

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Optimización del proceso de degradación del Cianuro de Sodio en el área de
Detoxificación de la Planta de Óxidos Volcan-Pasco-2024**

**Para optar el título profesional de
Ingeniero Metalurgista**

Autores:

Bach. Wilder Víctor CARHUARICRA ESTRADA

Bach. Kenyi Hector MENDOZA RIVERA

Asesor:

Dr. Antonio Florencio BLAS ARAUCO

Cerro de Pasco - Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Optimización del proceso de degradación del Cianuro de Sodio en el área de
Detoxificación de la Planta de Óxidos Volcan-Pasco-2024**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA
PRESIDENTE

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ
MIEMBRO

Mg. Carlos Lizardo ACOSTA CRESPO
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 013 2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

“Optimización del Proceso de Degradación del Cianuro de Sodio en el Área de Detoxificación de la Planta de ÓxidosVolcan-Pasco-2024”

Apellidos y nombres de los tesistas

Bach. Wilder Víctor CARHUARICRA ESTRADA

Bach. Kenyi Hector MENDOZA RIVERA

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Antonio Florencio BLAS ARAUCO

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

15 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 29 de abril del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 29.04.2026 16:42:29 -05:00

DEDICATORIA

Dedicamos la Tesis a Dios, por ser la guía constante en cada paso de nuestra vida, por brindarnos fortaleza en los momentos de mayor dificultad.

A nuestros padres, cuyo esfuerzo, dedicación y amor han sido el motor que nos ha impulsado a seguir adelante en las etapas más desafiantes.

De manera especial, reconocemos la unión y el compromiso entre los compañeros de estudio, que nos permitieron consolidar esta tesis. Esta dedicatoria es el reflejo del esfuerzo compartido entre **Wilder Víctor Carhuaricra Estrada y Kenyi Héctor Mendoza Rivera**, quienes supieron enfrentar los retos, apoyarse mutuamente y trabajar con entrega y responsabilidad hasta alcanzar este objetivo. La culminación de esta tesis no solo representa un logro académico, sino también una vivencia significativa que quedará como testimonio del esfuerzo conjunto y del deseo de superación.

AGRADECIMIENTO

Con profunda gratitud y reconocimiento expresamos nuestro agradecimiento a DIOS por permitirnos vivir esta etapa a nuestros padres y hermanos, por su confianza, sacrificio y respaldo incondicional en cada paso de este proceso. Ellos han sido la base sólida que nos permitió alcanzar esta meta.

A nuestros colegas laborales e ingenieros, cuyo ejemplo y enseñanzas fueron un impulso invaluable para nuestro desarrollo profesional

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a nuestro asesor de tesis, Al Dr. Blas Arauco Antonio Florencio, por su valiosa guía, orientación y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y apoyo constante fueron fundamentales para la culminación de nuestra investigación.

Finalmente, la gratitud se extiende a nuestra alma mater la **Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**, por brindarnos una educación de calidad que ha sido fundamental en nuestro desarrollo académico y profesional, especialmente a nuestros docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes aportaron en nuestra formación profesional.

Los Tesisistas

RESUMEN

La tesis tiene como finalidad optimizar el proceso de degradación del cianuro de sodio con el propósito de mejorar la detoxificación en la Planta de Óxidos de Cerro. Para ello, se utilizó un enfoque cuantitativo, aplicando métodos experimentales a través de un diseño factorial, que permitió la manipulación intencionada de factores experimentales clave como la dosificación de ácido de Caro, el pH, la densidad de la pulpa y el tiempo de residencia. Las técnicas de análisis abarcaron el procesamiento estadístico mediante programas como Stagraphics, así como el análisis inferencial a través de ANOVA y regresión, que permitieron determinar las condiciones óptimas para la eficiencia del proceso. Los resultados demostraron, que la interacción de las variables operacionales tuvo un impacto significativo en la reducción del cianuro total, logrando una degradación más efectiva y asegurando que los residuos cumplan con los límites máximos ambientales. Además, se evidenció que el ácido de Caro es una tecnología eficaz y segura para el tratamiento de efluentes líquidos, transformando residuos peligrosos en subproductos menos tóxicos para ayudar a mitigar el impacto ambiental de la minería. Las conclusiones indican que, mediante la optimización de los parámetros operativos, se logró reducir el cianuro total hasta 0.10 ppm, lo que permite incrementar la eficacia del proceso de detoxificación, promoviendo prácticas mineras más sostenibles. La investigación resaltó la importancia del diseño experimental de optimización más adecuado y un análisis estadístico riguroso para la validación de resultados, contribuyendo al desarrollo de soluciones técnicas eficientes en el tratamiento de efluentes mineros.

Palabras claves: Ácido de caro; degradación; cianuro total y optimización.

ABSTRACT

The thesis has like purpose to optimize the process of degradation of the sodium cyanide in order to improve the detoxification in the Oxides Plant of Cerro. For it, a quantitative focus utilized itself, applying experimental methods through a design factorial, that the intentional manipulation of experimental factors allowed key like the dosification of acid of Caro, the pH, the density of the pulp and the time of residence. The techniques of analysis comprised the statistical intervening processing you program like Stagraphics, as well as analysis inferential through ANOVA and regression, that they allowed determining the optimal conditions for the efficiency of the process. The results demonstrated, that the interaction of the operational variables had a significant impact in the reduction of the total cyanide, achieving a most effective degradation and insuring that residues should fulfill the maximum environmental limits. Besides, the fact that Caro's acid is an efficacious and safe technology for the treatment of liquid effluents became evident, turning unsafe residues into less toxic by-products to help to mitigate the environmental impact of mining. The findings suggest than, by means of the optimization of the operating parameters, the total cyanide to 0,10 ppm managed to decrease, that allows incrementing the efficacy of the process of detoxification, promoting mining practices more sustainable. The investigation highlighted the importance of the experimental design of best-suited optimization and a rigorous statistical analysis for the validation of results, contributing to the development of technical efficient solutions in the treatment of mining effluents.

Keywords: Acid of expensive; degradation; total cyanide and optimization.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas de mayor importancia en el mundo, ya que provee minerales esenciales para el desarrollo industrial y tecnológico. Sin embargo, esta actividad también conlleva impactos ambientales significativos, en particular la generación de residuos líquidos contaminados con sustancias peligrosas, entre ellas el cianuro de sodio. El cianuro es ampliamente utilizado en procesos de lixiviación para la recuperación de oro y otros metales preciosos, dado su alta eficiencia en la disolución de estos minerales. No obstante, su manejo y disposición constituyen un desafío ambiental considerable, debido a su elevada toxicidad y persistencia en el ambiente.

La presencia de cianuro en los efluentes mineros requiere de técnicas de tratamiento que aseguren la reducción de su concentración a niveles permitidos por las normativas ambientales nacionales e internacionales. La correcta gestión de estos residuos es fundamental para prevenir la contaminación de recursos acuáticos, suelo y biota, garantizando así la protección del ecosistema y la salud pública.

En este contexto, el uso de reactivos químicos como el ácido de Caro (una solución de ácido sulfúrico y peróxido de oxígeno) ha emergido como una alternativa eficiente para la degradación del cianuro en efluentes líquidos. Este método se basa en procesos de oxidación que transforman el cianuro tóxico en compuestos menos peligrosos, como el cianato, facilitando su eliminación o disposición segura. El sistema de detoxificación mediante ácido de Caro ha sido implementado con éxito en diversas minas a nivel global, incluyendo países como Estados Unidos, Canadá y Australia, donde se han obtenido resultados satisfactorios en la reducción de cianuro y cumplimiento normativo.

No obstante, la aplicación de esta tecnología en un contexto específico requiere de un análisis detallado y un control preciso de las variables operativas. Factores experimentales como la dosificación del reactivo, el pH del medio, la densidad de la pulpa y el tiempo de

residencia son determinantes en la eficiencia del proceso. La optimización de estos parámetros se puede lograr mediante un enfoque experimental, en el cual se manipulan sistemáticamente dichas dimensiones y se miden sus efectos sobre la reducción de cianuro.

Desde una perspectiva científica, la investigación bajo un enfoque cuantitativo permite aplicar metodologías estadístico-analíticas para validar las hipótesis formuladas, identificar relaciones causales y construir modelos predictivos que optimicen la operación del proceso. La utilización de diseño de experimentos, análisis de varianza (ANOVA), regresiones y técnicas de optimización contribuir a determinar las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia del tratamiento de la degradación de los cianuros, sustentando los resultados en datos verificables y reproducibles.

El presente estudio se enmarca en la necesidad de mejorar las técnicas de detoxificación utilizadas en la Planta de Oxidos-Volcan-2024, especialmente mediante la optimización del proceso de degradación del cianuro de sodio usando ácido de Caro. La investigación tiene como objetivo principal evaluar el efecto de diferentes factores experimentales en la eficiencia del proceso, con el fin de establecer condiciones operativas que permitan cumplir con los límites permitidos por las regulaciones ambientales, reducir costos operativos y promover una minería más responsable y sostenible.

Asimismo, la investigación contribuir a ampliar el conocimiento técnico y científico en el campo del tratamiento de residuos mineros, generando resultados

aplicables a otras operaciones mineras que enfrentan problemas similares. La utilización de herramientas estadístico-matemáticas permitirá desarrollar un modelo de optimización que facilite la toma de decisiones y la implementación de mejores prácticas en la gestión de residuos tóxicos.

Finalmente, la relevancia de este estudio radica en su potencial impacto social y ambiental, al garantizar un proceso de detoxificación más eficiente y confiable. La reducción

en la concentración de cianuro en los residuos líquidos disminuirá los riesgos para las comunidades cercanas, recursos hídricos y ecosistemas, consolidando prácticas mineras que respeten el medio ambiente y contribuyan a un desarrollo sustentable.

INDICE

	Página
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
INDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	3
1.3. Formulación del problema.....	5
1.3.1. Problema general	5
1.3.2. Problemas específicos.....	6
1.4. Formulación de Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación de la investigación	7
1.6. Limitaciones de la investigación	9

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	11
2.1.1. Antecedentes internacionales	11

2.1.2. Antecedentes nacionales	15
2.2. Bases teóricas - científicas.....	18
2.2.1. Normatividad vigente del control ambiental	18
2.2.2. El medio ambiente derecho fundamental de la población	19
2.2.3. Toxicidad de cianuro sodio.....	20
2.2.4. Efluentes líquidos según D.S.010-2010- MINAM.....	21
2.2.5. Límites máximos permisible para la descarga de efluentes líquidos para las actividades minero-metalúrgicas.	21
2.2.6. Significado de cianuro.	23
2.2.7. Compuestos derivados del cianuro.	24
2.2.8. Estado natural del cianuro	24
2.2.9. Empleos del cianuro	25
2.2.10. Toxicidad del cianuro de sodio.....	25
2.2.11. Métodos de degradación o detoxificación de cianuro	26
2.2.12. Ácido de Caro	28
2.2.13. Preparación del ácido de caro	29
2.2.14. Propiedades Fisicoquímicas del Ácido de Caro	29
2.2.15. Detoxificación de efluentes líquidos contaminados con cianuro	31
2.2.16. Reacciones de oxidación del cianuro.....	32
2.2.17. Tipos de cianuro que son tratados durante la detoxificación.....	33
2.2.18. Tratamiento con ácido de caro.....	33
2.2.19. Otros usos del ácido de caro en la degradación.....	34
2.2.20. Características principales de degradación del H ₂ SO ₅	35
2.2.21. Ventajas del ácido de caro en efluentes mineros.	35
2.3. Definición de términos básicos	36

2.4. Formulación de Hipótesis.....	38
2.4.1. Hipótesis general	38
2.4.2. Hipótesis específicas.....	38
2.5. Identificación de variables.....	39
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	39

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	41
3.2. Nivel de investigación	42
3.3. Métodos de investigación.....	43
3.4. Diseño de investigación.....	44
3.4.1. Ventajas de los diseños factoriales	45
3.5. Población y muestra	46
3.5.1. Población	46
3.5.2. Muestreo	47
3.5.3. Muestra	49
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
3.6.1. Técnicas de recolección de datos.....	50
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	50
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	52
3.7.1. Selección de los instrumentos de investigación	52
3.7.2. Validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	52
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	53
3.8.1. Técnicas de procesamiento de datos.....	53
3.8.2. Técnicas de análisis de datos	54

3.9. Tratamiento estadístico.....	54
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica	55

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	57
4.1.1. Preparación del Ácido de Caro	57
4.1.2. Propiedades físicas del Ácido de Caro	59
4.1.3. Descripción del proceso DETOX	60
4.1.4. Ensayos preliminares de detoxificación	60
4.1.5. Diseño de investigación.....	62
4.1.6. Caracterización de la muestra.....	63
4.1.7. Toma de muestras y análisis químico global de la muestra	64
4.1.8. Parámetros experimentales de los factores de control experimental.....	65
4.1.9. Diseños factoriales y sus ventajas.	66
4.1.10. Diseños factoriales de los procesos experimentales	66
4.1.11. Estrategias para la selección de los factores experimentales.....	67
4.1.12. Diseño Factorial Fraccionado, 2^{k-p}	69
4.2. Presentación, análisis e interpretación de los resultados	70
4.2.1. Presentación de los resultados experimentales	70
4.2.2. Análisis e interpretación de los resultados.	70
4.2.3. Proceso de optimización del proceso de degradación del cianuro	75
4.2.4. Segundo proceso de optimización.	81
4.3. Prueba de Hipótesis	82
4.3.1. Criterios de rechazo o aceptación a la H_0	83
4.3.2. Análisis del ANOVA para la prueba de hipótesis	83

4.4. Discusión de resultados	84
------------------------------------	----

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1 Límites máximos permisibles para Efluentes Minero-Metalúrgicos en el Perú.....	23
Tabla 2 Concentraciones de cianuro en algunas plantas.....	25
Tabla 3 Resumen comparativo de los métodos de tratamiento de los cianuros.....	27
Tabla 4 Recomendaciones de uso	27
Tabla 5 Propiedades físicas del ácido de Caro	30
Tabla 6 Dimensiones de la variable independiente.....	40
Tabla 7 Métodos de degradación del cianuro.....	44
Tabla 8 Tabla de dosificación de preparaciones comunes.....	59
Tabla 9 Propiedades físicas del Ácido de Caro recién preparado.....	59
Tabla 10 Resultados de degradación del cianuro, ciclo I.....	61
Tabla 11 Resultados de destrucción del cianuro, ciclo 2	62
Tabla 12 Resumen de los ensayos cuasiexperimentales del proceso de degradación del cianuro	63
Tabla 13 Muestreos y análisis del efluente con contenido de cianuro.....	63
Tabla 14 Contenido de cianuro y metales.....	63
Tabla 15 Características físicoquímicas de la muestra	65
Tabla 16 Valores de los factores experimentales.....	67
Tabla 17 Diseño factorial fraccionado con valores reales	69
Tabla 18 Resultados del diseño factorial fraccionado.....	70
Tabla 19 Efectos principales para la degradación del cianuro.....	72
Tabla 20 Análisis de varianza para la degradación del cianuro (ANOVA).....	72
Tabla 21 Regresión lineal de la degradación del cianuro	74
Tabla 22 Valores óptimos de los factores	75

Tabla 23 Factores de optimización y sus niveles	76
Tabla 24 Plantilla del DCC para la optimización	76
Tabla 25 Pruebas experimentales de optimización	77
Tabla 26 Análisis de varianza de optimización del cianuro	80
Tabla 27 Modelo matemático de segundo orden	80
Tabla 28 Valores para continuar con la optimización	81
Tabla 29 Resultados después de optimización.....	81
Tabla 30 Valores para la segunda optimización	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina.
Figura 1 Tipos de cianuros de efluentes mineros para su detoxificación	33
Figura 2 Diagrama de Pareto estandarizada para la degradación del cianuro	71
Figura 3 Gráfica de efectos principales para la degradación del cianuro	71
Figura 4 Superficie de respuesta estimada para la degradación del cianuro.....	74
Figura 5 Diagrama de Pareto estandarizada para degradación del cianuro	78
Figura 6 Superficie de respuesta estimada de optimización	79

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

En las últimas décadas, el aumento de los casos de impactos ambientales provocados por la actividad minera en Perú ha suscitado una creciente preocupación acerca de cómo se lleva a cabo y regula esta actividad.

Los daños a la integridad y funcionamiento de los ecosistemas, así como a la salud de las personas, son consecuencia de una planificación y evaluación inadecuadas, de condiciones técnicas deficientes en las operaciones y en el tratamiento de los productos minerales y desechos, así como del manejo inapropiado de los pasivos ambientales generados por la minería y la falta de cumplimiento de los planes de cierre, siendo la actividad minera responsable de daños significativos al medio ambiente.

En Perú, la explotación de plata y oro ha provocado la contaminación de grandes volúmenes de agua, dado que no se cuenta con una gestión integral adecuada de este recurso. La tecnología empleada para el desarrollo de estos proyectos no es la más adecuada debido a su elevado costo de operación y mantenimiento. Por estas

razones, muchas comunidades han manifestado su oposición a este tipo de proyectos, dejando los yacimientos sin explotar. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, los proyectos mineros existentes deben implementar un sistema de gestión adecuado que permita mantener un equilibrio social, económico y ambiental.

La Empresa Minera VOLCAN, en su Planta de Óxidos, se dedica al procesamiento de los minerales oxidados y sulfurados que se encuentran en depósitos conocidos como "Stock Piles" o "Pacos". Estos minerales, que han estado acumulándose desde aproximadamente 1956, son el resultado del desmonte realizado durante las operaciones de tajo abierto para la extracción de plata con una concentración del 85 %.

Los relaves generados por el proceso de lixiviación de plata y oro, que contienen un alto nivel de cianuro, suelen ser desechados en canchas de relaves. Debido a las condiciones climáticas, estas canchas filtran soluciones de cianuro solubilizado y producen gases cianhídricos, lo que tiene un gran impacto ambiental.

En la actualidad, se están llevando a cabo esfuerzos para extraer cianuros de estos relaves, pero no se logran cumplir con los límites máximos permitidos.

Por consiguiente, la empresa minera enfrenta un problema ambiental significativo relacionado con la presencia de cianuro libre en sus relaves de cianuración. El cianuro es un compuesto químico altamente tóxico que se utiliza en la minería de oro para la extracción del mineral; sin embargo, si no se gestiona adecuadamente, puede causar daños ambientales graves, afectando la calidad del agua, los suelos y la biodiversidad circundante. En numerosas ocasiones, el cianuro residual que queda en los relaves puede filtrarse a los cuerpos de agua locales, provocando contaminación y poniendo en riesgo la salud de los seres vivos.

La literatura abierta indica que los factores que afectan la detoxificación de los relaves son: pH, temperatura, concentración de cianuro y cantidad de ácido de Caro;

de todos ellos, el estudio se enfocó en analizar esta influencia en función del pH, el tiempo de residencia y la concentración de cianuro. Sin embargo, se desconoce el impacto de la concentración inicial de cianuro y las proporciones de ácido de Caro mejorado en el proceso de detoxificación.

1.2. Delimitación de la investigación

Pueden existir diversos criterios teóricos al iniciar una investigación, en aspectos como el tema, una población, un lugar, un momento; no obstante, falta indicar el aspecto social que se indagará, ya que la delimitación conceptual evitará querer interrogarlo todo a nivel empírico sobre el contexto predefinido (Chaverri Chaves, 2017, pág. 190)

Para un ingeniero metalúrgico, la delimitación en una tesis académica es un aspecto crucial que define los límites y el alcance particular de la investigación. Se puede comparar con la tarea de establecer los contornos de tu área de estudio antes de comenzar a excavar; no es posible investigar todo el yacimiento, por lo que es necesario determinar dónde y cómo se llevará a cabo el trabajo.

En el presente caso del proyecto de tesis académica, el estudio de investigación se delimita del modo siguiente:

a. Delimitación teórica o conceptual:

Esta delimitación asegura que el estudio se mantenga enfocado en los aspectos químicos, fisicoquímicos y operativos de la degradación del cianuro, permitiendo una optimización profunda y pertinente a la realidad de la planta de óxidos de Volcán.

En esta se definirá qué aspectos específicos de la ingeniería metalúrgica se debe abordar, con la finalidad de evitar que el proyecto o tesis sea demasiado amplio o superficial, en el presente caso se estudiará temas tales como:

- La teoría de la detoxificación de cianuro, sus principios fundamentales y las principales metodologías aplicables a escala laboratorio posteriormente a escala industrial en plantas de procesamiento de minerales.
- El estudio consiste en la **optimización de los parámetros operativos** que afectan directamente la eficiencia de la degradación del cianuro, tales como:
 - **pH:** Su influencia en la estabilidad de las especies de cianuro y la eficiencia de los agentes oxidantes.
 - **Potencial redox:** Su papel en la oxidación del cianuro y el consumo de reactivos.
 - **Concentración de cianuro:** En función de los límites de descarga ambiental y la eficiencia del proceso.
 - **Ácido de caro:** Debe ser el reactivo para degradar o detoxificación de la concentración del cianuro.
 - **Tipo y dosificación de agentes oxidantes:** Ya sean químicos (p. ej., peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio) o el uso de procesos electroquímicos.
 - **Tiempo de residencia:** Como factor crítico para alcanzar los niveles de detoxificación deseados.
- Posiblemente se presentarán otros tópicos durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

Esta delimitación garantiza que el estudio se concentre en los aspectos químicos, fisicoquímicos y operativos de la degradación del cianuro, facilitando una optimización exhaustiva y relevante para la realidad de la planta de óxidos de Volcan.

b. Delimitación espacial.

Son los aspectos que indica el lugar de desarrollo del trabajo de investigación, en el presente caso es:

Región : Pasco

Provincia : Pasco

Distrito : Simón Bolívar

Altitud : 4 360 m s. n. m.

c. Delimitación temporal.

El desarrollo de la tesis se realizó durante los meses indicados en el cronograma de actividades del proyecto.

1.3. Formulación del problema

La formulación del problema general y específicos es considerada como el epicentro del trabajo de investigación del proyecto o tesis, todas las demás formulaciones serán en torno a esta pregunta principal; si tu problema general es vago o mal planteado, toda la tesis se verá afectada. Por lo tanto, la formulación del problema general del proyecto de tesis constituye uno de los pasos más cruciales y esenciales. En esencia, representa la pregunta central a la que tu investigación intenta dar respuesta, y debe ser lo suficientemente clara, precisa y pertinente para orientar todo tu estudio de investigación académica.

1.3.1. Problema general

¿En qué medida la optimización del proceso de degradación del cianuro de sodio puede mejorar en el Área de Detoxificación de la Planta de Óxidos- Volcan- 2024?

1.3.2. Problemas específicos

Para estas formulaciones se debe identificar las variables y los factores del proceso de investigación académica. Tomando en cuenta el título del proceso de investigación, se determinó los siguientes factores experimentales:

- Ácido de caro
- pH
- Densidad de la pulpa
- Tiempo de residencia Las formulaciones son las siguientes:
 - a. ¿Cómo la dosificación de ácido de caro influye la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos- Volcan-Pasco-2024?
 - b. ¿En qué medida el pH de la pulpa influye en la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan- Pasco-2024?
 - c. ¿Cómo la densidad de la pulpa influye en la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan- Pasco-2024?
 - d. ¿De qué manera el tiempo de residencia influye en la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos- Volcan-Pasco-2024?

1.4. Formulación de Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la optimización del proceso de degradación del cianuro de sodio para mejorar la detoxificación en el área de la Planta de Óxidos- Volcan-2024

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar la dosificación de ácido de caro para la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan-Pasco-2024
- b. Establecer el valor del pH de la pulpa para la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan- Pasco-2024
- c. Determinar la densidad de la pulpa para la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan- Pasco-2024
- d. Establecer el tiempo de residencia para la degradación del cianuro de sodio en el área de detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan- Pasco-2024

1.5. Justificación de la investigación

La optimización del proceso de eliminación disminuiría el impacto en los ecosistemas acuáticos ocasionado por el cianuro presente en estas aguas; para las industrias mineras, esto conlleva una mejora en el cumplimiento de la normativa y un ahorro en la implementación de tratamientos de agua eficaces, así como la posibilidad de evitar sanciones por daños ambientales. Finalmente, las comunidades cercanas se verían beneficiadas de manera indirecta, ya que las aguas utilizadas en los sistemas de abastecimiento para el beneficio minero, desde un enfoque fisicoquímico, presentarían una calidad superior.

En este escenario, el ácido de Caro (H_2SO_5), igualmente denominado ácido peroxomonosulfúrico, ha probado ser una opción sumamente eficaz y eficiente para la detoxificación de cianuros libres y complejos metálicos.

En la Planta de Óxidos, usualmente se aplica el ácido de Caro en fases posteriores al proceso de lixiviación y antes de la finalización de los efluentes

líquidos. Esto se lleva a cabo a través de la dosificación regulada del reactivo en sistemas agitados y bajo condiciones de pH determinadas (generalmente entre 8,5 y 10) para mejorar la eficacia del proceso de oxidación.

Como un beneficio práctico, se sugiere una modificación en la utilización del ácido de Caro para la detoxificación del cianuro, en la que se determinarán las condiciones óptimas del proceso, lo que permitirá explicar el fenómeno.

La optimización del proceso de eliminación disminuiría el impacto en los ecosistemas acuáticos ocasionado por el cianuro presente en las aguas. Para las industrias mineras, esto conlleva una mejora en el cumplimiento de la normativa y un ahorro en la implementación de tratamientos de agua eficaces, así como la prevención de sanciones por daños ambientales. Finalmente, las comunidades cercanas se verían beneficiadas de manera indirecta, ya que las aguas utilizadas en los sistemas de abastecimiento para el beneficio minero, en términos fisicoquímicos, mostrarían una calidad superior.

La compañía obtendrá beneficios económicos al no poseer pasivos ambientales, los cuales están sujetos a sanciones impuestas por las auditorías ambientales mineras que supervisan la concentración de cianuro en los efluentes.

Además, conforme al **artículo 9° de la Ley N° 28611**, Ley General del Ambiente, la finalidad de la Política Nacional del Ambiente es elevar la calidad de vida de los ciudadanos, asegurando la preservación de los ecosistemas a largo plazo.

Justificación Ambiental: La eliminación o reducción considerable del cianuro libre en los familiares contribuye a la protección del medio ambiente, al disminuir la exposición a la contaminación de fuentes de agua y suelos adyacentes. Esto es esencial para la conservación de la biodiversidad local y la salud de las comunidades cercanas. La implementación de un tratamiento adecuado del cianuro

también contribuye a mitigar los efectos a largo plazo en el ecosistema, facilitando la recuperación de los recursos naturales y disminuyendo el riesgo de daños irreversibles.

Justificación metodológica: Desde un enfoque metodológico, esta tesis se considera innovadora, ya que aplicará el método ácido de Caro en condiciones específicas relacionadas con los parientes de la minera San Simón. Se realizarán pruebas experimentales controladas para analizar la efectividad del método en la reducción de cianuro libre, adaptándolo a las condiciones particulares del relave de esta mina, lo que permitirá validar su aplicabilidad y eficacia. El enfoque experimental ofrecerá una base científica robusta para posibles mejoras y optimizaciones en el tratamiento del cianuro.

Justificación social: Empleando el método de Caro para tratar el cianuro presente en los relaves se estará contribuyendo a disminuir la contaminación beneficiándose los pobladores del entorno, la flora y fauna del ecosistema

1.6. Limitaciones de la investigación

En una planta de óxidos, la degradación del cianuro de sodio tiene varias restricciones técnicas, operativas y ambientales que se deben tener en cuenta con cautela para establecer procesos seguros y eficaces. Uno de los retos más significativos reside en la composición química del cianuro, que, pese a que puede ser descompuesto por técnicas físicas, químicas o biológicas, necesita condiciones particulares de pH, temperatura y tiempo de almacenamiento para lograr niveles de eliminación aceptables. En las instalaciones de óxidos, donde la infraestructura suele estar diseñada para procesos de lixiviación con ácido sulfúrico y no con cianuro, ajustar los sistemas actuales puede suponer un elevado gasto tanto técnico como económico.

Adicionalmente, la existencia de otros componentes en la disolución, tales como cobre, hierro y materia orgánica, puede obstaculizar los procesos de oxidación

del cianuro. Estos componentes tienen la capacidad de interactuar con los agentes degradantes, disminuir su eficacia o generar complejos metálicos- cianurados que resultan más complicados de eliminar. Esta interferencia química dificulta la elección y uso de técnicas como la oxidación con peróxido de hidrógeno, dióxido de azufre/aire (INCO), o incluso la oxidación con ozono, que demandan condiciones reguladas y un seguimiento continuo.

Otra restricción es la existencia de espacio y equipo en la fábrica. Las fábricas de óxidos generalmente están concebidas para operaciones particulares con ácidos reactivos, por lo que la aplicación de sistemas extra para el procesamiento de cianuro, como biorreactores o reactores de oxidación— puede conllevar alteraciones estructurales y un incremento en el uso de energía, agua y reactivos. Esto podría ser inviable desde una perspectiva económica, particularmente en plantas de tamaño medio o pequeño.

Desde la perspectiva ambiental y regulatoria, el manejo del cianuro conlleva elevados criterios de seguridad y supervisión, tanto en su empleo como en su eliminación. Es complicado cumplir con las normativas locales e internacionales respecto a los límites de cianuro libre y total en los efluentes, especialmente si no se dispone de un sistema de tratamiento y seguimiento constante. Además, cualquier avería en el sistema de degradación puede suponer un peligro significativo para el entorno y la salud de los empleados, lo que requiere la aplicación de protocolos rigurosos y personal altamente cualificado

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Saa Cardona & Guarnizo Ruiz (2022) manifiestan que la detoxificación es el proceso a través del cual se consigue eliminar el cianuro presente en las aguas de estos relaves. Estos procesos pueden incluir la degradación natural, la acidificación, la oxidación de cloruro alcalino (cloración alcalina), la oxidación de dióxido de azufre, el ozono, la oxidación de peróxido de hidrógeno, la oxidación de dióxido de azufre (INCO SO₂/Aire) y la precipitación de Hemlo/Golden Giant (sulfato de hierro y cobre), así como la acidificación-volatilización-regeneración (AVR), la adsorción de carbón activado, el intercambio iónico, la fotooxidación, la oxidación electrolítica y la oxidación bacteriana. Los estudios realizados sobre estos métodos físicos, químicos y biológicos, así como la combinación de los mismos, indican que la eliminación o recuperación del cianuro no se logra de manera completa en los cianuros residuales.

Zapata & Bermudez (2019) manifiesta que el cianuro es un compuesto químico, altamente tóxico, clasificado como sustancia de interés sanitario en el Decreto

1594 de 1984, concepto ratificado por la Resolución 0631 de 2015 que, además, establece los parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistema de alcantarillado público, en Colombia, este compuesto es comúnmente utilizado en procesos productivos industriales, tales como: Minería aurífera, metalurgia para galvanización, industria siderurgia (tratamientos térmicos y limpieza de metales), fotografía, industria tabacalera, industria militar, entre otras; debido a la falta de control en los vertimientos de las aguas residuales industriales (ARI) contaminadas con cianuro, los efluentes son dispuestos en cuerpos de agua superficiales, suelos y/o sistemas de alcantarillado público sin previo tratamiento; por lo que, respondiendo a políticas públicas de desarrollo sostenible y de calidad del agua, y con el fin de proponer soluciones ecoeficientes y sustentables para preservar los cuerpos de agua el presente trabajo pretende hacer una revisión del estado del arte de la degradación de cianuro en aguas residuales industriales (ARI) a través de un comparativo entre tratamientos convencionales (químicos) y tratamientos biológicos (biotecnología) a través de la aplicación de microorganismos degradadores de cianuro con el fin de revisar cuál es más eficiente o cómo un tratamiento puede, eventualmente, apoyar a otro con el fin minimizar y mitigar impactos ambientales negativos.

Saa Cardona & Guarnizo Ruiz (2022) afirman, que la cianuración es el método de extracción de oro más empleado a nivel global, dado que utiliza el oxígeno disponible en el entorno para oxidar el ion cianuro (CN^-), lo que provoca que el oro se disuelva, formando una solución líquida de cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de potasio (KCN); los residuos generados en este proceso son sometidos a lixiviación para recuperar, a través de filtración, el oro líquido y separarlo de las impurezas y sustancias tóxicas, permitiendo así su vertimiento en fuentes hídricas. No

obstante, la mezcla que finalmente se verterá requiere un tratamiento previo para atenuar, eliminar o degradar el cianuro presente, ya que este puede tener concentraciones altamente tóxicas para animales, plantas y seres humanos; este proceso se denomina detoxificación, y su objetivo es eliminar las diversas formas de cianuro libre (CN^-) y los complejos metálicos asociados con cobre y zinc, que constituyen el cianuro débilmente dissociable en ácido (CN WAD). En este estudio se analizaron las diferentes formas de remoción de cianuro en los efluentes de los relaves de las minas de extracción de oro, evaluando la eficiencia de remoción a partir de experiencias documentadas en la bibliografía; para ello, se revisaron un total de 18 documentos que permitieron concluir que el método más efectivo para la remoción de cianuro es el Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) con el Catalizador Sulfato de Cobre (CuSO_4) y el Ácido Peroximonosulfúrico o Peróxido Ácido Sulfúrico (Ácido de Caro H_2SO_5), reportando tasas de remoción de cianuro libre del 99,99% y 99,6%, respectivamente.

Garza Román, et. al. (2022), sostienen que la cianuración es el método de extracción de oro más empleado a nivel global, dado que utiliza el oxígeno disponible en el entorno para oxidar el ion cianuro (CN^-), lo que provoca que el oro se disuelva, formando una solución líquida de cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de potasio (KCN); los residuos generados en este proceso son sometidos a lixiviación para recuperar, a través de filtración, el oro líquido y separarlo de las impurezas y sustancias tóxicas, permitiendo así su vertimiento en fuentes hídricas. No obstante, la mezcla que finalmente se verterá requiere un tratamiento previo para atenuar, eliminar o degradar el cianuro presente, ya que este puede tener concentraciones altamente tóxicas para animales, plantas y seres humanos; este proceso se denomina detoxificación, y su objetivo es eliminar las diversas formas de cianuro libre (CN^-) y

los complejos metálicos asociados con cobre y zinc, que constituyen el cianuro débilmente dissociable en ácido (CN WAD). En este estudio se analizaron las diferentes formas de remoción de cianuro en los efluentes de los relaves de las minas de extracción de oro, evaluando la eficiencia de remoción a partir de experiencias documentadas en la bibliografía; para ello, se revisaron un total de 18 documentos que permitieron concluir que el método más efectivo para la remoción de cianuro es el Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) con el Catalizador Sulfato de Cobre ($CuSO_4$) y el Ácido Peroximonosulfúrico o Peróxido Ácido Sulfúrico (Ácido de Caro H_2SO_5), reportando tasas de remoción de cianuro libre del 99,99% y 99,6%, respectivamente.

Zapata Alfonso & Bermúdez Palma (2021), afirman que el cianuro es un compuesto químico, altamente tóxico, clasificado como sustancia de interés sanitario en el Decreto 1594 de 1984, concepto ratificado por la Resolución 0631 de 2015 que, además, establece los parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistema de alcantarillado público; en Colombia, este compuesto es comúnmente utilizado en procesos productivos industriales, tales como:

Minería aurífera, metalurgia para galvanización, industria siderurgia (tratamientos térmicos y limpieza de metales), fotografía, industria tabacalera, industria militar, entre otras, debido a la falta de control en los vertimientos de las aguas residuales industriales (ARI) contaminadas con cianuro, los efluentes son dispuestos en cuerpos de agua superficiales, suelos y/o sistemas de alcantarillado público sin previo tratamiento; por lo que, respondiendo a políticas públicas de desarrollo sostenible y de calidad del agua, y con el fin de proponer soluciones ecoeficientes y sustentables para preservar los cuerpos de agua el presente trabajo pretende hacer una revisión del estado del arte de la degradación de cianuro en aguas residuales industriales (ARI) a través de

un comparativo entre tratamientos convencionales (químicos) y tratamientos biológicos (biotecnología) a través de la aplicación de microorganismos degradadores de cianuro con el fin de revisar cuál es más eficiente o cómo un tratamiento puede, eventualmente, apoyar a otro con el fin de minimizar y mitigar impactos ambientales negativos.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Aroni Katherine & Morales Yesenia (2023) manifiestan que se emplearon métodos de oxidación química utilizando peróxido de hidrógeno y el proceso INCO (metabisulfito de sodio) para la detoxificación de los efluentes mineros cianurados, evaluando el efecto en la remoción de cianuro libre. En primer lugar, se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica del efluente (pH, temperatura, TSS, cianuro libre, cianuro total, Cu, Fe, Zn, Pb y As). Para la etapa de oxidación con peróxido de hidrógeno, se aplicaron dosificaciones que oscilaron entre 100 y 250 ppm, mientras que para el metabisulfito de sodio se utilizaron concentraciones de 100 a 200 ppm. Todas las pruebas se realizaron a un pH superior a 9, con una agitación de 200 rpm y un tiempo de reacción de 2 horas. Los resultados indicaron que las condiciones óptimas correspondían a 150 ppm de peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio, con una reacción de segundo orden y una constante de velocidad de $k = 0,0347 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, logrando un porcentaje de reducción de cianuro libre del 99,84% y un valor final de cianuro libre de 0,020

ppm, cumpliendo así con los estándares establecidos en la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM. Se analizaron los resultados mediante el método factorial, observando que la interacción entre el peróxido de hidrógeno y el metabisulfito de sodio influye en la reducción del cianuro.

Pomalaza Romero (2016), demuestra que, en la caracterización de los efluentes residuales de cianuración del laboratorio experimental de hidrometalurgia

de la Planta Piloto Metalúrgica de Yauris, se obtuvo un resultado de 75 mg/l de CN⁻, valores que superan los límites máximos permisibles. Por lo tanto, surgió la necesidad de implementar un método de degradación para reducir esta concentración y prevenir impactos negativos en el medio ambiente. Para la degradación del cianuro presente en las soluciones residuales del laboratorio experimental de hidrometalurgia, se utilizó la oxidación química con Ácido de Caro, logrando que, al finalizar la reacción, el contenido de la solución cianurada tratada se encontrara dentro de los límites máximos permisibles establecidos por el MINAM, siendo menor a 1 mg/l de cianuro y con un pH superior a 5,5 y menor a 10,5. Se obtuvieron resultados satisfactorios en la eliminación del cianuro residual, aprovechando la oxidación química con el Ácido de Caro. Por lo tanto, esta tecnología aplicada al tratamiento de los efluentes de cianuración de oro contribuyó a evitar impactos negativos.

Alonso (2025) los relaves de empresas mineras formales e informales dedicadas a la extracción del metal precioso oro producen residuos sólidos denominados relaves que contienen el cianuro libre, que como tal es la forma más toxica para salud como para el medio ambiente comparando con las demás formas de cianuro existente, en la empresa minera San Simón ubicada en el distrito de Cachicadan, su relave contiene una concentración de cianuro libre de 215,6 partes por millón, qué ha contaminado el medio ambiente y las aguas del rio Suro, por lo tanto, la presente investigación fue emplear el método acido de Caro, que es una mezcla de peróxido de hidrogeno (50%) y ácido sulfúrico (98%) en relaciones molares diferentes para degradar el cianuro libre existente. La relación molar optima fue la de 1:2 para un tiempo de 20 minutos y a un pH de 10,5 unidades; la preparación del ácido de Caro se realizó a nivel de laboratorio teniendo en cuenta la temperatura y por ser exotérmica se empleó trozos de hielo a fin de mantener a 20°C y evitar salpicaduras por parte del ácido sulfúrico. La parte

experimental demostró que el ácido de Caro degrada al cianuro convirtiéndolo a ion cianato (CNO^-) y luego el cianato se degrada en productos inocuos al ecosistema. Se obtuvo un porcentaje de remoción de cianuro de 93,78 %, lo cual demuestra que aplicando este método se puede eliminar el cianuro libre de los relaves de forma eficaz y viable y de esta manera evitar que se convierta en un pasivo ambiental.

Fárez et al. (2011), demuestran que su trabajo de tesis está enfocado en la reducción de la cantidad de cianuro de este tipo de aguas residuales, mediante un proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), cuya concentración pertenece al orden de 130 volúmenes; para lo cual se diseñó y construyó un equipo conformado por un sistema de distribución, mismo que suministra el agua a tratar hacia tres cubas de acero inoxidable 304; además de un sistema de control de temperatura (basado en pirómetros) y un sistema de agitación (bombas de agua), los resultados finales evidenciaron que el mejor tratamiento, con un rendimiento de 74%, se presenta a los 180 minutos con una temperatura de 26°C. Las condiciones óptimas necesarias para lograr este resultado son un pH de 10, agitación constante para homogenizar los componentes y la aplicación de una sola vez del volumen total de peróxido de hidrógeno.

Aroni Katherine & Morales Yesenia (2023) usaron los métodos por oxidación química con peróxido de hidrógeno y proceso INCO (metabisulfito de sodio) para la detoxificación de los efluentes mineros cianurados evaluando el efecto de remoción de cianuro libre. Inicialmente se realizó una caracterización fisicoquímica al efluente (pH, temperatura, TSS, cianuro libre, cianuro total, Cu, Fe, Zn, Pb y As), para la etapa de oxidación con peróxido de hidrógeno se usó dosificaciones entre 100-250 ppm y para el metabisulfito de sodio entre 100-200 ppm. Todas las pruebas se realizaron a $\text{pH} > 9$, con revoluciones de 200 rpm a tiempo de reacción de 2h. Los

resultados de las condiciones óptimas fueron de 150 ppm de peróxido de hidrógeno y 150 ppm de metabisulfito de sodio, con reacción de segundo orden y una constante de velocidad igual a $k = 0,0347$ obteniendo un porcentaje de reducción de cianuro libre de 99.84% y valor final de cianuro libre de 0.020 ppm cumpliendo los estándares de la normativa del ECA 4 del DS 002-2008 MINAM. Se evaluaron los resultados utilizando el método factorial observando que la interacción de peróxido de hidrógeno y metabisulfito de sodio tiene influencia en la reducción de cianuro.

2.2. Bases teóricas - científicas

Para lograrlo, se lleva a cabo una identificación conceptual de terapias convencionales (químicas) y terapias biológicas (biorremediación) que utilizan microorganismos capaces de degradar el cianuro y que son resistentes a condiciones extremas de pH y contaminación por metales pesados.

El ácido de Caro, que también se denomina ácido peroximonosulfúrico o ácido persulfúrico, es un poderoso agente oxidante que ha tenido una aplicación notable en la industria, especialmente en el tratamiento de efluentes. Su denominación proviene de Heinrich Caro, quien lo sintetizó por primera vez en 1898.

2.2.1. Normatividad vigente del control ambiental

- Ley N° 29338 Ley de Recursos Hídricos.
- Ley N° 28611 Ley General del Ambiente.
- Decreto Supremo N° 010-2010 MINAN, aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de Efluentes Líquidos en Actividades Minero – Metalúrgicas.
- Resolución Ministerial NC 011-96/EM/VMM, aprueban los niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos para Actividades Minero – Metalúrgicas.

- Decreto Supremo N° 001-2010-AG.- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338).
- Decreto Legislativo N° 1055; Modifica la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.
- Decreto Legislativo N° 1013; aprueba la ley de creación, organización y funciones del Ministerio del Ambiente.
- Decreto Supremo N° 002-2008 MINAN, aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.
- Resolución Ministerial N° 141-2011 MINAN; ratifica lineamientos para la aplicación de los Límites Máximos Permisibles.
- Decreto Supremo N° 040-2014 EM; Reglamento de Protección y Gestión Ambiental las actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero.

2.2.2. El medio ambiente derecho fundamental de la población

No debemos perder de vista que el medio ambiente, desde el enfoque constitucional, incluye aspectos relacionados con la gestión, uso, aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, el equilibrio de los ecosistemas, la protección de la diversidad biológica y cultural, así como el desarrollo integral de este mundo natural; dado que es parte del entorno vital del ser humano, se establece como un objetivo social cuyo cumplimiento se basa en la mejora de la calidad de vida de la población, y, por lo tanto, se considera un auténtico derecho fundamental para el ser humano.

Es evidente que el derecho a disfrutar de un entorno equilibrado es un derecho que se ha ido reconociendo progresivamente a la humanidad; está directamente relacionado con la calidad de vida, no solo de las generaciones actuales, sino también de las futuras.

En el Artículo 2, Inciso 22 de la Constitución Política del Perú se establece que el Medio Ambiente es reconocido como un derecho fundamental de la persona humana.

Se encuentra estipulado en el artículo 2°, inciso 22, de la Constitución Política del Perú de 1993, que menciona “Toda persona tiene derecho” “A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”.

El derecho a disfrutar de un entorno equilibrado y adecuado implica la capacidad de las personas para gozar de un medio ambiente en el que sus componentes se desarrollan e interrelacionan de manera natural y armónica; y en caso de que el ser humano intervenga, no debe representar una alteración significativa de la interrelación existente entre los elementos del medio ambiente.

Esto significa, por lo tanto, que se debe disfrutar no de cualquier entorno, sino únicamente del que es apropiado para el desarrollo de la persona y su dignidad.

2.2.3. Toxicidad de cianuro sodio

Inhalación: Este producto es perjudicial para las vías respiratorias, afecta la respiración celular y puede causar alteraciones en la sangre, el sistema nervioso central y la tiroides. Además, puede inducir cefaleas, debilidad, mareos, náuseas y vómitos, así como dificultad para respirar, que puede ir acompañada de un pulso débil e irregular, pérdida de conciencia, convulsiones, coma y, en última instancia, la muerte.

Ingestión: Extremadamente tóxico y corrosivo para el tracto gastrointestinal, provoca ardor en la boca y el esófago, además de dolor abdominal. Las dosis más elevadas pueden llevar a una pérdida repentina de la conciencia, paro respiratorio y muerte, mientras que las dosis menores, aunque también letales, pueden prolongar los síntomas de una a varias horas.

Contacto con la piel: Corrosivo, puede causar un dolor intenso y quemaduras en la piel. Las soluciones son corrosivas tanto para la piel como para los ojos, y pueden provocar úlceras profundas que requieren tiempo para sanar. Puede ser absorbido a través de la piel, mostrando síntomas parecidos a los que se observan en la inhalación.

Contacto ocular: Puede resultar corrosivo, y los síntomas pueden incluir enrojecimiento, dolor, visión borrosa y daño permanente en los ojos.

2.2.4. Efluentes líquidos según D.S.010-2010- MINAM

Es cualquier flujo natural o estacional de sustancia líquida que se descarga en los cuerpos receptores y que proviene de:

- Cualquier planta dedicada al procesamiento de minerales, abarcando los procesos de trituración, molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, amalgamación, reducción, lixiviación y extracción por solventes.
- Cualquier sistema destinado al tratamiento de aguas residuales vinculado a actividades mineras o similares, abarcando plantas de tratamiento de efluentes mineros, efluentes industriales y efluentes domésticos.
- Cualquier tipo de depósito de residuos mineros, que comprende depósitos de relaves, desmontes, escorias y otros.

2.2.5. Límites máximos permisible para la descarga de efluentes líquidos para las actividades minero-metalúrgicas.

Con la Resolución Ministerial N° 041-2014- MINAM, se estableció los límites máximos permisibles de los efluentes líquidos provenientes de actividades minero-metalúrgicas.

Es esencial que las empresas del sector minero-metalúrgico lleven a cabo monitoreos continuos de sus efluentes para garantizar el cumplimiento de estos límites. No cumplir con estas regulaciones puede resultar en sanciones impuestas por

el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y ocasionar efectos negativos considerables en el medio ambiente y en la salud de las comunidades adyacentes.

La contaminación se define como la alteración de la calidad del agua provocada por la intervención humana mediante actividades minero-metalúrgicas, lo que representa un riesgo para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la fauna silvestre.

El Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Agua es de cumplimiento obligatorio para todas las entidades, tanto públicas como privadas, que operan en el territorio nacional y que realizan actividades vinculadas al recurso hídrico.

El Ministerio de Energía y Minas desempeña el papel de organismo central y regulador en el ámbito de la energía y las minas; su función abarca el control de los Niveles Máximos permitidos de los efluentes líquidos contaminantes, así como la supervisión para garantizar que estos se mantengan dentro de límites que no representen un riesgo, ya sea de manera directa o indirecta, para los seres vivos. Este propósito busca regular los vertimientos generados por sus actividades y contribuir a la protección del medio ambiente y al desarrollo sostenible de las actividades minero-energéticas. Ver tabla 1.

Tabla 1 Límites máximos permisibles para Efluentes Minero-Metalúrgicos en el Perú

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 – 9	6 – 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/l	50	25
Aceites y Grasas	mg/l	20	16
Cianuro Total	mg/l	1	0,8
Arsénico Total	mg/l	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/l	0,05	0,04
Cromo hexavalente (*)	mg/l	0,1	0,08
Cobre Total	mg/l	0,5	0,4
Hierro (disuelto)	mg/l	2	1,6
Plomo Total	mg/l	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/l	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/l	1,5	1,2

FUENTE: Resolución Ministerial N° 041 – 2014 – MINAM

2.2.6. Significado de cianuro.

El término "cianuro" se emplea para designar un conjunto de familias de compuestos químicos inorgánicos que están compuestos por un átomo de carbono en el estado de oxidación +2 y un átomo de nitrógeno en el estado de oxidación 3, unidos a través de un enlace triple con carga negativa. Los compuestos de cianuro pueden ser productos químicos tanto artificiales como naturales, y se pueden encontrar en más de 2000 fuentes, incluyendo diversas especies de insectos, bacterias, algas, hongos y plantas.

El cianuro se presenta en diversas formas; en ocasiones, actúa como una sustancia gaseosa sin un olor distintivo, como es el caso del cianuro de hidrógeno (HCN) o del cloruro de cianógeno (ClCN). Sin embargo, también puede encontrarse en estado sólido o cristalino, como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN), que generalmente poseen un olor característico; como el de “almendras amargas”, aunque el principal peligro es que, no puede ser percibido por nuestro olfato, debido a ello causa lesiones muy graves o la muerte de los seres vivos, la industria militar lo conoce como N o como CK, la primera es para el cianuro de hidrógeno y la segunda para el cloruro de cianógeno (Chingo Saavedra, 2020, p. 12).

2.2.7. Compuestos derivados del cianuro.

Tiocianato: Se producen cuando los aniones cianuro interactúan con compuestos que contienen azufre, como los presentes en los residuos mineros. El resultado es la formación del ion tiocianato (SCN^-), un proceso que ocurre durante la extracción de oro y otros metales.

Cianato: La oxidación del cianuro a través de agentes como el ozono, el peróxido de hidrógeno o el cloro produce iones cianato en una fase inicial de transformación química.

2.2.8. Estado natural del cianuro

Una fuente natural de cianuro de hidrógeno es un compuesto similar al azúcar denominada amigdalina, que existe en muchas frutas, verduras, semillas y nueces, cerezas, maíz, judías, lentejas, nectarinas, duraznos, maníes, pecanas, pistachos, papas y soja; en el corazón de la almendra amarga hay aproximadamente 1 mg de HCN en forma de amigdalina, la misma que tiene un uso farmacéutico (Fárez et al., 2011, p. 72).

En la naturaleza, se encuentran en concentraciones bajas, como ocurre con muchos insectos y plantas, que incluyen una extensa variedad de especies vegetales. El cianuro se halla en la naturaleza en determinadas plantas y frutos, como almendras, albaricoques, bambúes, frijoles germinados, cerezas, aceitunas, papas, sorgo, soya y nueces, las cuales obtienen beneficios de este compuesto, ya que les ofrece protección contra los depredadores del ecosistema. Ver tabla 2.

Tabla 2 *Concentraciones de cianuro en algunas plantas*

Especie de plantas	Concentración (mg/kg)
Hojas	377 - 500
Raíces	138
Raíces desechadas	46 - 100
Almendra	280 - 2500
Porto blanco	2100

FUENTE: Elaboración propia

Este compuesto también se halla en el humo del cigarrillo, en la combustión de automóviles, y se libera a través de sus emisiones. A nivel industrial, está presente en procesos que requieren altas temperaturas y presiones, donde se combinan gas natural y amoníaco para producir cianuro de hidrógeno (HCN) en forma gaseosa, que luego se mezcla con hidróxido de sodio (NaOH) para generar cianuro de sodio (NaCN).

2.2.9. Empleos del cianuro

El cianuro se utiliza frecuentemente en varias industrias, incluyendo el tratamiento de textiles, la producción de papel, la fabricación de plásticos, así como en los procesos de revelado fotográfico.

Sus sales son ampliamente utilizadas en la industria metalúrgica, particularmente en la galvanización, la limpieza de materiales y la extracción de oro.

Asimismo, el gas cianuro se emplea para erradicar plagas e insectos, tanto en el sector agrícola como en edificios y embarcaciones. (Chingo Saavedra, 2020).

2.2.10. Toxicidad del cianuro de sodio

El cianuro de sodio es un reactivo químico que se utiliza de manera extensa en la minería para extraer oro y plata de los minerales. Su eficacia se debe a su habilidad para formar complejos estables con estos metales, lo que facilita su disolución en una solución acuosa. No obstante, esta misma reactividad es la que otorga al cianuro su notable toxicidad.

En resumen, aunque el cianuro de sodio es un reactivo fundamental en la extracción de oro y plata, su toxicidad intrínseca requiere un enfoque sumamente riguroso en su manejo.

Como ingenieros metalurgistas, tenemos la responsabilidad de garantizar que los procesos de lixiviación sean seguros para el personal, eficaces en la recuperación de metales y sostenibles desde el punto de vista ambiental, implementando las mejores prácticas y tecnologías disponibles para reducir los riesgos asociados al cianuro.

Los signos de la intoxicación aguda por cianuro se presentan de manera rápida y son de gran gravedad, tales como: Mareos, dolor de cabeza, náuseas, vómitos, irritación de garganta y ojos, debilidad y otros tales como la espiración rápida y profunda (hiperpnea) seguida de convulsiones, pérdida del conocimiento, arritmias cardíacas, hipotensión, coloración rosada de la piel.

2.2.11. Métodos de degradación o detoxificación de cianuro

El ácido cianhídrico conocido también como cianuro de hidrógeno, es altamente oxidable a sustancias que se conocen como, cianógeno o ácido ciánico (cianato). Este cianógeno tiene un comportamiento similar a un gas soluble en el agua cuya presión de vapor es de 5 atm a temperaturas de 20°C. En solución es altamente reactivo, debido a ello, no cambiará en el ambiente por un buen período de tiempo; según datos de laboratorio, el cianato como ión, es moderadamente estable en agua siempre en cuando se encuentre en valores de pH de 6,8 a 7,2 y de 4,2 a 5,5 aproximadamente a 10 días de duración del experimento y a una temperatura ambiente, siempre en cuando se encuentre en condiciones aeróbicas (Chingo Saavedra, 2020)

La toxicidad del cianuro en aguas residuales busca identificar los riesgos asociados con la presencia de este químico en dichas aguas, así como los tratamientos potenciales para su eliminación o degradación. Se deben considerar las diversas

teorías existentes para este fin, teniendo en cuenta que los relaves, como subproductos de los diferentes procesos de fabricación o industrialización, pueden ser utilizados por el ser humano en diversas aplicaciones, como el riego de cultivos o incluso para el consumo humano, debido a la falta de conocimiento al respecto.

Entre los hallazgos obtenidos, se puede afirmar que existen múltiples tratamientos para la degradación de esta sustancia química. Para ello, es fundamental considerar su concentración y los límites máximos permisibles, de manera que no se perjudique a los seres vivos ni al medio ambiente.

Se encuentran diversos métodos para la degradación o eliminación del cianuro, los cuales son empleados en el tratamiento de las soluciones residuales tras la lixiviación de oro. A continuación, se presentan los métodos más destacados, organizados en grupos junto con sus características más relevantes, las comparaciones, ver tabla 3.

Tabla 3 *Resumen comparativo de los métodos de tratamiento de los cianuros*

Método	Costo	Eficiencia	Aplicación típica
INCO:SO ₂ /O ₂	Medio	Alta	Minería a gran escala
Ácido de caro	Medio	Muy alta	Proyectos modernos
Biológico	Bajo	Media	Sitios remotos o ecológicos
Hipoclorito	Bajo	Media	Soluciones diluidas
Ozono	Alto	Alta	Laboratorio o tratamiento fino

FUENTE: Elaboración propia

Principales recomendaciones de uso de los diferentes métodos de degradación del cianuro, ver tabla 4

Tabla 4 *Recomendaciones de uso*

Escenario	Método sugerido
Plantas industriales grandes	INCO o Ácido de Caro
Minería artesanal o mediana	Hipoclorito o H ₂ O ₂
Zonas ecológicas sensibles	Biorremediación o lagunas
Residuos sólidos peligrosos	Incineración térmica

FUENTE: Elaboración propia

2.2.12. Ácido de Caro

El ácido Caro es un compuesto químico conocido como peróxido de ácido sulfúrico H_2SO_5 , en honor a su inventor Heinrich Caro (1834 – 1910) quien lo preparó por primera vez en 1898; el ácido Caro se caracteriza por ser un agente degradador de cianuro que es muy empleado para el tratamiento de efluentes provenientes de los procesos de cianuración en la minería del oro y de la plata (Arroyo Maury & Hidalgo Zacarias, 2019, p. 42)

El uso del denominado "ácido de Caro" ha surgido como una alternativa a los métodos tradicionales de oxidación del cianuro, ganando relevancia industrial a finales de los años 90; en la actualidad, se emplea en diversas plantas de tratamiento, principalmente en los Estados Unidos.

Este ácido es una solución de peroxo-monosulfúrico (H_2SO_5), que se genera al mezclar ácido sulfúrico altamente concentrado (mínimo 95 %) con peróxido de hidrógeno (50-60 %).

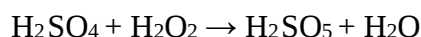
Su producción se lleva a cabo en el lugar mediante generadores específicos, conforme a las directrices de la patente Solvay/Peróxidos. Para llevar a cabo la oxidación del compuesto cianurado, es necesario añadir los reactivos de manera rápida en los reactores.

Dado que la reacción de este ácido con el cianuro es altamente exotérmica, la temperatura de la solución resultante puede alcanzar entre 110 y 120 °C; a pesar de su naturaleza ácida, es fundamental la presencia de una sustancia alcalina como la soda cáustica (NaOH) o el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ para mantener el pH dentro del rango óptimo de 9 a 9,5.

2.2.13. Preparación del ácido de caro

Se produce al combinar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), en una reacción exotérmica que da lugar al ácido de Caro en solución. Es fundamental controlar esta síntesis con precisión debido a la inestabilidad del producto.

El ácido de Caro se obtiene fundamentalmente haciendo reaccionar el ácido sulfúrico (H_2SO_4) con el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) concentrados. La ecuación química de la reacción es la siguiente:



Esta reacción es prácticamente instantánea y extremadamente exotérmica, lo que implica que libera una considerable cantidad de calor.

Debido a su inestabilidad y su naturaleza altamente reactiva, el ácido de Caro se genera generalmente "in situ" (en el mismo lugar de uso) en generadores específicos. Esto minimiza los riesgos relacionados con su almacenamiento y transporte. Al combinar los reactivos a temperatura ambiente, la solución de ácido de Caro puede alcanzar temperaturas de 110-120 °C.

Asimismo, es posible obtener una forma más pura de ácido de Caro al hacer reaccionar peróxido de hidrógeno altamente concentrado con ácido clorosulfúrico, la ecuación química es la siguiente:



2.2.14. Propiedades Fisicoquímicas del Ácido de Caro

Si el ácido de caro es puro es sólido e incoloro, con un punto de fusión de 5 °C, pero generalmente se usan en aplicaciones de la vida real como soluciones acuosas claras e incoloras, otras propiedades son:

- Densidad: Aproximadamente 1,7 g/ml a 25 °C para el sólido.

- Punto de fusión: 45 °C
- Olor muy penetrante o fuerte.
- Solubilidad en agua es infinito.
- Estabilidad: Es muy inestable y se descompone con el tiempo, incluso en solución acuosa, liberando oxígeno: $\text{H}_2\text{SO}_5 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$. Esta inestabilidad es la principal razón por la que se produce en el lugar.
- Poder oxidante: Es un agente oxidante muy fuerte, lo que lo hace útil en muchas industrias. Su capacidad para oxidar compuestos se debe a la presencia del enlace peroxo (-O-O-) en su estructura.
- Acidez: Es un ácido muy fuerte 0,8 y su acidez ayuda a descomponer ciertas sustancias al bajar el pH.
- Es un compuesto muy inestable y altamente reactivo debido a su naturaleza peróxida.

En resumen, las propiedades fisicoquímicas del Ácido de Caro, se puede apreciar en la tabla 5.

Tabla 5 *Propiedades físicas del ácido de Caro*

Acido de Caro	Propiedades Físicas
Punto de Fusión	.- 30,1 ° C
Punto de Congelamiento	. - 22,1 ° F
Punto de Ebullición	< 281 ° C (537 ° F)
Estado Físico	Claro, Incoloro, Aceitoso
Olor	Fuerte
Solubilidad en agua	100%
pH	< 1
Densidad	1,7 g/ml a 25 ° C

FUENTE: Elaboración propia

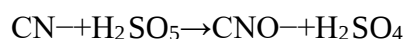
2.2.15. Detoxificación de efluentes líquidos contaminados con cianuro

El ácido de Caro es un fuerte agente oxidante que se usa principalmente para eliminar cianuro libre en aguas residuales de minería. Su acción oxidante transforma el cianuro (CN^-) que es muy tóxico y en cianato (OCN^-) que es mucho menos tóxico y puede descomponerse en dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3), que son compuestos seguros para el medio ambiente.

Este proceso es rápido, efectivo y permite bajar las concentraciones de cianuro a niveles que cumplen con las regulaciones ambientales. Además, su uso es relativamente fácil y económico, lo que lo hace adecuado para el tratamiento de residuos y aguas residuales en la minería de oro.

El ácido de Caro es ampliamente reconocido y utilizado en el tratamiento de efluentes, especialmente aquellos contaminados con cianuros provenientes de la minería de oro y plata.

La principal aplicación en este campo es la detoxificación de soluciones cianuradas. El cianuro (CN^-) es altamente tóxico, y su descarga en el medio ambiente representa un grave riesgo. El ácido de Caro oxida rápidamente el cianuro libre (CN^-) a cianato (CNO^-), que es significativamente menos tóxico y más fácilmente degradable:

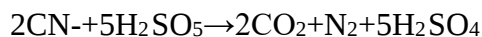


Esta reacción es altamente eficiente y veloz, alcanzando una disminución de cianuro libre superior al 90% en períodos muy breves (incluso en minutos en ciertos casos, a diferencia de otras opciones que pueden requerir horas).

Por lo tanto, el procesamiento es ágil, eficaz y facilita la disminución de las concentraciones de cianuro a niveles que satisfacen las regulaciones ambientales. Asimismo, su ejecución es bastante simple y de bajo costo, lo que lo convierte en

una opción apropiada para el tratamiento de relaves y efluentes en la minería de oro.

Ecuación de la reacción química simplificada (oxidación del cianuro por ácido de Caro):



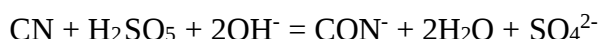
Explicación de la ecuación de reacción química:

- **CN⁻ (Cianuro libre):** compuesto tóxico proveniente de la lixiviación.
- **H₂SO₅ (Ácido de Caro):** actúa como agente oxidante.
- **CO₂ y N₂:** productos gaseosos inofensivos que se liberan.
- **H₂SO₄ (Ácido sulfúrico):** subproducto no volátil del proceso.

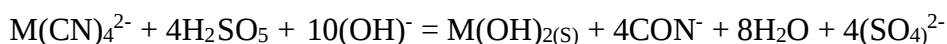
2.2.16. Reacciones de oxidación del cianuro

La oxidación del cianuro mediante ácido caro constituye una opción específica cuando las concentraciones de cianuros son muy bajas; dado que la tasa de oxidación del ácido caro es notablemente más rápida que la del peróxido de hidrógeno, este proceso se presenta como una alternativa prometedora para el tratamiento de los cianuros generados durante la extracción de oro y plata, antes de su disposición en la laguna de descarga, son:

a. Reacción con el cianuro libre:



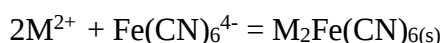
b. Reacción química con el Cianuro Wad:



c. Hidrólisis del cianato:



d. Precipitación del hierro cianurado

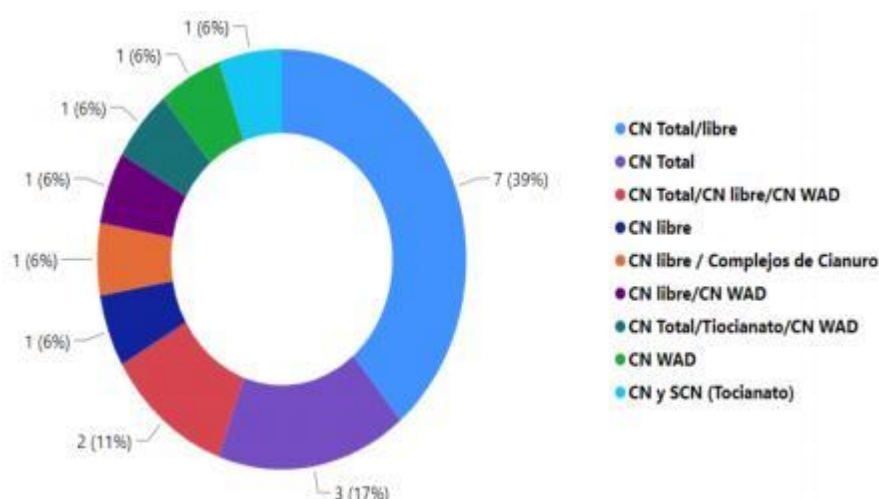


2.2.17. Tipos de cianuro que son tratados durante la detoxificación.

Gaviria (2006) señala que, el cianuro total es denominado así a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa; el cianuro total incluye al cianuro libre $[\text{CN}^-; \text{HCN}]$; cianuros simples $[\text{NaCN}, \text{KCN}, \text{Ca}(\text{CN})_2, \text{HG}(\text{CN})_2]$, cianuros complejos, son conformados por complejos débiles $[\text{Zn}(\text{CN})_2^{-2}; \text{Cd}(\text{CN})_3^{-2}]$; moderadamente fuertes $[\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}; \text{Ni}(\text{CN})_4^{-2}]$ y fuertes $[\text{Fe}(\text{CN})_6^{-4}; \text{Co}(\text{CN})_6^{-4}]$; $\text{Au}(\text{CN})_2$ (Rojas Cuenca, Verónica G.; Cabrera Espinosa, 2024, p. 20)

En lo que respecta a los diferentes tipos de cianuros que son más frecuentemente tratados, mediante los diferentes los métodos como por eliminación, degradación o remoción del cianuro total y del cianuro libre, en particular. Ver figura 1.

Figura 1 Tipos de cianuros de efluentes mineros para su detoxificación



FUENTE: Saa Cardona & Guarnizo Ruiz, 2022 p. 49

2.2.18. Tratamiento con ácido de caro

La aplicación del denominado "ácido de Caro" surgió como una alternativa a los métodos tradicionales de oxidación del cianuro, ganando relevancia industrial a finales de la década de 1990; en la actualidad, se utiliza en diversas plantas de tratamiento, principalmente en los Estados Unidos.

El ácido de Caro (H_2SO_5) es uno de los oxidantes más efectivos para el tratamiento del cianuro libre en relaves mineros, siendo su acción oxidante es rápida y altamente eficiente, lo que lo convierte en una opción preferida para aplicaciones en sitios mineros donde el contenido de cianuro es elevado (Alonso, 2025, p. 7).

Con el Ácido de Caro se encontraron remociones de 98,79% para el CN total, 99,45% para el CN WAD y 99,9% para CN libre, en ambiente controlado de laboratorio, usando 1,75 ml (H_2SO_5)/L pulpa de mineral a tratar (Saa Cardona & Guarnizo Ruiz, 2022)

En consecuencia, el ácido de Caro (H_2SO_5) se considera uno de los oxidantes más eficaces para el tratamiento del cianuro libre en los relaves mineros. Su capacidad oxidante es rápida y extremadamente eficiente, lo que lo hace una opción preferida para su uso en sitios mineros con altos niveles de cianuro.

2.2.19. Otros usos del ácido de caro en la degradación

Además de la oxidación del cianuro, el ácido de Caro también posee la capacidad de:

➤ **Degradación de Tiocianatos (SCN^-):** Los tiocianatos se generan en soluciones cianuradas cuando el cianuro reacciona con azufre o con compuestos sulfurados que se encuentran en el mineral. Estos tiocianatos también son tóxicos y, en muchas ocasiones, resultan más complicados de degradar que el cianuro libre utilizando otros oxidantes. El ácido de Caro posee la capacidad de oxidar los tiocianatos, lo que contribuye a la limpieza total del efluente. La oxidación de tiocianatos mediante el ácido de Caro representa una ventaja significativa en comparación con otros métodos que no son tan eficaces para tratar este tipo de contaminante.

- **Precipitar metales disueltos:** Al reducir el pH de la solución y actuar como oxidante, facilita la precipitación de los metales pesados que frecuentemente acompañan a los efluentes cianurados, contribuyendo así a la depuración general del agua residual.
- **Oxidación de otros compuestos:** Su notable poder oxidante le permite descomponer otros compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los efluentes, aunque su aplicación principal y más investigada en este ámbito es la detoxificación de cianuros.

2.2.20. Características principales de degradación del H₂SO₅

Generación: Mezcla in situ de H₂O₂ y H₂SO₄

Reacción química principal: $2\text{CN}^- + 5\text{H}_2\text{SO}_5 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{SO}_4$

Condiciones de proceso: pH entre 8 y 10, buena agitación

Relación molar óptima: H₂O₂:H₂SO₄= 1:2

Proceso rápido en la remoción del cianuro 93%

Tiempo de remoción: 5 a 20 minutos

Ventajas: Alta eficiencia; destruye cianuro libre y parte de los complejos y produce subproductos inocuos (N₂ y CO₂).

Desventajas: Mayor costo operación y Manejo cuidadoso por su alta reactividad

2.2.21. Ventajas del ácido de caro en efluentes mineros.

Eficiencia de Reacción: La velocidad a la que oxida el cianuro y otros contaminantes representa una ventaja fundamental, lo que puede resultar en plantas de tratamiento más compactas y tiempos de retención reducidos.

Alta Potencia Oxidante: Su potente capacidad oxidante lo hace eficaz contra una amplia variedad de contaminantes.

Generación In Situ: Al generarse justo antes de su utilización, se evitan los inconvenientes de almacenamiento y transporte de un reactivo tan inestable.

Generación de Subproductos Menos Tóxicos: La transformación de cianuro a cianato es un paso esencial hacia una descarga más segura.

- Agente oxidante en procesos químicos industriales.
- Blanqueador en la industria textil y papelera.
- Limpieza y desinfección gracias a su elevada capacidad oxidante.
- En minería, además de eliminar cianuro, puede ser empleado para la oxidación de otras sustancias tóxicas que se encuentran en los efluentes.

2.3. Definición de términos básicos

La publicación del Manual de Términos en Investigación Científica y Tecnológica se utiliza en asignaturas de investigación tales como: Metodología de la Investigación en Ciencias Sociales, Seminario de Investigación I, Seminario de Investigación II, Investigación y Elaboración de Proyectos de Investigación, Metodología de Investigación Cuantitativa, Metodología de la Investigación Cualitativa y Seminario de Síntesis de la Investigación. Su objetivo es proporcionar tanto a los estudiantes universitarios como a los docentes o cualquier lector herramientas conceptuales valiosas en el proceso de investigación; se trata de un glosario fundamental de terminología de investigación que facilita una mejor comprensión, permitiendo al lector acceder al significado de términos de uso frecuente en el ámbito de la investigación y, de este modo, enriquecer su vocabulario; un manual dirigido a cualquier estudiante de nivel licenciatura en Derecho y Ciencias Sociales, Administración de Empresas, Administración y Desarrollo Rural, Psicología, Gastronomía, Enfermería, entre otros Programas Educativos.

Análisis de datos cualitativos: Se refiere al proceso mediante el cual los investigadores organizan y gestionan la información recopilada para establecer conexiones, interpretar, extraer significados y llegar a conclusiones.

Análisis de regresión múltiple: Permite observar las diferencias entre cada nivel y el nivel utilizado como referencia, posibilita comprobar si existen variaciones entre las pendientes de cada nivel y la pendiente del nivel utilizado como referencia, y ofrece información sobre todos los niveles del factor.

Análisis de varianza: Es un método que facilita la evaluación de la relevancia de las variaciones entre más de dos medias de muestras obtenidas de distintos grupos.

Coefficientes de regresión: Es un valor que simboliza la variación media en la variable dependiente en respuesta a un cambio equivalente en la variable independiente.

pH: Parámetro que indica el nivel de acidez o basicidad de un líquido y su mezcla; la escala que se puede medir varía de 0 a 14.

Cianuro: Anión monovalente representado como CN^- , que se forma a partir de la combinación de un átomo de carbono y otro de nitrógeno, los cuales están unidos por un triple enlace.

Cianato: Ion con carga negativa que se origina de la unión de enlaces covalentes entre tres átomos: oxígeno, carbono y nitrógeno, con la fórmula OCN^- .

Compuestos complejos de cianuro: Son compuestos que se disocian en agua, liberando un catión y un anión que incluye el ion cianuro.

Ion Cianuro: este término se refiere únicamente al anión libre CN^- en solución.

Relave minero: Conjunto de residuos que se generan como consecuencia de procesos mineros.

Pasivo Ambiental: Es un conflicto ambiental que un proyecto o actividad genera frente a terceros debido a su construcción.

HCN: Gas cianhídrico que se forma a partir de la reacción entre agua y cianuro de sodio

Cianuro Libre: Esta categoría incluye tanto el HCN molecular como el ion cianuro.

Cianuro Total: Se refiere a todos los compuestos de cianuro presentes en una solución acuosa.

Cianuro Disociable con Ácido Débil o cianuro WAD: Son los compuestos de cianuro que se disocian al entrar en contacto con un ácido débil (generalmente a pH 4,5).

Cianuro Disociable en Ácido Fuerte o cianuro SAD: Se trata de los compuestos de cianuro que son resistentes al ataque de un ácido débil, pero que se disocian en presencia de un ácido fuerte a bajo pH.

Oxidación natural: El oxígeno disuelto en una solución determinada oxida el ion cianuro a cianato, aunque este proceso es lento en ausencia de catalizadores.

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La optimización del proceso de degradación del cianuro de sodio mejora la Detoxificación en el Área de la Planta de Óxidos-Volcan-2024

2.4.2. Hipótesis específicas

- a. La dosificación de ácido de caro influye directamente la degradación del cianuro de sodio en el Área de Detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan-Pasco-2024

- b. El control del pH de la pulpa influye directamente en la degradación del cianuro de sodio en el Área de Detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan-Pasco-2024
- c. La densidad de la pulpa influye directamente en la degradación del cianuro de sodio en el Área de Detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan-Pasco-2024
- b. El tiempo de residencia del ácido de caro influye directamente en la degradación del cianuro de sodio en el Área de Detoxificación de la Planta de Óxidos-Volcan-Pasco-2024

2.5. Identificación de variables

Si el título del proyecto de investigación es: Optimización del Proceso de Degradación del Cianuro de Sodio para Mejorar la Detoxificación en el Área de la Planta de Óxidos-Volcan-2024

Variable independiente: Optimización del Proceso de Degradación del Cianuro de Sodio.

Variable dependiente: Detoxificación en el Área de la Planta de Óxidos-Volcan- 2024

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Cumplida la operacionalización fundamentalmente a la variable independiente del proyecto de investigación, se obtiene los siguientes los factores que inciden en los resultados de la investigación, ver tabla 6.

Tabla 6 Dimensiones de la variable independiente

	Definición operacional	Factores (Dimensiones)	Indicadores	Tipo de factores
Variable independiente: “Optimización del Proceso de Degradación del Cianuro de Sodio”	Como profesional ingeniero, mejorar el proceso de descomposición del cianuro de sodio en efluentes es un reto importante, particularmente en áreas como la industria minera.	Ácido de Caro	ml.	Continua
		pH de la solución	Unidades.	Continua
		Densidad de la pulpa	gr/lt	Continua
		Tiempo de residencia	min	Continua
Variable dependiente: “Mejorar la Detoxificación en el Área de la Planta de Óxidos-Volcan-2024”	Optimizar la eliminación de toxinas en la sección de una fábrica de óxidos	Grados de aceptación en el sistema de gestión de salud ocupacional	Los trabajadores cumplen con los indicadores de la gestión de salud ocupacional.	Continuas

FUENTE: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La investigación aplicada en ingeniería es una clase de estudio que se centra en la solución de problemas concretos y reales en un entorno específico. En contraposición a la investigación básica (que aspira a producir conocimiento puro sin una implementación instantánea), la investigación aplicada en ingeniería utiliza los saberes científicos y tecnológicos actuales para crear soluciones específicas, optimizar procesos, generar nuevos productos o servicios, y cubrir las demandas particulares de la sociedad o el sector.

En el presente trabajo de tesis, el tipo de investigación es aplicada experimental; debido que no solo identifica las características que se estudian, sino que las controla, las altera o manipula a los factores experimentales con el fin de observar los resultados procurando evitar que otros factores intervengan en las corridas experimentales.

Es un tipo de investigación que tiene como objetivo resolver problemas prácticos y específicos mediante el uso de conocimientos científicos y tecnológicos

existentes. La investigación aplicada presenta un propósito claro y una aplicación directa en el mundo real; aunque su objetivo es práctico, se fundamenta en principios científicos y teorías previamente establecidas. Un aspecto fundamental es la experimentación para validar la solución propuesta; esto conlleva la creación de modelos, simulaciones, pruebas de laboratorio o ensayos en entornos reales para demostrar la efectividad y viabilidad de la solución.

En resumen, como ingeniero, una tesis de investigación aplicada no se limita a ser un ejercicio académico, sino que representa un proyecto que evidencia tu capacidad para:

- Identificar y comprender problemas complejos del mundo real.
- Aplicar tus conocimientos técnicos y científicos para desarrollar soluciones prácticas.
- Diseñar, construir y validar sistemas o procesos.
- Generar resultados que tengan un impacto tangible y contribuyan a la mejora de la sociedad o la industria.

En consecuencia, el tipo de investigación en la presente tesis es la investigación aplicada, experimental y cuantitativa por la manipulación de datos numéricos.

3.2. Nivel de investigación

Nivel Descriptivo: Consiste en describir y caracterizar detalladamente el fenómeno o problema tal como existe, sin manipular las dimensiones, ni buscar relaciones causales; responde a las preguntas como "¿Qué es?", "¿Cómo es?", "¿Dónde está?", "¿Cuándo ocurre?"; con la finalidad de presentar el estado actual del cianuro contaminante después de la lixiviación para la recopilación y presentar los datos existentes que proporciona una base sólida de información para realizarla

investigación o “punto de partida” para la toma de decisiones, con la finalidad de implementar o desarrollar el proyecto o tesis.

Nivel Exploratorio correlacional: Es para establecer la relación existente entre dos o más factores experimentales para determinar causa-efecto. Por lo tanto, se busca identificar los factores, relaciones potenciales, ideas o hipótesis preliminares que permita el desarrollo de la investigación.

3.3. Métodos de investigación

La metodología de investigación en ingeniería es un instrumento metódico y organizado que los ingenieros emplean para resolver problemas complejos, crear nuevas soluciones, optimizar procesos actuales y producir saber útil en el área de la ingeniería. En contraste con la investigación científica puramente, que frecuentemente intenta entender fenómenos simplemente por comprenderlos, la investigación en ingeniería se centra en su aplicación práctica y en la generación de soluciones palpables.

Basada en un enfoque científico, donde **los factores experimentales** serán modificadas y **controladas** o medidas mediante pruebas a nivel de laboratorio.

El tamaño de muestra está constituido en función del equipo de experimentación y en las condiciones de la muestra de experimentación de laboratorio siendo este 1 litro de pulpa para cada prueba.

Los métodos de tratamiento de los efluentes contaminados con cianuro y complejos metálicos, ver tabla 7.

Tabla 7 Métodos de degradación del cianuro

Método	Ventajas	Desventajas	Remueve u oxida	
			CN ⁻	Complejos SAD
Cloración	Tecnología bien establecida	Produce compuestos clorados tóxicos	SI	NO
H ₂ O ₂	No produce residuos tóxicos; fácil de operar	Reactivo y operación costosa	SI	Algunos
SO ₂ /aire	Económico	Pago de regalías; genera residuos sólidos peligrosos	SI	SI
Ozonización	Rápido y eficiente; puede regenerarse el cianuro	Costoso	SI	NO
Carbón activado	Efectivo	Solo para bajas concentraciones	NO	Mayoría
Ácido de Caro	Aplicable en sitio	Operación complicada; aún no está bien establecida	SI	SI
Oxidación electrolítica	Aplicable para altas concentraciones	Aún no está bien establecida	NO	Algunos
Biodegradación	Económica, amigable ambientalmente	Muy lenta, aplicable a bajas concentraciones	SI	SI

FUENTE: Amaro Medina et al., 2020 p. 10

3.4. Diseño de investigación

En una tesis de ingeniería, el diseño factorial constituye una estrategia experimental esencial que facilita la investigación eficiente del impacto de dos o más variables de entrada (factores) sobre una variable dependiente (variable respuesta), así como las interacciones que pueden existir entre estos factores. A diferencia de los diseños unifactoriales, que analizan el efecto de un único factor a la vez, el diseño factorial examina todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores.

La presente investigación se basa en la búsqueda de mejoras y tratamientos para los efluentes de las plantas metalúrgicas que trabajan con cianuro de sodio como reactivo principal, para ello se evalúan todos los métodos de detoxificación de efluentes, obteniendo así el proceso ácido de caro por ser el más eficiente.

El diseño de investigación pertenece al enfoque cuantitativo; en el presente caso de investigación es el diseño cuantitativo, por consiguiente, se manipulará intencionalmente a los factores (causa) de la variable independiente para observar su efecto en una variable dependiente, controlando otros factores; . implica grupos de control y aleatorización.

Se aplicó el diseño de investigación experimental, mediante diseños factoriales de dos niveles para finalizar mediante el diseño central compuesto para la optimización del proceso:

- Diseño factorial fraccionado.
- Diseño factorial completo
- Diseño compuesto central

3.4.1. Ventajas de los diseños factoriales

Eficiencia: Facilita la obtención de la misma cantidad de información (o más) con un menor número de experimentos.

Identificación de Interacciones: Esta es la ventaja principal. Permite la selección de los factores se afectan mutuamente en la respuesta, lo cual es fundamental en numerosos procesos de ingeniería donde las dimensiones no operan de manera aislada.

Conclusiones más robustas: Las conclusiones son más válidas y generalizables. **Reducción de la varianza del error:** Al analizar varios factores simultáneamente, logrando "eliminar" del término de error, lo que mejora la precisión de las pruebas estadísticas y los resultados.

Optimización de procesos: Facilita la identificación de la combinación ideal de factores para maximizar (o minimizar) la variable de respuesta o dependiente.

Mediante los diseños experimentales en las condiciones ideales de operación se realiza la maximización, rendimiento, la eficiencia, la calidad o minimizar costos, consumo de energía, etc.; en presente en la degradación de cianuro, donde se buscaría la máxima remoción para evitar la contaminación ambiental.

En conclusión, el diseño factorial se presenta como una herramienta robusta en la investigación de ingeniería, ya que no se limita a analizar el impacto de una sola variable, sino que facilita una comprensión más integral de sistemas complejos al tener en cuenta la interacción entre diversos factores.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población en una investigación de ingeniería se define como el conjunto total de elementos, unidades, sistemas, procesos, materiales o fenómenos que comparten características comunes y que son objeto de estudio dentro del marco del problema planteado. Esta población constituye el universo al que se desea generalizar los resultados obtenidos, y su correcta delimitación es fundamental para garantizar la validez de los datos recolectados y la confiabilidad de las conclusiones.

En estudios de ingeniería, la población puede estar conformada por componentes físicos (como muestras de materiales, maquinarias, estructuras), datos operacionales (como registros de producción, temperaturas, tiempos de proceso), o incluso usuarios de un sistema técnico. Su identificación se basa en criterios técnicos, geográficos, temporales y funcionales, en concordancia con los objetivos de la investigación.

Por lo tanto, la población debe definirse de forma precisa, cuantificable y coherente con el enfoque metodológico del estudio, de manera que permita seleccionar una muestra representativa si así lo requiere el diseño experimental o estadístico.

En conclusión, la población en una tesis de ingeniería representa el conjunto de elementos o fenómenos sobre los que tu investigación pretende adquirir conocimiento y aplicar soluciones ingenieriles. Es crucial identificarla y definirla adecuadamente para asegurar el rigor y el alcance de tu estudio.

En el presente, la población de estudio está constituida por el volumen total de los efluentes líquidos (relaves) generados como producto del proceso de cianuración para la recuperación de plata y oro en la Planta de Óxidos de la Empresa Administradora Cerro, perteneciente a Volcan Compañía Minera S.A.A.. Esta población comprende específicamente aquellas soluciones residuales que presentan altas concentraciones de cianuro total, registrando promedios entre 550 ppm y 567,20 ppm, valores que exceden ampliamente los límites máximos permisibles señalados por el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.

3.5.2. Muestreo

En una tesis de ingeniería, el muestreo se define como el procedimiento de elegir un subconjunto (muestra) de la población total que se desea estudiar. Este subconjunto debe ser suficientemente representativo para que los resultados derivados de su análisis puedan ser aplicados a toda la población con un nivel de confianza adecuado.

Los objetivos del muestreo son: medir las concentraciones del cianuro libre; WAD y total; evaluar a los metales disueltos, controlar las dimensiones tales como el pH, ORP, conductividad y otros; con la finalidad de diseñar la degradación de los contaminantes muy peligrosos para los seres vivos.

Para realizar los muestreos se usa: equipos de protección personal; instrumentos de muestreo, baldes plásticos; botellas; jeringas; reactivo de preservación, NaOH y otros según NORMA ASTM; NTP, etc. Teniendo como punto de muestreo a la salida de pila de lixiviación. En numerosas ocasiones, la población objeto de estudio en

ingeniería es excesivamente grande, inaccesible o costosa para ser investigada en su totalidad, el muestreo a partir de la población en estudios, permite:

Reducir costos: Investigar una muestra es considerablemente más económico que estudiar a toda la población.

Ahorrar tiempo: La recolección y análisis de datos de una muestra es más ágil. Aumentar la viabilidad: Permite realizar investigaciones que de otro modo serían imposibles.

Obtener resultados confiables: Si el muestreo se lleva a cabo correctamente, los resultados pueden ser representativos y generalizables.

¿Cómo realizar el muestreo?: Se sigue el procedimiento siguiente:

- **Muestreo Representativo:** Es fundamental realizar la toma de muestras representativas del agua cianurada antes, durante (si corresponde) y después del proceso de degradación. Esto requiere seguir protocolos de muestreo estandarizados para garantizar que las muestras reflejen la composición real del efluente.
- **Puntos de Muestreo:** Es necesario definir los puntos de muestreo estratégicos, por ejemplo:
- **Entrada del sistema:** Para determinar la concentración inicial de cianuro y otros parámetros.
- **Puntos intermedios:** En procesos por etapas (como la oxidación y la biodegradación) para evaluar el avance de la degradación.
- **Salida del sistema:** Con la finalidad de verificar la concentración final de cianuro y otros contaminantes, y comparar con los límites permisibles.

3.5.3. Muestra

La selección de la muestra, en caso de que la población sea considerablemente grande, es probable que se debe trabajar con una muestra o muestras (subconjunto representativo de la población). Definir claramente la población es el primer paso para elegir una muestra o varias apropiadas.

En el presente caso, se aplicó el muestreo probabilístico, para que todos los elementos de la población tienen una probabilidad conocida y no nula de ser seleccionados. Esto es fundamental para poder inferenciar los resultados estadísticamente, aplicando el **muestreo aleatorio simple (MAS)**, **significa que** cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado.

Se utiliza una lista numerada de la población y se eligen los elementos al azar, de toda la población se realizó muestreos por una semana en diferentes horarios, siendo un total de 10 muestras para realizar las pruebas o ensayos experimentales en el laboratorio.

La muestra representativa para la investigación estuvo conformada por las fracciones específicas de efluentes líquidos cianurados destinados a la ejecución de los ensayos preliminares de diagnóstico y a las corridas experimentales formales de optimización (Diseño Factorial Fraccionado y Diseño de Composición Central). A nivel de laboratorio, la unidad de prueba constó de recipientes con un volumen exacto de 2 litros de solución por cada ensayo. La caracterización inicial de esta muestra base presentó un pH de 10,5, una temperatura de 10 °C y una concentración de cianuro libre de 238,3 ppm antes de iniciar el tratamiento.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En un laboratorio de ingeniería, la recopilación de datos constituye el eje central de cualquier experimento, estudio o creación de producto. El análisis, la

toma de decisiones y la confirmación de hipótesis requieren de la exactitud y confiabilidad de estos datos. Las técnicas y herramientas utilizadas fluctúan considerablemente en función del campo particular de la ingeniería (civil, mecánica, eléctrica, química, etc.) y del tipo de experimento.

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

En el proceso de degradación de aguas cianuradas, la recopilación de datos es esencial para supervisar la efectividad del tratamiento y garantizar el cumplimiento de las regulaciones o normas ambientales. Las técnicas de recopilación de datos generalmente integran métodos de campo y de laboratorio.

Para el proceso de degradación de aguas cianuradas, la recopilación de datos es esencial para supervisar la efectividad del tratamiento y garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. Las técnicas de recopilación de datos generalmente combinan métodos de campo y de laboratorio.

En vista que la investigación es experimental la recolección de datos se realizó mediante la observación directa y que se serán cuantificados mediante el uso de equipos, materiales y reactivos pertinentes en cada actividad realizada.

La recopilación de datos para el proceso de degradación de aguas cianuradas requiere un enfoque integral que une un muestreo riguroso, análisis de laboratorio avanzados, monitoreo de campo de parámetros operativos y revisión documental, todo con el fin de evaluar la efectividad del tratamiento y garantizar la protección ambiental.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

En el proceso de degradación de aguas cianuradas, los dispositivos de recolección de datos pueden ser clasificados en diferentes categorías, según su uso en

el campo o en el laboratorio, así como el parámetro que están midiendo; en el presente caso se usaron:

Recipientes de Muestreo: Frascos, botellas o viales fabricados con materiales apropiados (normalmente polietileno o vidrio) que no reaccionen con el cianuro ni contaminen la muestra; deben estar limpios y en muchos casos, pre-acidificados o contener preservantes.

Muestreadores automáticos (Autosamplers): Facilitan la recolección de muestras a intervalos programados.

Equipos de Preservación de Muestras: Refrigeradores portátiles o neveras con hielo para mantener las muestras a la temperatura adecuada (generalmente 4°C) con la finalidad de prevenir la degradación del cianuro antes de su utilización.

Potenciómetros portátiles: Para mediciones rápidas y en el sitio del pH de la pulpa de la solución de cianuros.

Multiparámetro: Evalúan la habilidad del agua para transportar una corriente eléctrica, lo cual está vinculado a la concentración de iones disueltos.

Agitadores mecánicos: Equipos que sirven para la preparación del ácido de Caro y la agitación constante por cierto tiempo durante los ensayos experimentales para la degradación del cianuro.

Otros instrumentos: Balanza analítica; materiales de vidrio; etc.

La selección de los instrumentos específicos estará determinada por la magnitud del proceso de degradación, las necesidades de monitoreo, los límites de detección requeridos, el presupuesto disponible y las regulaciones pertinentes. Es esencial todos los instrumentos deben sean calibrados o certificados y con mantenimiento adecuado para asegurar la fiabilidad y validez de los instrumentos para la obtención de datos primarios confiables.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

3.7.1. Selección de los instrumentos de investigación

La selección de los instrumentos para la degradación del cianuro es un procedimiento esencial que asegura la validez, la fiabilidad y la eficacia de los datos obtenidos. Este procedimiento considera varios factores relacionados con la naturaleza del cianuro, los objetivos de la investigación, el tipo de proceso de degradación y las capacidades del laboratorio o del campo.

La selección de los instrumentos de investigación, se realiza en función a los factores experimentales que deben ser usados durante el proceso de investigación. Ejemplo: si se tiene que medir oxígeno disuelto en el agua, se usará el multiparámetro.

3.7.2. Validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

La validación de los instrumentos de investigación en el enfoque cuantitativo constituye un proceso analítico esencial para garantizar que los datos fisicoquímicos obtenidos sean precisos, confiables y que efectivamente midan las concentraciones operativas que se desea evaluar en el efluente. Este proceso técnico en el laboratorio se fundamenta en dos conceptos clave aplicados al equipamiento: validez y confiabilidad.

Validez: Se relaciona con el nivel en que un instrumento de medición realmente evalúa la variable física o química que se pretende medir. En el enfoque cuantitativo de esta investigación, la validez se garantizó mediante la calibración de los equipos con patrones estandarizados, tales como el uso de soluciones tampón (buffers) para los potenciómetros y la aplicación estricta de normativas internacionales (como el método APHA 4500-CN) para los equipos de titulación, asegurando que las lecturas reflejen la degradación exacta de las especies de cianuro inducida por el ácido de Caro.

Confiabilidad (o Fiabilidad): Se refiere a la consistencia, repetibilidad y estabilidad de las mediciones del instrumental analítico. Un equipo de laboratorio es

confiable si, al aplicarlo repetidamente sobre las fracciones de la muestra de relave bajo las mismas condiciones de experimentación (como la preservación en cadena de frío a 4 °C y la agitación constante), produce resultados estadísticamente similares con márgenes de error mínimos, descartando fluctuaciones o "ruidos" propios del instrumento.

Es importante recordar que la validación analítica no es un evento único, sino un proceso operativo continuo que requiere varias etapas de control, verificaciones de calibración y ajustes durante todo el diseño experimental. Contar con instrumental validado y confiable es fundamental para garantizar la calidad técnica, la repetibilidad de los ensayos y la credibilidad del modelo estadístico de la investigación cuantitativa.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.8.1. Técnicas de procesamiento de datos

En una tesis cuantitativa destinada a evaluar la degradación del cianuro, la "técnica de procesamiento de datos" hace referencia al conjunto de procedimientos y métodos estadísticos empleados para organizar, analizar e interpretar la información numérica recopilada. El objetivo primordial es determinar la efectividad de un método de degradación del cianuro y establecer las relaciones entre las variables analizadas.

En conclusión, en ingeniería, el análisis de datos cuantitativos representa una etapa fundamental en la que la lógica, el entendimiento del proceso y las herramientas estadísticas se integran para convertir datos en bruto en información valiosa y aplicable para la solución de problemas de ingeniería. Este es un proceso cíclico, donde cada fase contribuye y mejora el proceso.

El procesamiento de los datos cuantitativos o continuos se realizan mediante los Software Estadísticos: Minitab, STATGRAPHICS, SPSS, especializados en DOE

y RSM; estos programas son muy amigables para el ingeniero que no busca programar muy complejos.

3.8.2. Técnicas de análisis de datos

La técnica de análisis de datos en una tesis cuantitativa es el componente medular que transforma los datos brutos recolectados experimentalmente en conocimiento significativo y conclusiones válidas. No es simplemente aplicar una fórmula, sino un proceso estratégico y riguroso que busca validar o refutar hipótesis, identificar patrones, determinar relaciones causa-efecto y cuantificar la magnitud de los fenómenos estudiados. Su propósito final es responder a las preguntas de investigación planteadas al inicio del desarrollo de la tesis académico

3.9. Tratamiento estadístico

El análisis estadístico de los datos cuantitativos en la degradación del cianuro utilizando el ácido de Caro es esencial para valorar la eficacia del proceso, mejorar las condiciones de reacción y entender la cinética de degradación; a continuación, se describen las etapas y métodos estadísticos más relevantes que se suelen emplear:

- Diseño experimental, llamado diseño factorial.
- Recolección de datos cuantitativos
- Análisis descriptivo de los datos cuantitativos, haciendo uso de un paquete estadístico
- Análisis inferencial, mediante la ANOVA; análisis de regresión, etc.

En conclusión, el análisis estadístico de los datos cuantitativos en la degradación del cianuro utilizando ácido de Caro requiere un diseño experimental meticuloso, la recolección exacta de datos, el análisis descriptivo para identificar patrones y, sobre todo, la implementación de métodos inferenciales y cinéticos

(ANOVA, regresión, pruebas de hipótesis) para modelar, optimizar y validar la eficacia del proceso de degradación del reactivo utilizado.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Orientación Ética La investigación se rige por el principio de responsabilidad socioambiental y el compromiso moral de la ingeniería con la preservación de la vida. Desde el punto de vista ético, el estudio no busca únicamente la rentabilidad u optimización de un proceso industrial, sino la mitigación directa de un riesgo letal para los ecosistemas y la salud humana. La manipulación de los efluentes y la aplicación del ácido de Caro se realizan bajo un estricto rigor técnico para garantizar que las descargas finales de la Planta de Óxidos cumplan a cabalidad con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2010-MINAM. El investigador asume el deber ético de reportar los datos experimentales con total transparencia, sin alterar los resultados de los análisis químicos, velando por la integridad científica y la seguridad operacional.

Orientación Filosófica El estudio se enmarca dentro del pragmatismo tecnológico y una visión ecosistémica de la ingeniería. Filosóficamente, se concibe que la actividad metalúrgica no debe limitarse a la mera extracción y procesamiento de minerales para la generación de riqueza, sino que conlleva la responsabilidad ineludible de restaurar el equilibrio natural alterado. Bajo esta perspectiva, el ingeniero actúa como un agente transformador que utiliza la racionalidad científica para resolver problemas tangibles. La investigación asume que el progreso industrial y la sostenibilidad ambiental no son conceptos excluyentes, sino que pueden y deben coexistir armónicamente mediante la intervención tecnológica racional, transformando un pasivo ambiental altamente tóxico (el cianuro) en compuestos inocuos.

Orientación Epistemológica La presente investigación se fundamenta en el paradigma positivista y adopta un enfoque empírico-analítico. Epistemológicamente, se asume que el conocimiento válido y objetivo sobre el proceso de detoxificación se construye exclusivamente a partir de la observación sistemática, la experimentación rigurosa y la medición exacta de los fenómenos fisicoquímicos en el laboratorio. El conocimiento generado no proviene de la especulación, sino de la cuantificación de variables operativas (dosificación de reactivos, pH, tiempo y agitación) y su impacto en la variable dependiente (concentración de cianuro). La "verdad" científica de este estudio se legitima y se valida a través de la modelación matemática y el rigor estadístico (Diseño Factorial y Análisis de Varianza - ANOVA), lo que garantiza que los resultados obtenidos sean reproducibles, verificables y aplicables al escalamiento industria

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El método de ácido de caro ha sido implementado en diversas minas auríferas alrededor del mundo, incluyendo sitios en los Estados Unidos, Canadá y Australia, con resultados satisfactorios en términos de reducción de cianuro y cumplimiento normativo; sin embargo, es necesario diseñar ensayos experimentales específicos para cada operación minera, ya que las características de los relaves pueden variar considerablemente según la mineralogía y los procesos de extracción utilizados (Marsden & House, 2006 citado por Alonso, 2025, p. 9).

4.1.1. Preparación del Ácido de Caro

La preparación del reactivo se realiza para el uso inmediato, porque es un reactivo inestable.

Reactivos:

- a. Ácido sulfúrico, con una concentración de 98%
- b. Peróxido de oxígeno, con una concentración de 50%

Procedimiento: En un tanque de acero inoxidable mezclar con agitación controlada, primero se añade lentamente el ácido sulfúrico, manteniendo la solución en agitación constante; en seguida se agrega el H_2O_2 sobre el ácido sulfúrico, siempre controlar la temperatura mediante sistema de enfriamiento.

Ver Anexo 2 ilustración 1.

a. **Enfriamiento previo:** Enfriar H_2SO_4 y H_2O_2 a 5°C

b. **Mezcla controlada:**

- Agregar lentamente H_2O_2 sobre H_2SO_4
- Ratio molar, generalmente es 1:1 ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$)
- Después de haber completado la mezcla, dejar en reposo 15 a 30 minutos con agitación ligera.
- Agregar lentamente agua oxigenada sobre el ácido sulfúrico.
- Nunca tener materia orgánica cerca al espacio de preparación del ácido de Caro, porque el reactivo es un oxidante fuerte y puede reaccionar violentamente con la materia orgánica.
- Mantener $T < 10^\circ\text{C}$

c. **Tiempo de preparación:** 5 – 12 minutos

La solución preparada contiene algo ácido sulfúrico libre o residual; ácido de Caro y agua.

d. **Uso inmediato:** Como máximo 30 minutos después de la preparación; porque es inestable, no se almacena a largo tiempo.

Preparaciones Comunes de ácido de Caro

A continuación, se detallan las proporciones aproximadas de los reactivos necesarios para la preparación de soluciones de ácido de Caro a concentraciones habituales, utilizando peróxido de hidrógeno al 50% y ácido sulfúrico al 98%. Estas cantidades pueden ser modificadas de acuerdo con la pureza real y las condiciones operativas, ver tabla 8.

Tabla 8 *Tabla de dosificación de preparaciones comunes*

Volumen de ácido de Caro (L)	Ácido sulfúrico al 98% (L)	Peróxido de hidrógeno al 50% (L)	Agua destilada (L)
5	1,25	1,75	2
10	2,50	3,50	4

FUENTE: Elaboración propia

4.1.2. Propiedades físicas del Ácido de Caro

Después de la preparación del Ácido de Caro, se caracterizó, con la finalidad de describir sus características. Ver tabla 9

Tabla 9 *Propiedades físicas del Ácido de Caro recién preparado*

ÁCIDO DE CARO	PROPIEDADES
Aspecto físico	Aceitoso e incoloro
Densidad	1,8 g/ml a 10°C
Olor	Penetrante o muy fuerte
Solubilidad en agua	Muy soluble
pH	1,0
Punto de ebullición	260°C
Condición	Muy inestable

FUENTE: Elaboración propia

En conclusión, el diseño del proceso de detoxificación utilizando ácido de Caro se fundamenta en la producción instantánea de un oxidante potente que reacciona de manera rápida con el cianuro, convirtiéndolo en compuestos menos perjudiciales. Su principal beneficio reside en su eficacia y velocidad, además de la facilidad para aplicarlo directamente en la corriente del efluente. No obstante, su implementación

exige un control de seguridad riguroso debido a la naturaleza corrosiva y oxidante de los reactivos que se utilizan.

4.1.3. Descripción del proceso DETOX

El proceso de destrucción del cianuro (DETOX) en la Planta de Óxidos de la Empresa Administradora Cerro, perteneciente a Volcan Compañía Minera S.A.A. consiste en la reducción de las concentraciones de cianuro en los residuos líquidos generados durante el proceso de cianuración de minerales auríferos, con la finalidad de cumplir con los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente.

4.1.4. Ensayos preliminares de detoxificación

Las pruebas se llevaron a cabo en un recipiente con un volumen de 2 L para cada ensayo, el cual disponía de un anillo en la parte inferior con cortes para permitir la oxigenación de la solución a detoxificar, utilizando un agitador mecánico para garantizar la completa homogenización del reactivo incorporado, controlándose durante toda la prueba el pH; la dosificación del ácido de caro; tiempo de agitación y la velocidad de agitación, durante los ensayos de diagnóstico se tomaron situaciones extremas de los parámetros o factores considerados significativos del proceso, con la finalidad de determinar los valores operativos para posteriores ensayos experimentales, se utilizó el método de investigación cuasiexperimental.

En el ámbito de los procesos metalúrgicos, tales como la lixiviación, flotación, tostación o fusión, frecuentemente es necesario llevar a cabo los ensayos en condiciones de planta piloto, laboratorio o incluso a nivel industrial, donde no siempre se puede aleatorizar las condiciones de pruebas experimentales.

El diseño cuasiexperimental permite manipular a los factores de la variable independiente por separado o uno en uno, en el presente caso, por ejemplo:

- Manipular los niveles del ácido de Caro, por ejemplo: 3; 4; 5 ml/L; etc.
- Variar el tiempo de residencia, ejemplo: 20; 30; 40 min; etc,
- Variar el pH de la pulpa: ejemplo: 9; 10; 11 etc.

Interpretación de la tabla 10 y 11.

Habiendo realizado los ensayos experimentales en el laboratorio mediante el método de la investigación cuasiexperimental, ver tablas 10 y 11

Tabla 10 Resultados de degradación del cianuro, ciclo I

P1: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	1,5	18	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	6,8	9,45		12,45
P2: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	2	21	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	4,6	8,2		10,5
P3: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	2,5	22	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	4,2	6,8		9,25
P4: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	3	24	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	3,6	5,4		6,8
P5: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	3,5	26	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	3,2	4,8		6,2
P6: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	4	28	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	1,8	3,2		4,2
P7: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	4,5	32	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	0	0,1		0,15
P8: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	5	34	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	2,2	4,45		6,5
P9: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	5,5	35	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	2,6	5,2		8,2
P10: Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	6	37	80 lab	Inicial	222,6	349,8		542,56
				160 Ind	Final	2,4	4,8		7,2

FUENTE: Autoría propia

- P7: En la tabla 10, fue el mejor tratamiento, se llegó reducir el cianuro total desde 542,55 ppm en un 0,15 ppm.

Tabla 11 Resultados de destrucción del cianuro, ciclo 2

METODO DE TRATAMIENTO	CICLOS	H2SO5 ml/l	CaO 15% ml/l	Tiempo de Residencia	FASE	CN Libre ppm	CN Wad ppm	CN Total ppm
P11: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	1,5	19	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	7,2	10,48	14,56
P12: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	2	22	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	5,2	9,45	12,4
P13: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	2,5	21	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	4,8	7,2	10,02
P14: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	3	25	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	4,2	6,8	8,56
P15: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	3,5	26	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	4	5,6	7,2
P16: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	4	30	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	2,4	4,2	5,6
P17: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	4,5	31	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	0	0	0,1
P18: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	5	34	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	3,4	5,2	7,4
P19: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	5,5	36	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	3,8	5,8	8,8
P20: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	6	38	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 Ind	Final	2,8	4,9	8,02

FUENTE: Autoría propia

- P17: En la tabla 11, fue mejor tratamiento, se llegó reducir el cianuro total desde 567,23 ppm a 0,1 ppm.

4.1.5. Diseño de investigación

En resumen, habiendo realizado en el laboratorio las pruebas preliminares de detoxificación, el diseño final para las pruebas de optimización, se tomó en cuenta las consideraciones fácticas, ver tablas 10 y 11.

En resumen, de diseño cuasiexperimental de detoxificación del cianuro total libre en el líquido de lixiviación, ver tabla 12; condujo aplicar investigaciones experimentales mediante diseños factoriales fraccionados y la optimización mediante el diseño central compuesto aleatorizados.

Tabla 12 Resumen de los ensayos cuasiexperimentales del proceso de degradación del cianuro

METODO DE TRATAMIENTO	CICLOS	H2SO5 25% ml/L	CaO 15% ml/L	Tiempo de Residencia	FASE	CN Libre (ppm)	CN Wad (ppm)	CN Total (ppm)
P Acido de Caro 100% Primer Tanque	I	4,5	32	80 lab	Inicial	222,6	349,8	542,56
				160 lnd	Final	0	0,1	0,15
P17: Acido de Caro 100% Primer Tanque	II	4,5	31	80 lab	Inicial	238,25	368,59	567,23
				160 lnd	Final	0	0	0,1

4.1.6. Caracterización de la muestra

Inicialmente, las muestras fueron obtenidas a través de muestreadores de efluentes líquidos cada hora, obteniendo por corte 100ml haciendo una muestra por guardia de doce horas de 1200ml y por día de 2400ml.

Durante el monitoreo de junio y julio del 2025, se hicieron los muestreos en horas de mañana y tarde; con la finalidad de determinar la concentración del cianuro en el efluente líquido, después de muchos ensayos, el resumen final, ver tabla 13.

Tabla 13 Muestreos y análisis del efluente con contenido de cianuro

N°	Fecha	Muestra: lt	Prom. valor del CN total: ppm
1	09 al 13/06/2025	5	500
2	16 al 20/06/2025	5	550
3	23 al 27/06/2025	5	600
4	14 al 18/07/2025	5	520
5	21 al 25/07/2025	5	580
-----	Promedio	5	550

FUENTE: Autoría propia

Se realizó análisis de otras muestras con la finalidad de confirmar la tabla 13, antes de realizar los ensayos preliminares, las diferentes muestras fueron unidos para formar una sola muestra general; resultados que sirvieron para formular los diseños experimentales, ver tabla 14.

Tabla 14 Contenido de cianuro y metales

pH	CN libre: ppm	CN Wad: ppm	CN total ppm
10,5	238,30	368,59	567,20

FUENTE: Autoría propia

Tipos de cianuro: Es fundamental diferenciar entre cianuro libre, cianuro WAD (ácido débil dissociable, como $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$) y cianuro fuerte (como $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$). La eficacia de degradación varía considerablemente para cada tipo. Las soluciones resultantes de la lixiviación del oro incluirán una combinación de estos.

De los resultados se concluye que el valor promedio después de los análisis en el laboratorio, se encontró un promedio de 550 ppm o 567,20 de cianuro total o promedio de los efluentes líquidos de lixiviación, significa que el contenido de cianuro después de la lixiviación del oro es muy alto por encima del límite máximo permisible que contamina a los efluentes líquidos de consumo de los seres vivos, por lo tanto, excede a los índices señalados en el Decreto Supremo N° 010-2010- MINAM y sus modificatorias

4.1.7. Toma de muestras y análisis químico global de la muestra

Procedimiento técnico de muestreo, se sigue el procedimiento siguiente:

- a. Se recolectó 500 ml en una botella limpia
- b. Las soluciones muestreadas se agitaron para homogenizar
- c. Filtrar para eliminar los sólidos
- d. Se elevó el pH a más de 11 con NaOH para preservar la solución.
- e. Se etiquetó con los datos de muestreo
- f. Se transportó en hielera aproximadamente a 3 a 5°C

Por lo tanto, para evitar pérdidas por volatilización del cianuro como HCN, se elevó el pH por encima de 11 utilizando hidróxido de sodio (NaOH).

Manteniendo la muestra refrigerada a 4 °C para ser analizada en un plazo máximo de 48 horas.

Obtenida las muestras representativas del efluente líquido contaminado con cianuro, después de homogenizar y realizado el análisis se obtiene el siguiente resultado, ver tabla 15.

Tabla 15 *Características físicoquímicas de la muestra*

Parámetro	Unidad	Valor inicial
pH		10,5
Temperatura	°C	10
Cianuro libre	ppm	238,3
Cianuro WAD	ppm	368,59
Cianuro total	ppm	567,20
Cobre	mg/l	25,50
Zinc	mg/l	32,55
Plomo	mg/l	0,00
Hierro	mg/l	5,10
Plata	mg/l	2,05
Oro	mg/l	0,05

FUENTE: Elaboración propia

4.1.8. Parámetros experimentales de los factores de control experimental.

Después de una serie de corridas experimentales en el laboratorio con resultados positivos y análisis de las informaciones teóricas; se determinó los valores de los factores experimentales para formular el diseño factorial, es como sigue:

- **Dosificación del ácido de caro: 4 a 6 ml;** una sobre dosificación, puede resultar oxidación incompleta del cianuro
- **pH de la pulpa: 9 – 11;** en este caso la oxidación es más eficiente en medio ácido.
- **Temperatura de reacción: 20°C – 40°C** a este intervalo de temperatura la reacción química es muy rápida; a temperaturas muy bajas la reacción es lenta; mientras que, a temperaturas altas hay pérdida de peróxido de oxígeno.
- **Tiempo de agitación o tiempo de reacción: 30 a 50 min.** En este caso debe ser más prolongado para garantizar la oxidación completa.

➤ **Velocidad de agitación:** 400 a 600 RPM, la velocidad es moderada.

4.1.9. Diseños factoriales y sus ventajas.

El propósito principal de los diseños factoriales es analizar los efectos de múltiples factores o variables experimentales en una o varias respuestas, así como en la calidad del producto o productos obtenidos. En otras palabras, se pretende investigar la relación entre los factores y las respuestas que optimicen el rendimiento del proceso de flotación inversa.

Las ventajas de los diseños experimentales en los procesos de enfoque cuantitativos, son las siguientes:

- a. Es posible llevar a cabo diseños factoriales fraccionados, en trabajos de investigaciones que incluyen múltiples factores operacionales
- b. Es aplicable diseños factoriales de segundo orden.
- c. Los cálculos de los efectos y las interpretaciones de los factores se efectúan con la asistencia de programas estadísticos.

4.1.10. Diseños factoriales de los procesos experimentales

En la práctica, cuando los factores experimentales es más de 08, resulta imposible realizar muchas corridas experimentales, además de que resulta costoso e innecesario los análisis químicos, para lograr el estudio de muchos factores se realiza mediante los diseños factoriales fraccionados, 2^{k-p} , estos diseños como su propio nombre lo indica, son una parte o una fracción de los diseños factoriales completos, 2^k , que permiten reducir el número de corridas experimentales y al mismo tiempo se reducen el tiempo de experimentación, costo de análisis químico y general el costo de la investigación científica (Gutiérrez & Salazar, 2008).

4.1.11. Estrategias para la selección de los factores experimentales

La estrategia sugerida para la selección de factores experimentales en el proceso de investigación es la siguiente:

- a. Seleccionar las variables activas que tengan mayor impacto en una o varias respuestas, en el contexto de la degradación de los cianuros de lixiviación.
- b. Dependiendo del número de factores, se debe elegir la plantilla adecuada, siendo recomendable un diseño factorial fraccionado.
- b. Escoger valores reales de los factores de la manera más precisa posible para la experimentación metalúrgica.
- c. Llevar a cabo las pruebas conforme a la plantilla aleatorizada para evitar sesgos.
- d. Realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos para evaluar la significancia, utilizando para ello un software específico.
- e. Una vez seleccionados dos o tres factores operacionales más relevantes en la respuesta, se debe planificar un diseño de optimización utilizando modelos cuadráticos: octogonal o DCC.

Como consecuencia del ítem 4.1.8. se obtiene la tabla 16 para la formulación del diseño experimental fraccionado, tabla que sirvió para los ensayos experimentales en el laboratorio, con la finalidad de degradar al cianuro en sus diversas presentaciones.

Tabla 16 *Valores de los factores experimentales*

Factores experimentales: Muestra, 1 L con 500 ppm o más	Límite inferior	Límite superior
Dosificación de H ₂ SO ₅ (ml)	4	6
pH (Unidades)	9	11
Tiempo de agitación (min)	40	50
Velocidad de agitación (RPM)	200	400

FUENTE: Elaboración propia

Análisis de la tabla 16:

Consideraciones generales o justificación para la elección de los factores y sus valores óptimos experimentales para la degradación de los cianuros; tales como los ácidos fuertes (SADs); ácidos débiles (WADs) y los iones metálicos presentes en la solución, presentes después de la lixiviación del oro; son:

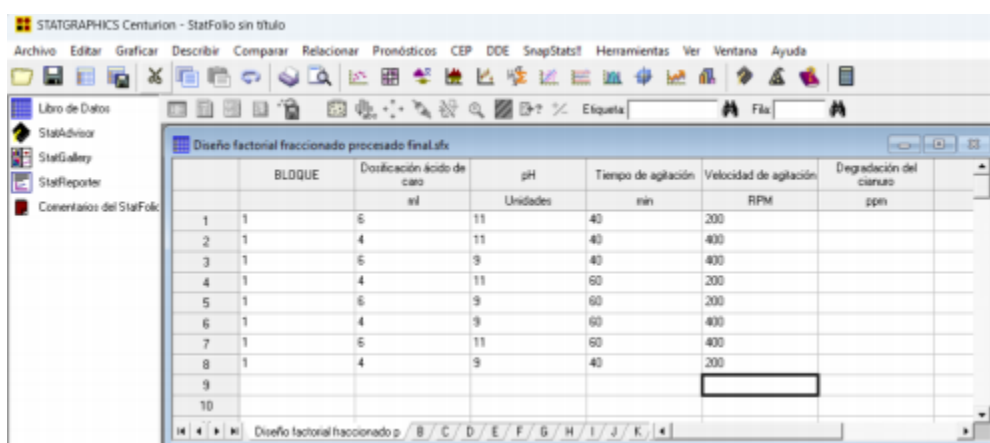
- e. El ácido de Caro se debe ser preparado para usar o añadir inmediatamente durante los ensayos experimentales, debido a su inestabilidad y se descompone rápidamente con el tiempo.
- a. En las pruebas de jarra en el laboratorio, rutinariamente se utiliza un ligero exceso de ácido de Caro, que puede ser 10 a 20% como adicional, con la finalidad de asegurar la completa degradación del cianuro y otros componentes, ver tabla 16, porque las otras especies pueden consumir el oxidante. Esto implicaría aumentar ligeramente los volúmenes calculados de H_2SO_4 y H_2O_2 (ácido de caro).
- b. El pH durante la adición de ácido de caro debe mantenerse en un rango alcalino de 9 a 11 adicionando cuidadosamente NaOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Para degradar convenientemente a todos los cianuros y precipitar a los metales.
- c. El tiempo de agitación o reacción, llamado también tiempo de residencia; es conveniente controlar de acuerdo a las recomendaciones de expertos en degradación de cianuros, a mayor tiempo la reacción es completa.
- d. La velocidad de agitación, es otro factor importante, la agitación vigorosa y constante es muy necesaria para poder asegurar el contacto íntimo entre el ácido de Caro y el cianuro en la solución, para obtener la máxima eficiencia de la reacción química.

- e. Por último, se recomienda; usar tanques con agitación mecánica adecuada con la finalidad de asegurar una mezcla completa y homogénea de los reactivos y el efluente líquido problema.

4.1.12. Diseño Factorial Fraccionado, 2^{k-p}

Después de las consideraciones generales y el análisis de la tabla 16 se elaboró la tabla 17 (captura de pantalla); con el objetivo de crear la plantilla del diseño factorial fraccionado con los factores experimentales considerados más influyentes en el proceso. Todo esto se llevó a cabo utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion, con el propósito de mantener el orden aleatorio de las corridas experimentales. Este formato o plantilla debe ser guardado en el mismo paquete estadístico, para que posteriormente se pueda realizar los análisis de los datos obtenidos en el gabinete de procesamiento.

Tabla 17 *Diseño factorial fraccionado con valores reales*



The screenshot shows the Statgraphics Centurion software interface. The main window displays a table titled 'Diseño factorial fraccionado procesado final.sfx'. The table has 7 columns: BLDQUE, Dosificación ácido de caso, pH, Tiempo de agitación, Velocidad de agitación, and Degradación del cianuro. The rows represent different experimental runs, numbered 1 to 10. The table is organized into blocks (BLDQUE) and shows the values for each factor in each run.

	BLDQUE	Dosificación ácido de caso	pH	Tiempo de agitación	Velocidad de agitación	Degradación del cianuro
		ml	Unidades	min	RPM	ppm
1	1	5	11	40	200	
2	1	4	11	40	400	
3	1	5	9	40	400	
4	1	4	11	60	200	
5	1	5	9	60	200	
6	1	4	9	60	400	
7	1	5	11	60	400	
8	1	4	9	40	200	
9						
10						

FUENTE: Elaboración propia

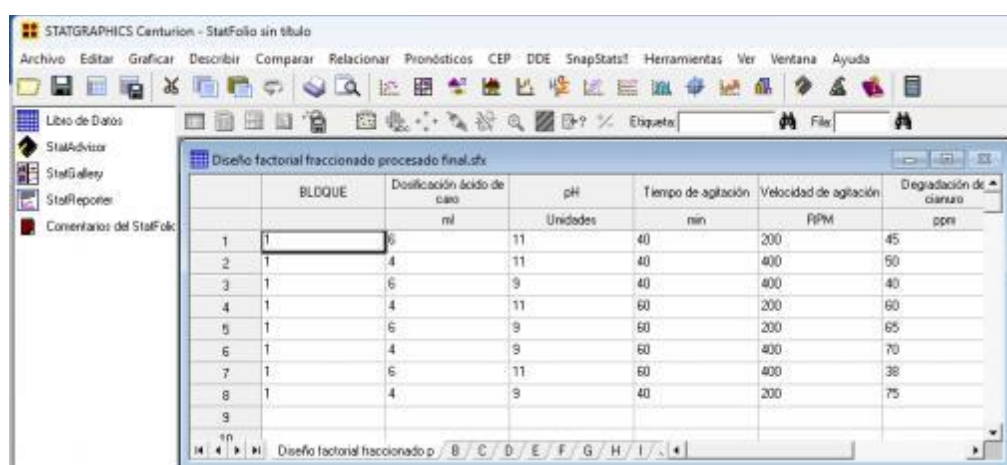
Las corridas experimentales en el laboratorio se cumplieron en el orden señalado en la tabla 13, aplicando el nivel de confianza del 95%.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de los resultados

4.2.1. Presentación de los resultados experimentales

Habiendo cumplido con los ensayos experimentales en el laboratorio en el orden aleatorio indicado en la tabla 17 y realizados los análisis respectivos en el laboratorio, los resultados ver tabla 18; ver anexo 2 ilustraciones 1; 2 y 3

Tabla 18 Resultados del diseño factorial fraccionado



The screenshot shows the STATGRAPHICS Centurion software interface. The main window displays a data table titled 'Diseño factorial fraccionado procesado final.sh'. The table has 8 columns: BLOQUE, Dosificación ácido de cian, pH, Tiempo de agitación, Velocidad de agitación, and Degradación de cianuro. The data is organized into 9 rows, with the first row highlighted. The table is displayed in a grid format with a header row and data rows.

	BLOQUE	Dosificación ácido de cian ml	pH Unidades	Tiempo de agitación min	Velocidad de agitación RPM	Degradación de cianuro ppm
1	1	6	11	40	200	45
2	1	4	11	40	400	50
3	1	6	9	40	400	40
4	1	4	11	60	200	60
5	1	6	9	60	200	65
6	1	4	9	60	400	70
7	1	6	11	60	400	38
8	1	4	9	40	200	75
9						

FUENTE: Elaboración propia

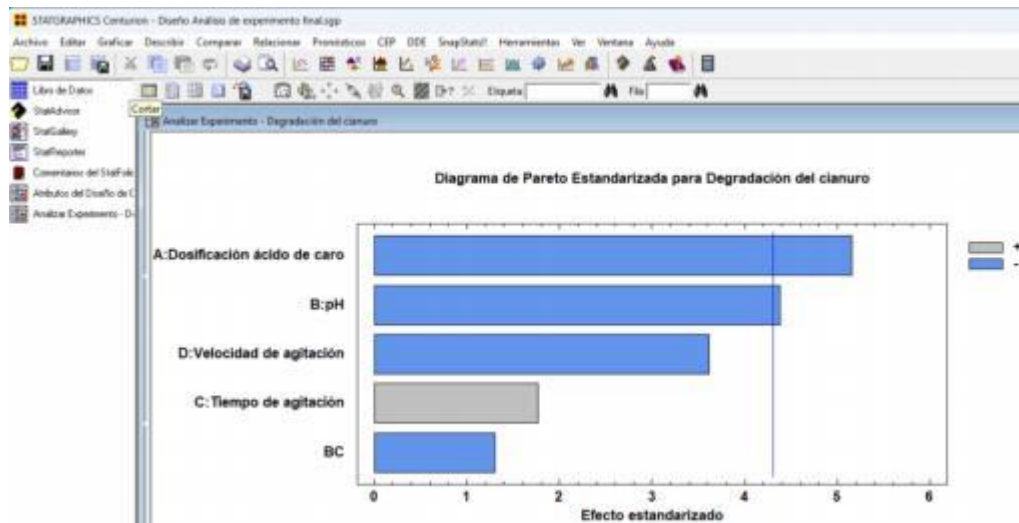
Análisis de tabla 18:

En la corrida experimental 3 y 7 se obtiene los mejores resultados de 40 38 ppm de degradación, con los cuales se realiza el proceso de optimización de la degradación de los cianuros.

4.2.2. Análisis e interpretación de los resultados.

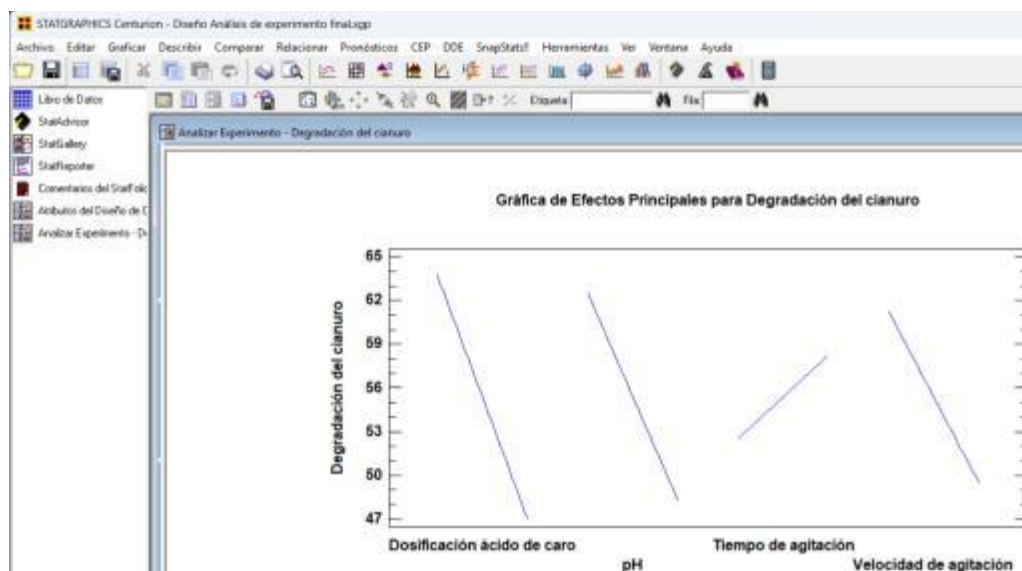
El procesamiento y análisis de los datos primarios de la tabla 18 se realizó mediante el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI para que los resultados obtenidos sean contundentes y no de carácter apreciativo o nominativo; obteniendo como resultados las tablas 19; 20 y 21 y las figuras 2; 3 y 4.

Figura 2 Diagrama de Pareto estandarizada para la degradación del cianuro



FUENTE: Autoría propia

Figura 3 Gráfica de efectos principales para la degradación del cianuro



FUENTE: Autoría propia

Análisis de las figuras 2 y 3 se aprecia:

- Los signos de los factores de dosificación del ácido de Caro; pH y velocidad de agitación son negativos, lo que indica que estos factores están en su nivel máximo. Se puede afirmar que están en su valor óptimo de funcionamiento, por lo tanto, se consideran constantes durante el proceso. Esta afirmación se confirma a través de la figura 3.

- b. El tiempo de agitación es positivo, lo que significa que se encuentra en su nivel mínimo. Debe ser maximizado mediante la optimización para establecer su rango de influencia óptima; esta afirmación se revalida a través de la tabla 19.

Tabla 19 Efectos principales para la degradación del cianuro

Efecto	Estimado	Int. Confianza	V.I.F.
promedio	55.375	+/- 6.99181	
A:Dosificación ácido de caro	-16.75	+/- 13.9836	1.0
B:pH	-14.25	+/- 13.9836	1.0
C:Tiempo de agitación	5.75	+/- 13.9836	1.0
D:Velocidad de agitación	-11.75	+/- 13.9836	1.0
BC	-4.25	+/- 13.9836	1.0

FUENTE: Autoría propia

Tabla 20 Análisis de varianza para la degradación del cianuro (ANOVA)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Dosificación ácido de caro	561.125	1	561.125	26.56	0.0356
B:pH	406.125	1	406.125	19.22	0.0483
C:Tiempo de agitación	66.125	1	66.125	3.13	0.2189
D:Velocidad de agitación	276.125	1	276.125	13.07	0.0687
BC	36.125	1	36.125	1.71	0.3211
Error total	42.25	2	21.125		
Total (corr.)	1387.88	7			

R-cuadrada = 96.9558 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.3452 por ciento

FUENTE: Autoría propia

Interpretación de la tabla 20:

- La interpretación se realiza con la primera y última columna (Valor-P); el valor de P de Pareto de los factores dosificación de ácido de Caro (A) y pH (B) es menor al 5% de nivel de significancia prefijado, significa que estos factores deben ser considerados como constantes por encontrarse en su valor máximo.
- Los factores Tiempo de agitación (C) y velocidad de agitación (D) presentan Valor-P mayores al 5% de nivel de significancia, en conclusión,

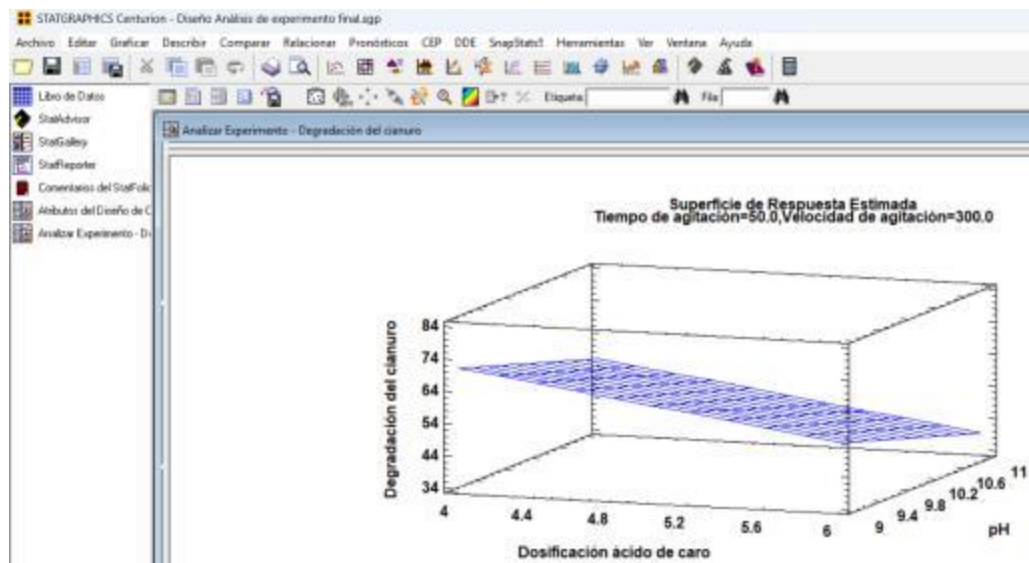
el proceso experimental de optimización para la degradación del cianuro total, se debe realizar con estos factores, por ser los más significativos del proceso.

- La interacción BC presenta Valor-P mayor al 5% de nivel de significancia, en consecuencia, el proceso experimental de la degradación del cianuro se debe repetir, con el proceso de optimización.
- El coeficiente de correlación, R-cuadrada, es del 96,9558%, lo que sugiere que el proceso es cuadrático y que el modelo se adapta adecuadamente al trabajo de investigación.
- El R-cuadrada (ajustado por grados de libertad) es del 89,3452%, lo cual es aceptable; sin embargo, es necesario mejorar este valor a través de otras corridas experimentales de optimización, asegurando un control más riguroso sobre los factores experimentales más significativos del proceso de degradación.

Interpretación de la figura 4:

Esta figura presenta un modelo matemático de primer orden, se ve claramente que la superficie es un hiperplano, en consecuencia, el modelo es de primer orden, entonces recomienda pasar a un modelo matemático de segundo orden.

Figura 4 Superficie de respuesta estimada para la degradación del cianuro



FUENTE: Autoría propia

Interpretación de la tabla 21 y el modelo matemático

Realizada la regresión estadística; se obtiene la tabla 21 y el modelo matemático de primer orden; los valores de los factores o dimensiones experimentales están especificados en sus valores originales. La ecuación del modelo ajustado es:

Tabla 21 Regresión lineal de la degradación del cianuro

Coefficiente	Estimado
constante	65.5
A:Dosificación ácido de caro	-8.375
B:pH	3.5
C:Tiempo de agitación	2.4125
D:Velocidad de agitación	-0.05875
BC	-0.2125

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

Degradación del cianuro = 65.5 - 8.375*Dosificación ácido de caro + 3.5*pH + 2.4125*Tiempo de agitación - 0.05875*Velocidad de agitación - 0.2125*pH*Tiempo de agitación

FUENTE: Autoría propia

Al interpretar el modelo matemático, el valor 65.50 es positivo, indica que se encuentra en el mínimo; entonces se debe realizar nuevas corridas experimentales de confirmación u optimización con los factores de más significancia C y D (ver tabla 19), para maximizar u obtener un valor mínimo de ppm durante la degradación del

cianuro, para cumplir con el Valor Máximo Permisible del Decreto Supremo 010-2010 MINAM.

En consecuencia:

- a. Los datos obtenidos del análisis de cianuro después del tratamiento se utilizaron para evaluar la efectividad de la eliminación del cianuro libre en cada condición experimental. Se realizó la determinación del ANOVA; la regresión estadística y otros como métodos para identificar la relación entre la dosificación del ácido de caro; pH; el tiempo agitación y la velocidad de agitación, para identificar, cómo un factor experimental depende de la otra.
- b. Se estableció el porcentaje de eliminación del cianuro libre para diversas proporciones en masa de ácido Caro y otros factores experimentales con el objetivo de identificar las condiciones óptimas para la degradación del cianuro total presente en el relave, y así evaluar la eficacia el método del ácido de Caro.

4.2.3. Proceso de optimización del proceso de degradación del cianuro

La tabla 22, indica los valores óptimos de los factores activos o más significativos del proceso de optimización, para pasar a un proceso de optimización de la degradación del cianuro total.

Tabla 22 *Valores óptimos de los factores*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Dosificación ácido de caro	4.0	6.0	4.02386
pH	9.0	11.0	9.0
Tiempo de agitación	40.0	60.0	60.0
Velocidad de agitación	200.0	400.0	208.176

FUENTE: Elaboración propia

Formulación de la tabla de optimización:

Tabla 23 Factores de optimización y sus niveles

FACTORES	Nivel (-)	Nivel (+)
Tiempo de agitación: min	50	70
Velocidad de agitación: RPM	180	220

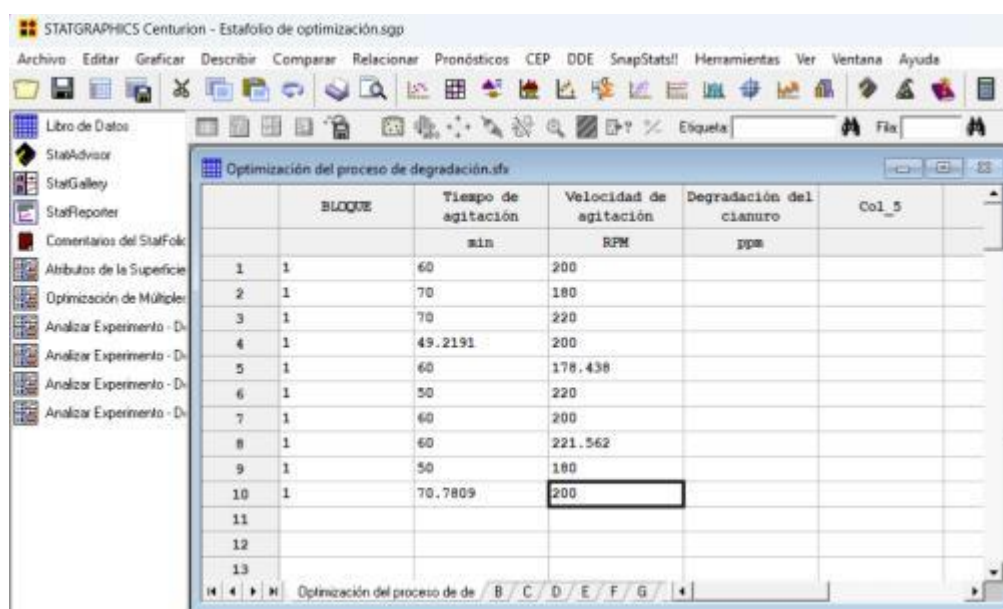
FUENTE: Elaboración propia

Diseño de composición central (DCC)

Este diseño es de suma importancia, porque permite optimizar el gasto de los recursos experimentales de tiempo y espacio; no es necesario empezar o comenzar de cero, sino que se aprovechan las corridas experimentales de primer orden realizadas para la selección de los factores más significativos del proceso de degradación de las condiciones ambientales del cianuro.

Mediante la tabla 23, se formuló la plantilla del diseño central compuesto o diseño de composición central (DCC) para las corridas experimentales de optimización para la degradación del cianuro. Ver tabla 24.

Tabla 24 Plantilla del DCC para la optimización



The screenshot shows the STATGRAPHICS Centurion software interface. The main window displays a table titled 'Optimización del proceso de degradación.sfs'. The table has columns: 'BLOQUE', 'Tiempo de agitación min', 'Velocidad de agitación RPM', 'Degradación del cianuro ppm', and 'Col_5'. The table contains 13 rows of data. The first row has values 1, 1, 60, 200. The second row has values 2, 1, 70, 180. The third row has values 3, 1, 70, 220. The fourth row has values 4, 1, 49.2191, 200. The fifth row has values 5, 1, 60, 178.438. The sixth row has values 6, 1, 50, 220. The seventh row has values 7, 1, 60, 200. The eighth row has values 8, 1, 60, 221.562. The ninth row has values 9, 1, 50, 180. The tenth row has values 10, 1, 70.7809, 200. The eleventh row has values 11, 1, 60, 200. The twelfth row has values 12, 1, 70, 180. The thirteenth row has values 13, 1, 70, 220.

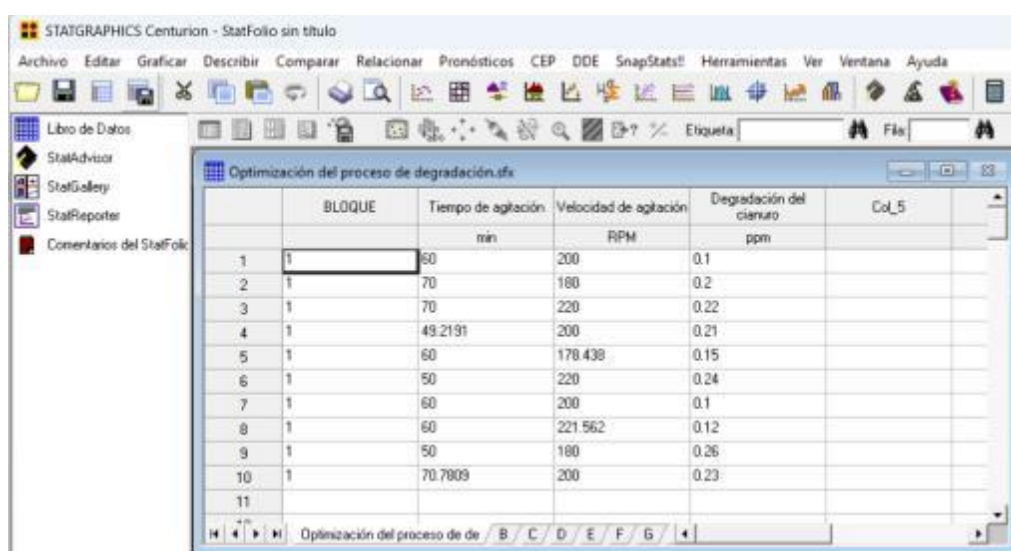
	BLOQUE	Tiempo de agitación min	Velocidad de agitación RPM	Degradación del cianuro ppm	Col_5
1	1	60	200		
2	1	70	180		
3	1	70	220		
4	1	49.2191	200		
5	1	60	178.438		
6	1	50	220		
7	1	60	200		
8	1	60	221.562		
9	1	50	180		
10	1	70.7809	200		
11					
12					
13					

FUENTE: Autoría propia

Presentación de los resultados experimentales del DCC

Se cumplió con las corridas experimentales en el laboratorio en el orden estricto establecido en la tabla 24 y realizados los análisis químicos instrumentales respectivamente, se obtiene los resultados de la degradación del cianuro. Ver tabla 25. Además, ver anexo 2; ilustraciones 4 y 5.

Tabla 25 Pruebas experimentales de optimización



	BLOQUE	Tiempo de agitación min	Velocidad de agitación RPM	Degradación del cianuro ppm	Col_5
1	1	60	200	0.1	
2	1	70	180	0.2	
3	1	70	220	0.22	
4	1	49.2191	200	0.21	
5	1	60	178.438	0.15	
6	1	50	220	0.24	
7	1	60	200	0.1	
8	1	60	221.562	0.12	
9	1	50	180	0.26	
10	1	70.7809	200	0.23	
11					

FUENTE: Autoría propia

Interpretación de la tabla 25:

Los mejores resultados se obtienen en las corridas o ensayos experimentales número 1; 2; 7 y 8; siendo la degradación del cianuro un promedio muy aceptable que cumple con el Decreto Supremo 010-2010 MINAM; en procesos metalúrgicos como la lixiviación de oro, el contenido de cianuro total debe ser 1mg/L es decir 1 ppm; en el presente caso de investigación experimental se superó largamente el LMP del Decreto Supremo arriba mencionado, en la tabla 25 el cianuro degradado más baja es 0,1 ppm o 0,1 mg/L en la solución tratada.

Análisis e interpretación de la optimización.

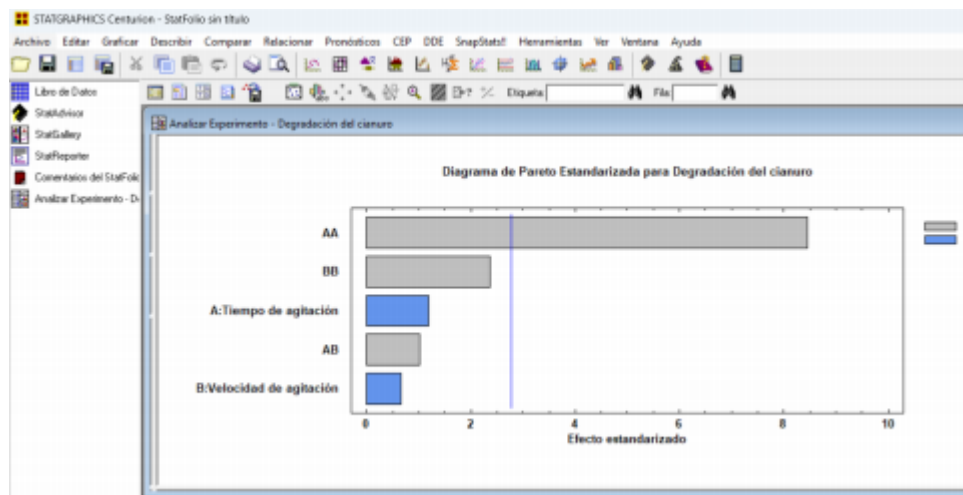
Habiendo cumplido con los análisis de los resultados experimentales de optimización para la degradación del cianuro según tabla 25, se llegó a obtener las tablas 26; 27 y 28 y las figuras 5 y 6.

Análisis de figura 5:

Según el diagrama de Pareto, los factores A y B, tiempo de agitación y velocidad de agitación presentan pendiente negativa, significa que se encuentra en su valor máximo o punto óptimo, en consecuencia, dicho factor es una constante con el valor máximo de su nivel.

El signo de la interacción AB es positivo, significa que existe interacción entre los factores A y B, también indica que la interacción está en su valor mínimo, en consecuencia, se debe ser maximizado para obtener el mejor resultado de degradación del cianuro.

Figura 5 *Diagrama de Pareto estandarizada para degradación del cianuro*

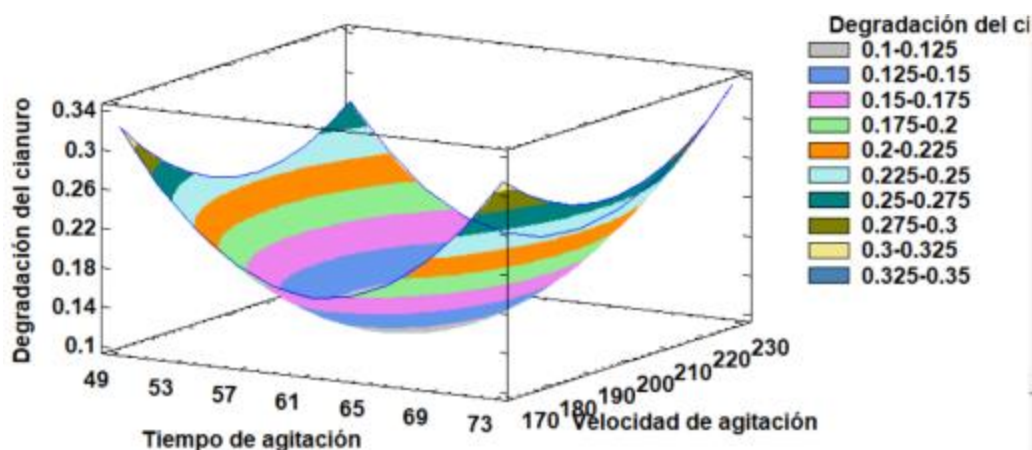


FUENTE: Autoría propia

Las curvaturas, AA y BB tienen signos positivos pero con diferentes constantes, en conclusión, la figura es una elipse (hiperhelipsoide o hiperboloide invertida) o cascara de huevo en el espacio, pero invertida, significa que el proceso de degradación

del cianuro total está ante la posibilidad de un efecto mínimo de contaminar al medio ambiente, a la vez estas curvaturas permite continuar con la optimización por tener signos positivos, ver figura 6 y tabla27.

Figura 6 Superficie de respuesta estimada de optimización



FUENTE: Autoría propia

Análisis de la Tabla 26 – ANOVA

El análisis se realizó a partir del Valor-P de Pareto, en el presente caso ningún factor presenta valores menores al 0,5% de nivel de significancia fijado estadísticamente; en este caso no se rechazan a la H_0 .

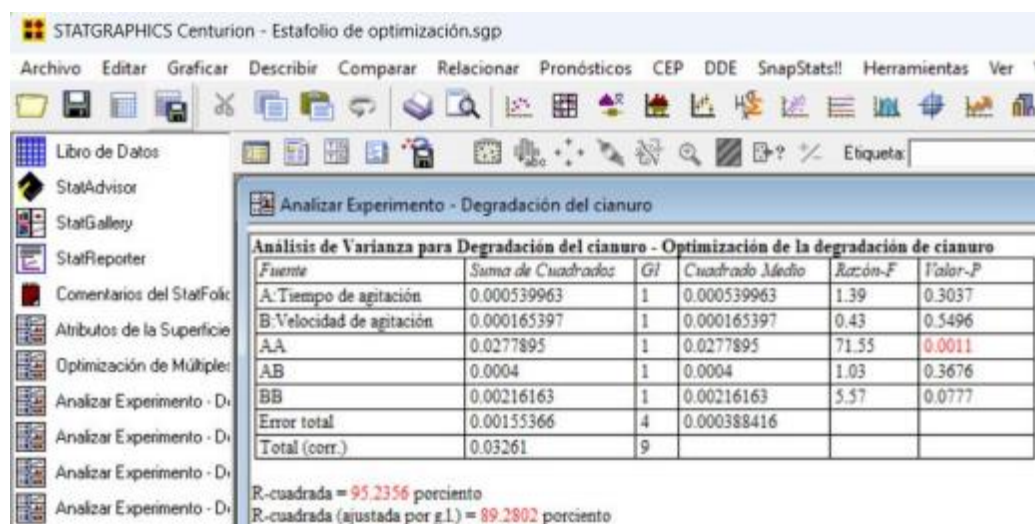
El coeficiente de correlación es del 99,1038%, lo cual es bastante aceptable, reafirmando que el proceso es cuadrático y que el modelo se adapta al trabajo de investigación presente.

El coeficiente de correlación (cuadrado medio) 95,2356 % es muy aceptable, el cual reafirma que el proceso es cuadrático y el modelo se ajusta al trabajo de investigación para degradar al cianuro total.

La varianza del error es 0,000388416 es muy bajo, significa que las variabilidades de los datos están dentro de la curva de Gauss, por lo tanto, los ensayos de optimización del proceso de degradación del cianuro son correctos.

El Valor-P, de las curvaturas AA y BB no están muy alejados del 5% de nivel de significancia; aún se puede continuar con el proceso de optimización para minimizar la existencia del cianuro total contaminante del ecosistema.

Tabla 26 *Análisis de varianza de optimización del cianuro*



STATGRAPHICS Centurion - Estafolio de optimización.sgp

Archivo Editar Graficar Describir Comparar Relacionar Pronósticos CEP DDE SnapStats! Herramientas Ver V

Libro de Datos StatAdvisor StatGallery StatReporter Comentarios del StatFolk Atributos de la Superficie Optimización de Múltiples Analizar Experimento - D Analizar Experimento - D Analizar Experimento - D Analizar Experimento - D

Análisis de Varianza para Degradación del cianuro - Optimización de la degradación de cianuro

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo de agitación	0.000539963	1	0.000539963	1.39	0.3037
B:Velocidad de agitación	0.000165397	1	0.000165397	0.43	0.5496
AA	0.0277895	1	0.0277895	71.35	0.0011
AB	0.0004	1	0.0004	1.03	0.3676
BB	0.00216163	1	0.00216163	5.57	0.0777
Error total	0.00155366	4	0.000388416		
Total (corr.)	0.03261	9			

R-cuadrada = 95.2356 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.2802 por ciento

FUENTE: Autoría propia

Análisis del modelo matemático de segundo orden – Tabla 27.

Tabla 27 *Modelo matemático de segundo orden*

Coefficiente	Estimado
constante	7.28713
A:Tiempo de agitación	-0.132626
B:Velocidad de agitación	-0.0315411
AA	0.00101418
AB	0.00005
BB	0.0000707134

Degradación del cianuro = 7,28713 - 0,132626*Tiempo de agitación - 0,0315411*Velocidad de agitación + 0,00101418*Tiempo de agitación² + 0,00005*Tiempo de agitación*Velocidad de agitación + 0,0000707134*Velocidad de agitación²

Si los valores de los factores del modelo matemático de segundo orden fueran ceros, entonces se establece que el valor 7,28713 positivo está en su valor

máximo de degradación o minimización de la presencia del cianuro total en la solución de la lixiviación.

Las dimensiones A y B tienen signos positivos, significa que, aún se puede la degradación del cianuro total. Continuar investigando.

Análisis de tabla 28

Tabla 28 Valores para continuar con la optimización

Valor óptimo = 0.278818

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Tiempo de agitación	49.2191	70.7809	49.2191
Velocidad de agitación	178.438	221.562	178.438

FUENTE: Autoría propia

Cumplida la optimización mediante la tabla 23 se obtiene la tabla 26; se realizó el análisis instrumental, obteniendo la tabla 29, la cual indica claramente que se cumplió con el Decreto Supremo 010-2010 MINAM,

Tabla 29 Resultados después de optimización

Parámetro	Unidad	Valores iniciales	Valores finales
pH	Unidad	10,5	11,40
Temperatura	°C	10	10
Cianuro libre	ppm	238,3	0,00
Cianuro WAD	ppm	368,59	0,10
Cianuro total	ppm	567,20	0,10
Cobre	mg/lt	25,50	1,40
Zinc	mg/lt	32,55	0,25
Plomo	mg/lt	0,00	0,00
Hierro	mg/lt	5,10	3,63
Plata	mg/lt	2,05	0,14
Oro	mg/lt	0,05	0,10

FUENTE: Elaboración propia

4.2.4. Segundo proceso de optimización.

En los análisis anteriores se manifestó contundentemente que se puede continuar con el proceso de optimización, si es así, para la formulación del diseño de

composición central (DCC) se debe usar la tabla 30 formulado a partir de la tabla 28:

Tabla 30 *Valores para la segunda optimización*

FACTOR	Nivel bajo	Nivel alto
Tiempo de agitación	45	55
Velocidad de agitación	170	190

FUENTE: Autoría propia

Señor tesista, continuar con el proceso de optimización para mejorar la degradación de los cianuros de la solución de lixiviación del oro y plata, haciendo uso de tabla 30. **Éxitos.**

4.3. Prueba de hipótesis

En el contexto de una tesis académica experimental en ingeniería, la prueba de hipótesis constituye una herramienta estadística esencial para validar o refutar afirmaciones vinculadas al comportamiento de un sistema, proceso o material que se encuentra bajo condiciones controladas; es decir, es el fundamento, que permite a los investigadores convertir las observaciones empíricas en conclusiones que son científicamente válidas y estadísticamente significativas. Los puntos fundamentales o claves que se debe tomar en cuenta en el proceso de validación de la hipótesis experimental:

- a. **Hipótesis Científica:** Trata explicar el "por qué" de los problemas o explica los mecanismos de degradación.
- b. **Hipótesis de Trabajo:** Trata el "cómo" resolver problemas prácticos o propone la solución técnica o experimental.
- c. **Hipótesis Estadística:** Establece la "probabilidad" de que los resultados sean significativos, es decir valida los resultados experimentales.

4.3.1. Criterios de rechazo o aceptación a la H_0 .

En las ciencias naturales existen criterios importantes para decidir cuándo rechazar o aceptar a la hipótesis nula, en caso contrario rechazar o aceptar la hipótesis alterna.

La prueba de hipótesis, se realiza fundamentalmente tomando en cuenta la tabla ANOVA del proceso del proceso de investigación en las ciencias naturales obtenida mediante las observaciones empíricas o experimentales.

Consideraciones generales:

- Si $P \leq \alpha$, se rechaza H_0 : existe diferencia estadística significativa para aceptar H_1 ; es decir que el ácido de Caro es efectivo
- Si $P > \alpha$, no se rechaza H_0 : no se acepta H_1 ; no hay evidencia suficiente de efectividad del ácido de Caro.
- Si F calculado es mayor al F crítico, se rechaza a la H_0 ; es decir, hay diferencias significativas entre los tratamientos.
- Si F calculado es menor al F crítico, no se rechaza a la H_0 ; es decir, no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

4.3.2. Análisis del ANOVA para la prueba de hipótesis

Los análisis estadísticos se realizan tomando en cuenta la **tabla 26** del proceso de degradación del cianuro total:

- a. Los factores tiempo de agitación (A) y Velocidad de agitación (B) presentan Valor-P mayores al 5% de nivel de significancia prefijado; en el presente caso los valores 0,3037 y 0,5496 respectivamente son mayores al valor 0,05 de nivel de significancia prefijado; por lo tanto, no se rechaza a la H_0 ; no hay evidencia para aceptar H_1 ; es decir no existe la evidencia suficiente del tiempo de agitación y

velocidad de agitación, para degradar totalmente al cianuro total, entonces continuar con el proceso de investigación.

- b. El F de Fisher calculado del factor experimental tiempo de agitación (A) es 1,39 es menor al F crítico, 7,709; lo mismo sucede con la velocidad de agitación (B); en estos casos no se rechaza la H_0 , significa que estos factores no tienen efectos significativos en la degradación del cianuro. Se recomienda continuar con el proceso de optimización, para ello tomar en cuenta la tabla 30 de la presente tesis.
- c. En consecuencia, falta la optimización final para lograr la eficiencia del ácido de Caro, de tal manera degradar cabalmente el cianuro total del efluente líquido minero; continuar con el proceso de investigación académica experimental.

4.4. Discusión de resultados

- a. Según Saa Cardona y Guarnizo Ruiz (2022), en su investigación básica, afirma que lograron degradar al cianuro libre mediante el método de ácido de Cari en 99,99% y 99,60%.
- b. Según Aroni Katherine y Morales Yesenia (2023), mediante el uso de peróxido de hidrógeno 150 ppm y meta sulfito de sodio 150 ppm, denominado método (INCO), lograron la reducción del cianuro libre en 99,84% en un pH mayor a 9 y con 2 horas de tiempo de reacción.
- c. Según Alonso (2025), mediante el método de ácido de Caro logró degradar el cianuro total de un relave que contenía 215,6 ppm en un tiempo de reacción de 20 minutos y a un pH de 10,5 unidades.

En consecuencia, comparando los resultados de los investigadores citados en la presente tesis académica experimental de optimización mediante el método de ácido de Caro, se superó a los antecedentes; logrando la degradación del cianuro total en un 99,98%; bajo las condiciones de operación siguiente: Realizadas la investigación

mediante el diseño factorial fraccionado, ver tabla 18 corrida 7 y mediante la tabla 20; la dosificación de ácido de Caro=6 ml y pH= 11 se declaró como constantes y los factores tiempo de agitación= 60 min y velocidad de agitación= 400 RPM fueron declarados como factores más significativos del proceso, con los cuales se realizó el proceso de optimización, los resultados ver en la tabla 25, obteniendo los mejores resultados de degradación o reducción del cianuro total en los ensayos 1 y 7; cuyo valor es 0,1 ppm.

CONCLUSIONES

1. Los factores experimentales considerados como constantes del proceso experimental de degradación del cianuro, son la dosificación del ácido Caro y el pH; por presentar el Valor-P menor al 5% de nivel de significancia, esta conclusión es ratificada por la tabla 20.
2. Los factores experimentales más significativos para el proceso de optimización son el tiempo de agitación (C) y velocidad de agitación (D) por presentar el Valor-P mayores al 5% de nivel de significancia pre fijado, ver tabla 20; además esta afirmación es confirmada por la figura 4, la cual recomienda pasar a un modelo matemático de segundo orden.
3. Realizadas el proceso de optimización a partir de la tabla 23; se obtienen como resultados valores muy inferiores al Límite Máximo Permisible del 1 mg/L o 1 ppm de la Resolución Ministerial N° 041-2014- MINAM o del D.S. 010-2010-MINAM, ver tabla 25, no se contamina al medio ambiente.
4. La principal ventaja del método ácido de Caro radica en su habilidad para disminuir rápidamente las concentraciones de cianuro a niveles muy bajos, lo que facilita el cumplimiento de las normativas ambientales actuales; además, el proceso es relativamente fácil de implementar y no demanda grandes inversiones en infraestructura, lo que lo hace una solución económicamente viable para las empresas mineras que procesan minerales a través de la lixiviación con cianuro.

RECOMENDACIONES

Mejorar los resultados de degradación del cianuro total mediante el método del ácido de Caro, para ello formular el diseño de optimización (DCC) haciendo uso de la tabla 28 o tabla 30.

Realizar un análisis de Viabilidad Técnica y Económica enfocado en la gestión de los sólidos resultantes de la precipitación metálica para mitigar los costos y evitar la generación de un nuevo pasivo ambiental

Mantener la Dosificación de Ácido de Caro y el pH como constantes operativas Se debe asegurar que, en futuros procesos industriales de detoxificación en la Planta de Óxidos, la dosificación de ácido de Caro y el pH se mantengan dentro de los rangos operacionales determinados como óptimos y constante

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, P. R. E. L. S. R. V. (2025). Tratamiento de cianuro librepor método ácido de Caro en relave de minera aurífera San Simón - Santiago de Chuco- 2024. Universidad Nacional de Trujillo.
- Amaro Medina, B. M., Garza Román, M. R., Martínez Luevanos, A., Soria Aguilar, M. de J., & Carrillo Pedroza, F. R. (2020). Tratamiento de aguas residuales de cianuración. Un enfoque termodinámico. *CienciAcierta*, 64(January), 1–15.
<http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/CC66/principiostermodinamicos.pdf>
- Aroni Katherine, & Morales Yesenia. (2023). Condiciones óptimas para la detoxificación de efluentes mineros cianurados. Universidad Nacional del Callao. Arroyo Maury, R., & Hidalgo Zacarias, L. (2019). Detoxificacion de Relaves del Proceso de Cianuracion de Oroy Plata Utilizando Acido Caro Mejorado. Universidad Nacional del Centro del Perú
- Chingo Saavedra, A. (2020). El cianuro y su toxicidad en aguas residuales [Universidad Nacional de Tumbes]. In Universidad Nacional de Tumbes.
<http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/UNITUMBES/1486>
- Fárez, C., Landi, P., & Parra, A. (2011). Reducción de la concentración de cianuro con tratamiento de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en las aguas residuales de la industria del galvanizado [Universidad Politécnica Salisiana Sede Cuenca].
<http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/1083>
- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. In Análisis y Diseño de Experimentos (Tercera Ed).
https://www.academia.edu/32094439/Análisis_y_diseños_de_experimentos_3ra_edición_Gutierrez_Pulido_pdf?auto=download

Rojas Cuenca, Verónica G.; Cabrera Espinosa, J. (2024). Optimización de la dosificación de reactivos en el proceso de destrucción de cianuro en una planta de beneficio ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Saa Cardona, L. N., & Guarnizo Ruiz, J. D. (2022). Análisis de alternativas para la remoción del cianuro presente en los efluentes de los relaves de minas auríferas. Universidad de Antioquía.

Zapata, E., & Bermudez, Y. (2019). Estado del arte de la biodegradación de cianuro en aguas residuales industriales. Universidad Nacional Abiertay a Distancia, 57

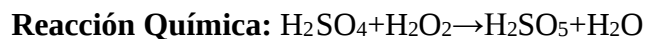
ANEXOS

ANEXO 1

Preparación final del Ácido de Caro

Preparación de una solución de ácido de Caro 0,5 M (molar) H_2SO_5 en un volumen final de 2 litro.

a. Ecuación química balanceada:



b. Masas Molares:

- H_2SO_4 : 98,072 g/mol
- H_2O_2 : 34,014 g/mol
- H_2SO_5 : 114,071 g/mol
- H_2O : 18,015 g/mol

c. Densidades de las soluciones comerciales:

- H_2SO_4 al 98% (m/m): $\approx 1,84$ g/mL
- H_2O_2 al 50% (m/m): $\approx 1,20$ g/mL

Cálculos Estequiométricos para una Solución de H_2SO_5 de 0,5 M en 02 Litros

Paso 1: Calcular los moles de H_2SO_5 deseados.

Moles de H_2SO_5 = Concentración deseada (M) * Volumen deseado (L)

Moles de H_2SO_5 = 0,5 mol/L * 2 L = **1,0 mol de H_2SO_5**

Paso 2: Calcular los moles de H_2O_2 y H_2SO_4 necesarios

(relación estequiométrica 1:1). Para producir 1,0 mol de H_2SO_5 , se requieren:

- 1,0 mol de H_2O_2
- 1,0 mol de H_2SO_4

Paso 3: Calcular la masa de H₂O₂ pura necesaria.

- Masa de H₂O₂ pura = Moles de H₂O₂ * Masa Molar de H₂O₂
- Masa de H₂O₂ pura = 1,0 mol * 34,014 g/mol = **34,014 g de H₂O₂ pura**

Paso 4: Calcular el volumen de la solución de H₂O₂ al 50% (m/m) necesaria.

- Masa de la solución de H₂O₂ al 50% = Masa de H₂O₂ pura / (0,50)

Masa de la solución de H₂O₂ al 50% = 34,014 g / 0,50 = **68,028 g de solución de H₂O₂ al 50%**
- Volumen de la solución de H₂O₂ al 50% = Masa de la solución/Densidad
- Volumen de la solución de H₂O₂ al 50% = 68,028 g / 1,20 g/ml =

56,69 ml de solución de H₂O₂ al 50%

Paso 5: Calcular la masa de H₂SO₄ pura necesaria.

- Masa de H₂SO₄ pura = Moles de H₂SO₄ * Masa Molar de H₂SO₄
- Masa de H₂SO₄ pura = 1,0 mol * 98,072 g/mol = **98,072 g de H₂SO₄ pura**

Paso 6: Calcular el volumen de la solución de H₂SO₄ al 98% (m/m) necesaria,

- Masa de la solución de H₂SO₄ al 98% = Masa de H₂SO₄ pura / (0,98)
Masa de la solución de H₂SO₄ al 98% = 98,072 g / 0,98 =
100,073 g de solución de H₂SO₄ al 98%
- Volumen de la solución de H₂SO₄ al 98% = Masa de la solución / Densidad
Volumen de la solución de H₂SO₄ al 98% = 100,073 g /

1,84 g/mL = **54,39 mL de solución de H₂SO₄ al 98%**

Resumen de Cantidades para el Escenario Ideal (Estequiométrico):

Para producir 1 mol de H₂SO₅ y alcanzar una concentración de 0,5 M en 2 Litros de solución, necesitarías:

➤ Peróxido de Hidrógeno al 50%: $\approx 56,7$ ml

➤ Ácido Sulfúrico al 98%: $\approx 54,4$ ml

Pero aquí viene una consideración crítica: Si se mezcla las cantidades líneas arriba, el volumen final sería de aproximadamente $56,7 \text{ ml} + 54,4 \text{ ml}$ + el agua que ya venía en las soluciones, lo que es mucho menor a 2 Litros. Además, la reacción es exotérmica y se necesita una cantidad considerable de disolvente (generalmente agua, o un gran exceso de H_2SO_4) para manejarla de forma segura.

Volumen Final del reactivo: La mezcla final de H_2SO_4 ; H_2O_2 y H_2O (formada y presente en los reactivos) constituirá los 2 Litros. Es importante entender que el volumen de los reactivos tal cual (H_2SO_4 concentrado y H_2O_2 concentrado) no sumará 2 litros.

Finalmente, para la preparación se debe usar obligatoriamente protector personal completo, finalmente trabajar en la campana extractora de gases.

Una vez producido, el ácido de Caro debe ser vertido de inmediato en la pulpa o solución residual de la lixiviación del oro que contiene cianuro. A diferencia de otros métodos que necesitan tanques de almacenamiento y agitación, el ácido de Caro puede ser aplicado directamente en la línea de descarga o en el espesador de la pulpa.

ANEXO 2

Matriz de Consistencia

Titulo: “Optimización del Proceso de Degradación del Cianuro de Sodio para Mejorar la Detoxificación en el Área de la Planta de Óxidos-Volcan-2024”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	OPERACIONALIZACION	METODOLOGIA
○ Problemas Generales ¿A qué proporción de ácido de Caro mejorado y concentración de cianuro se logra la detoxificación de cianuro total contenido en la pulpa proveniente del proceso de cianuración para alcanzar los límites máximos permisibles? ○ Problemas Específicos ¿Qué composiciones químicas, densidad de pulpa y PH tiene la pulpa de la cabeza de DETOX? ¿A que la proporción de ácido caro mejorado se logra reducir el cianuro a los límites máximos permisibles? ¿Cuál será la dosis óptima de ácido caro mejorado para la detoxificación de cianuro?	○ Objetivos Generales ¿Determinar la proporción de ácido de Caro mejorado y concentración de cianuro en la detoxificación de cianuro total contenido en la pulpa proveniente del proceso de cianuración para alcanzar los límites máximos permisibles? ○ Objetivos Específicos - Determinar la composición química, densidad de pulpa y PH tiene la pulpa de la cabeza de DETOX. - Analizar la proporción de ácido caro mejorado para lograr reducir el cianuro a los límites máximos permisibles - Proponer la dosis óptima de ácido caro mejorado para la detoxificación de cianuro	○ Hipótesis Generales - Con la proporción de ácido de Caro mejorado y concentración de cianuro se logra la detoxificación del cianuro total en el relave final. ○ Hipótesis Específicos - Se conoce la composición química, densidad de pulpa y PH tiene la pulpa de la cabeza de DETOX entonces se predice los niveles de las variables independientes. - Controlando la proporción de ácido caro mejorado en la detoxificación de cianuro se logra la reducción del cianuro hasta los límites máximos permisibles. - Al proponer la dosis óptima de ácido caro mejorado se logra la detoxificación de cianuro en el relave final.	Variable dependiente. - Concentración de cianuro total en relave final de la detoxificación. Variable independiente - Proporciones de ácido de Caro mejorado - Concentraciones de cianuro a detoxificar.	○ Diseño de Investigación Experimental Siendo su diseño de tipo factorial 3² ○ Población de Estudio La pulpa con contenido de cianuro proveniente de la filtración de la pulpa del proceso de cianuración. ○ Tamaño de la Muestra 500 cc cúbicos de pulpa. ○ Técnicas de Recolección de Datos La recolección de datos se realizara por observación directa. Análisis de cianuro total por análisis volumétrico ○ Análisis e Interpretación de los resultados Mediante herramientas Estadisticss descriptivas e inferencialers, haciendo uso de software

ANEXO 3

Ilustración 1 *Preparación del ácido de Caro*



Ilustración 2 *Preparación del ácido de Caro*





Ilustración 4 *Pruebas experimentales de degradación del cianuro*





Ilustración 6 *Pruebas de sedimentación*





Ilustración 8 *Resultado del proceso de optimización final*

