con unas ventas del 2343761.04 dólares US \$ en el año con una recuperación solamente en la cianuración del relave del 66.61 % del Au. Al respecto, Rojas y Villanueva (2018) en su trabajo tras una evaluación técnica y económica para la recuperación de oro de la cancha de relaves por parte de una empresa minera en la Libertad, para la recuperación de Au estimó en 8 510 481,79 soles con una TIR de 80,24 y una rentabilidad del 179,60%. Por otro lado, Yahya et al. (2020) tuvieron por objetivo el desarrollar un modelo de simulación del proceso de lixiviación mediante el uso de solvente de cianuro para la disolución de oro usando un simulador. El modelo de proceso de desarrollo proporciona un medio eficaz para estudiar el proceso de lixiviación sólido líquido en el futuro para una mejora en la recuperación de oro en beneficio de las empresas mineras. Por último, Herrera (2022) propuso una alternativa al proceso de amalgamación al caracterizar y modelar estadísticamente la cianuración de un mineral aurífero en el municipio de Andes. Los resultados indicaron que se pueden lograr altas recuperaciones de oro al utilizar una concentración de cianuro de 2,5 kg por tonelada y un tiempo de lixiviación de 4 horas, lo cual conlleva beneficios económicos y ambientales

De lo expuesto anteriormente, en la evaluación de los parámetros influyentes a nivel laboratorio; la concentración de NaCN y la granulometría fueron efectos que afectan al proceso de cianuración y mediante una simulación para maximizar la recuperación de Au en los relaves de flotación se obtuvo una recuperación máxima del 72.96% de Au a una [NaCN] de 0.151 % con una granulometría de 85.0 % - m200 manteniendo constante el tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l; por ende, tras aplicar estos parámetros en la Planta Beneficio Belén en el año 2022 se logró una recuperación máxima promedio del



Au del 94.44 % el cual fue mayor al obtenido del año 2021 (85.7 %) y tras la evaluación económica se tuvo una rentabilidad del 55,61 % y utilidad del 1 303 458.38 dólares US \$ en la Planta Belen en el año 2022, evidenciando el gran aporte económico de la investigación para la empresa tras la aplicación de los resultados de la investigación.



V. CONCLUSIONES

- Los efectos más significativos en la recuperación de oro del relave de flotación a nivel laboratorio, fue la concentración de NaCN y la granulometría. Siendo los valores adecuados 0,18 % de [NaCN] y 85 % - m200 de granulometría para 74.31 % de recuperación de Au y tras el análisis de pendiente máximo ascenso para la concentración del cianuro y la granulometría manteniendo fijo en valor centrado el tiempo en 24 horas y la densidad 1320 g/l se tuvo una recuperación máxima del 72.96 % a una [NaCN] de 0.151 % y una granulometría de 85.0 % - m200.
- Del balance metalúrgico de la Planta Beneficio Belén correspondiente al año 2021 la planta tenía una recuperación máxima del 85.7 % de Au, pero con la aplicación de los parámetros óptimos de la presente investigación se logró una recuperación máxima del Au del 94.44 % en el año 2022, además se evidencia que la recuperación del oro hubiera sido del 83.51 % en el año 2022 sin la aplicación la cianuración para la recuperación del Au del relave de flotación, lo cual es beneficio para la planta.
- Tras la aplicación de los parámetros obtenidos en la recuperación del oro del relave de flotación mediante la cianuración en la planta Belén correspondiente al año 2022, se tuvo una rentabilidad del 55,61 % y una utilidad del 1 303 458.38 dólares US \$ con una recuperación solamente en la cianuración del relave del 66.61 % del Au.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir evaluando algunos parámetros como el pH, ya teniendo en cuenta los parámetros óptimos logrados en la presente investigación.
- Asimismo, se recomienda evaluar la presión de aire en la cianuración del relave de flotación para evitar el consumo excesivo de cianuro.
- Desarrollar ensayos metalúrgicos con otros lixiviantes en lugar de cianuro, ya que se señala que no es amigable con el medio ambiente.



VII. REFERENCIAS

- Arham, L., Mufakhir, F., Putri, I., Wahab, Hakim, H., Handoko, A., & Sudiby. (2021). Characterization of gold ore from Babakan Loa Sub-District and leaching study in cyanide solution. *International Seminar on Mineral and Coal Technology*. <https://doi.org/doi:10.1088/1755-1315/882/1/012027>
- Arias Gonzáles, J., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*.
- Bustillo Revuelta , M. (2017). Mineral Resources. Obtenido de <https://rsteyn.files.wordpress.com/2010/07/leaching-adsorption-basics-and-example.pdf>
- Cacciuttolo, C., & Deyvis , C. (2022). Environmental Impact Assessment of Mine Tailings Spill Considering Metallurgical Processes of Gold and Copper Mining: Case Studies in the Andean Countries of Chile and Peru. *Management and Monitoring of Water and Soils Associated with Mining Activities*, 14(19), 3057. <https://doi.org/doi.org/10.3390/w14193057>
- Chávez Medina, B., & Ramirez Valverde, S. (2020). *Recuperacion de oro y plata por cianuración en mienrales oxidadas de matriz de Silice, Breapampa - Ayacucho*. [Tesis para optar el grado academico de Magister, Universidad Privada del Norte], Repositorio de la UPN. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/24560/Ch%c3%a1vez%20Medina%2c%20Bckstem%20Sleter%20-%20Ram%c3%adrez%20Valverde%2c%20Sergio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



- Chilon Chilon, H., & Mejia Garcia, M. (2018). *Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa - Arequipa*. [Tesis para optar el grado de Magister, Universidad Nacional Mayor de San Marcos], Repositorio de la UNMSM. Obtenido de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10260/Chilon_chh.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Cutti, A. (2021). *Tratamiento de los relaves de flotacion para optimizar el proceso de cianuracion orientado a mejorar la recuperacion del oro en la compañía minera Horizonte S.A.* [Tesis para optar el grado de Magister, Universidad Nacional del Centro del Perú], Repositorio de la UNCP. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7408/T010_48147209_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Deschênes, G. (2005). Advances in the cyanidation of gold. *Developments in Mineral Processing*, 15(1), 479-500. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15020-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15020-0)
- Garcia-Rosales, E. M.-S., Castruita-Avila, L. G., & Equihua-Guillen, F. (2021). Principios termodinámicos y cinéticos de la cianuración de oro y sus efectos en el proceso. Una revision. *CienciaAcierta*, 73-87. Retrieved from <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/CC66/principiostermodinamicos.pdf>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGrwaHill. <https://doi.org/978-970-10-6526-6>
- Hernandez, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Herrera Herrea, G. (2022). *Caracterización y modelamiento estadístico del proceso de cianuración de un mineral filoliano del municipio de andes, como alternativa al*



proceso de amalgamación. [Tesis para optar el grado académico de Magister, Universidad de Antioquia], Repositorio de la Universidad de Antioquia. Obtenido de

https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28832/1/HerreraGilberto_2022_CaracterizacionMineralAndes.pdf

Hu, H., & Xu, K. (2020). Physicochemical technologies for HRP and risk control. *High-Risk Pollutants in Wastewater*, 169-207. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816448-8.00008-3>

Ichau Marlon, A. (2019). *Caracterización mineralógica y optimización del proceso en la extracción de oro en una muestra de mina del sector Buenos Aires de la provincia de Imbabura*. [Tesis para optar el grado académico de Magister, Universidad Central del Ecuador], Repositorio de la Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19853/1/T-UCE-0008-CQU-183.pdf>

Khosravi, R., Azizi, A., Ghaedrahmati, R., Kumar Gupta, V., & Agarwal, S. (2017). Adsorption of gold from cyanide leaching solution onto activated carbon originating from coconut shell—Optimization, kinetics and equilibrium studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 54, 464-471. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.036>

López Fernández, A. (2007). Metales Preciosos: El Oro. En *Boletín de la Real Academia de Córdoba de Ciencias* (págs. 345-353). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2479817>

Marsden, J., & House, L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.



- Martínez-Peñuñuri, R., Parga-Torres, J., Valenzuela-García, J., Díaz-Galaviz, H., González-Zamarripa, G., & García-Alegría, A. (2023). Thermodynamic and Kinetic Aspects of Gold Adsorption in Micrometric Activated Carbon and the Impact of Their Loss in Adsorption, Desorption, and Reactivation Plants. *Advances in Mineral Processing, Waste Recycling and Extractive Metallurgy*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/ma16144961>
- Medina, D., & Anderson, C. (2020). A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates. *Advances in Mineral Processing and Hydrometallurgy*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/met10070897>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por relaves mineros. *Paidea XXI*, 11(1), 141-154. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- Michaud, D. (2012). *911Metallurgist*. Obtenido de Proceso de cianuración de oro: <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-cyanidation-process>
- Mullar, A., Halbe, D., & Barratt, D. (2002). *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Society for Mining Metallurgy, and Exploration.
- Neag, E., Kovacs, E., Dinca, Z., Török, A., Varaticeanu, LeveiErika, & Levei, E. (2020). Hydrometallurgical Recovery of Gold from Mining Wastes. *Strategies of Sustainable Solid Waste Management*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94597>
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Bogota: Ediciones de la U .
- Rodríguez Romani, C. (2019). *Recuperación de oro a partir de relaves por lixiviación en bateas en la Unidad Minera Estrella de Oro Cecomsap-Ananea, Puno*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano], Repositorio Institucional UNAP.



- Rojas Castillo, A., & Villanueva Chunque, Y. (2018). *Evaluacion tecnica y economica para la recuperacion de oro de la cancha de relaves de la empresa minera Rio Chicama S.A.C. Sayapullo, La Libertad*. [Tesis para optar el grado academico de Magister, Universidad Privada del Norte], Repositorio de la UPN. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/14199/Rojas%20Castillo%20Alexis%20Geancarlo%20%20Villanueva%20Chunque%20Yordi%20Alexis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ruiz-Córdoba, J., Lopez Cañas, C., Carmona Arango, M., & Bolivar Garcia, W. (2019). Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero. *Statistical Modeling and Optimization of the Cyanidation Process of Gold Mineral*, 28(53), 33 - 51. Obtenido de <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/9745/8252>
- Serna Durango, L., Perez Rios, L., Rafael Vellojin, R., & Alejandro Grisales, M. (20017). El mineral Oro. *Seminario de cristalografía y mineralogía*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11844.04482>
- Stephen, H. (1986). The carbon-in-pulp process. En *Precious Metals Recovery from Low-grade Resources: Proceedings, Bureau of Mines Open Industry Briefing Session at the National Western Mining Conference, Denver, CO* (págs. 40–43). Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Vilcapoma Juño, J. (2021). *Optimización de la recuperación y modelamiento de las variables operativas que afectan el circuito de lixiviación con cianuro de la planta de procesamiento de oro de Ares utilizando un modelo CCD*. [Tesis para optar el grado de maestro, Universidad Nacional del Centro del Perú], Repositorio de la UNCP. Obtenido de



https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6769/T010_43705712_M.pdf?sequence=1

Yahya, F., Ibrahim, W., Aziz, B., & Suli, L. (2020). Simulation of leaching process of gold by cyanidation. *Energy Security and Chemical Engineering Congress*.
<https://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/736/2/022111>



ANEXOS

Anexo 1. Balance general de la planta

Tabla A1. Recuperación de Au de flotación y relave

2022	tms	Au gr/tm	Ag oz/tc	Cu (%)	Relave Au Flot	Relave Au Final	Recup. Au Flot	Recup. Au Flot- CN	Rattio K	Fino Au Cf
Ene	5819.57	5.68	0.36	0.21	0.90	0.31	84.18	94.84	18.87	3524.0
Feb	6564.56	5.76	0.27	0.18	1.05	0.32	81.85	94.78	19.52	4892.8
Mar	5140.97	6.03	0.16	0.25	1.07	0.37	82.20	94.18	16.12	3715.1
Abr	4819.43	5.66	0.25	0.27	1.04	0.34	81.54	94.37	15.07	3496.5
May	1202.21	6.03	0.17	0.27	0.81	0.34	86.59	94.61	21.31	582.0
Jun	4685.10	6.15	0.38	0.29	1.23	0.45	80.02	93.07	16.66	3761.2
Jul	5099.69	6.01	0.29	0.26	1.01	0.36	83.24	94.30	16.66	3387.5
Ago	6266.98	6.19	0.21	0.32	0.91	0.37	85.35	94.50	14.21	3548.3
Set	6128.55	6.29	0.29	0.26	1.08	0.40	82.90	94.08	16.13	4310.2
Oct	6040.26	6.10	0.33	0.37	0.92	0.34	84.99	94.89	11.51	3644.7
Nov	4839.96	6.02	0.27	0.24	0.82	0.29	86.38	95.46	14.06	2644.9
Dic	5082.81	6.82	0.31	0.29	1.00	0.36	85.33	95.05	13.71	3369.2

B. Evaluación económica

Evaluación Económica - Costo Beneficio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total 2022
Volumen													
Relave a cianurar	tms	5,511	6,228	4,822	4,500	4,404	4,794	5,826	5,748	5,516	4,496	4,712	57,702
Ley													
Relave a cianurar	g/tm	0.95	1.10	1.14	1.12	1.31	1.07	0.98	1.15	1.00	0.88	1.08	1.06
Finos													
Relave a cianurar	g	5,228	6,867	5,521	5,033	5,758	5,134	5,684	6,591	5,527	3,970	5,086	61,371
Recuperación en cianuración	%	67.41%	71.25%	67.30%	69.48%	65.33%	65.98%	62.43%	65.39%	65.94%	66.63%	66.24%	66.61%
Fino Recuperado	g	3,524	4,893	3,715	3,497	3,761	3,388	3,548	4,310	3,645	2,645	3,369	40,877
Costos													
Costos Fijos	us \$	3,599	4,257	4,556	4,154	4,020	4,824	5,494	5,762	6,432	4,556	5,628	54,354
Costos Variable	us \$	31,897	29,569	25,747	26,756	27,918	29,238	31,183	41,426	34,628	22,208	21,948	329,249
Total	us \$	35,496	33,826	30,303	30,910	31,938	34,062	36,677	47,188	41,060	26,764	27,576	383,603
Costos unitario x tm tratada general													
Costos Fijos	\$/tm	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9	1.1	0.9
Costos Variable	\$/tm	5.5	4.5	5.0	5.6	6.0	5.7	5.0	6.8	5.7	4.6	4.3	5.3
Total	\$/tm	6.1	5.2	5.9	6.4	6.8	6.7	5.9	7.7	6.8	5.5	5.4	6.2
Rentabilidad Relaves EDC													
Valor Relave 100%	\$/tm	52.4	62.5	67.3	65.0	72.5	56.4	50.7	58.2	48.9	45.6	55.6	57.3
Valor Relave Recuperado	\$/tm	35.2	44.3	45.1	45.0	47.1	37.0	31.5	37.9	32.1	30.2	36.7	38.0
Costo de tratamiento	\$/tm	6.1	5.2	5.9	6.4	6.8	6.7	5.9	7.7	6.8	5.5	5.4	6.2
Utilidad	\$/tm	29.1	39.1	39.2	38.6	40.3	30.3	25.6	30.2	25.3	24.7	31.2	31.8
Rentabilidad	%	55.4%	62.6%	58.2%	59.3%	55.6%	53.8%	50.6%	51.8%	51.7%	54.2%	56.2%	55.5%
Ventas	US \$	204,70	290,81	231,72	216,69	220,70	188,77	197,41	232,04	193,92	146,24	186,29	2,343,761
Utilidad	US \$	7	0	8	8	1	1	7	6	0	6	6	1,303,344
Precio Au	\$/on	1,816	1,858	1,950	1,937	1,849	1,742	1,739	1,683	1,663	1,728	1,728	1,792

Anexo 4. Evidencias fotográficas



Figura 25. Molinos de bolas 5x10 ft – 5x8 ft de la planta flotación



Figura 26. Circuito de flotación Celdas Sub-A 24x24.



Figura 27. Molinos de Bolas 6x6 ft – 5x6 ft – 5x8 ft del circuito de cianuración



Figura 28. Tanques de cianuración



Figura 29. Equipo de trabajo unidad Minera Titan del Perú S.R.L – Planta Belen.

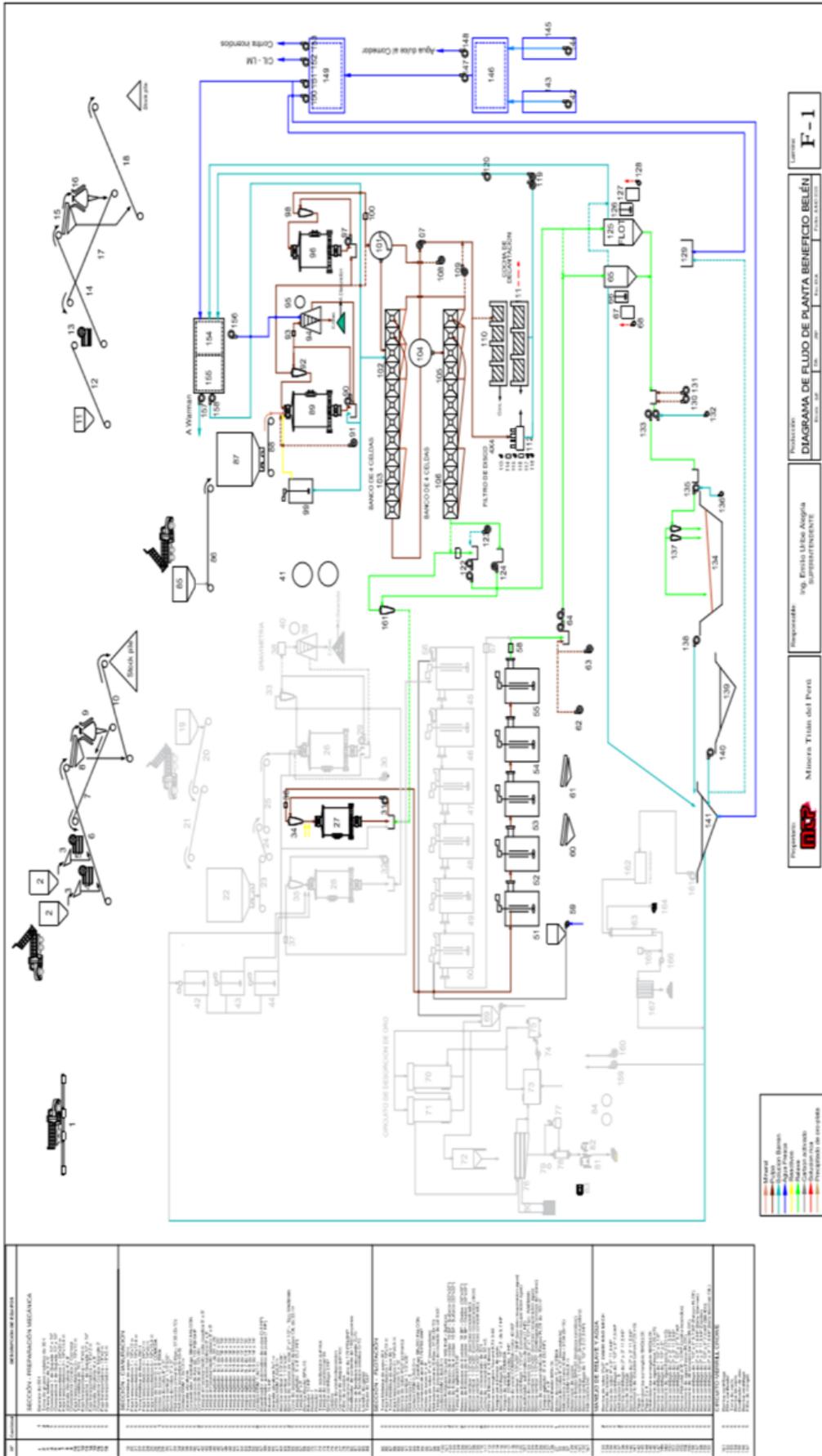


Figura 30. Diagrama de flujo Planta Belen



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ALEXANDER PARI ACHATA
identificado con DNI 77536094 en mi condición de egresado de:

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

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

RECUPERACIÓN DE ORO DEL RELAVE DE FLOTACIÓN MEDIANTE LA CIANURACIÓN EN
LA PLANTA DE BENEFICIO BELEN - AREQUIPA

” 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 13 de SEPTIEMBRE del 20 23


FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo ALEXANDER PARI ACHATA
identificado con DNI 77536094 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado Título Profesional denominado:

- RECUPERACIÓN DE ORO DEL RELAVE DE FLOTACIÓN MEDIANTE LA CIANURACIÓN EN LA PLANTA DE BENEFICIO BELEN - AREQUIPA

" 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 conexas, 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 13 de SEPTIEMBRE del 20 23


FIRMA (obligatoria)



Huella