



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

APLICACIÓN DE OZONO PARA OXIDACIÓN DE CIANURO TOTAL EN
EFLUENTES MINEROS DE EXTRACCIÓN DE ORO, 2025

Línea de investigación:
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autora

Quiroz Montesinos, Natalia Camila

Asesor

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado

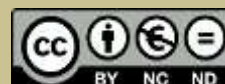
Alva Velásquez, Miguel

Villantoy Peralta, Juan Ademir

Paricoto Simón, María Mercedes

Lima - Perú

2025



"APLICACIÓN DE OZONO PARA OXIDACIÓN DE CIANURO TOTAL EN EFLUENTES MINEROS DE EXTRACCIÓN DE ORO, 2025"

INFORME DE ORIGINALIDAD

30%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	10%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	9%
3	bibliotecadigital.udea.edu.co Fuente de Internet	2%
4	aulas.uruguayeduca.edu.uy Fuente de Internet	2%
5	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.abrh.org.br Fuente de Internet	1%
8	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Corporación Universitaria Minuto de Dios, UNIMINUTO Trabajo del estudiante	<1%
10	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
11	luz-aldia.com.ve Fuente de Internet	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

“APLICACIÓN DE OZONO PARA OXIDACIÓN DE CIANURO TOTAL EN
EFLUENTES MINEROS DE EXTRACCIÓN DE ORO, 2025”

Línea de investigación:

Tecnología para residuos y pasivos ambientales. Bioremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental

Autora:

Quiroz Montesinos, Natalia Camila

Asesor:

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado:

Alva Velásquez, Miguel

Villantoy Peralta, Juan Ademir

Paricoto Simón, María Mercedes

Lima – Perú

2025

ÍNDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Descripción y formulación del problema.....	10
1.1.1 Descripción del problema.....	10
1.1.2 Formulación del Problema.....	12
1.1.2.1 Problema general.....	12
1.1.2.2 Problemas específicos.....	12
1.2 Antecedentes.....	12
1.2.1 Antecedentes internacionales.....	12
1.2.2 Antecedentes nacionales.....	17
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
1.4 Justificación.....	20
1.5 Hipótesis.....	21
1.5.1 Hipótesis General.....	21
1.5.2 Hipótesis Específicas.....	21
II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Marco teórico.....	23
2.1.1 Extracción de Oro.....	23
2.1.2 Métodos de Extracción de Mineral.....	24
2.1.3 Procesos de Cianuración.....	25
2.1.4 Cianuración Química y Electroquímica.....	25
2.1.5 Cianuración con minerales de sulfuro.....	25
2.1.6 Contaminación por Cianuro.....	26
2.1.7 Cianuro en procesos de lixiviación.....	26
2.1.8 Cianuro.....	27
2.1.9 Fuentes de Cianuro.....	28
2.1.10 Clasificación del Cianuro.....	28
2.1.11 Métodos oxidativos para la reducción de cianuro.....	30
2.1.12 Tratamiento con Ozono.....	30
2.1.13 El ozono.....	32

2.1.14 Propiedades Fisicoquímicas del ozono.....	33
2.1.15 Cuenca Camaná	34
2.2 Marco Conceptual.....	36
2.3 Marco Legal.....	36
III. MÉTODO	40
3.1 Tipo de Investigación.....	40
3.2 Ámbito temporal y espacial	40
3.2.1 Ámbito temporal.....	40
3.2.2 Ámbito espacial	40
3.3 Variables.....	40
3.3.1 Variable Independiente.....	40
3.3.2 Variable Dependiente	41
3.4 Población y muestra.....	43
3.4.1 Población... ..	43
3.4.2 Muestra.....	43
3.5 Instrumentos.....	43
3.5.1 Técnicas	43
3.5.2 Instrumentos.	43
3.5.3 Equipos	43
3.6 Procedimientos.....	44
3.6.1 Toma de muestras de campo y caracterización	44
3.6.2 Ensayo de pruebas de jarra	45
3.6.3 Determinación Final del Cianuro Total	46
3.7 Análisis de Datos	48
IV. RESULTADOS	49
4.1 Concentraciones residuales de Cianuro Total por oxidación con Ozono	49
4.2 Correlación entre las dosis de Ozono y concentración de Cianuro Total.....	55
4.3 Resultados de eficiencias en el tratamiento de Cianuro Total con Ozono.....	61
4.4 Resultados del Análisis estadístico	65
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	76
VI. CONCLUSIONES	79
VII. RECOMENDACIONES	80
VIII. REFERENCIAS.....	81
IX. ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnología de Extracción de Oro.....	23
Tabla 2. Métodos de Extracción del Mineral.....	24
Tabla 3. Clasificación del Cianuro.....	30
Tabla 4. ECA para Cianuro.....	38
Tabla 5. Límite Máximo Permisible para Cianuro Total.....	39
Tabla 6. Operacionalización de Variables de Investigación.....	42
Tabla 7. Características fisicoquímicas de Agua Residual Cianurada.....	49
Tabla 8. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 2.63 mg O ₃ /l.....	50
Tabla 9. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 7.03 mg O ₃ /l.....	51
Tabla 10. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 8.59 mg O ₃ /l.....	52
Tabla 11. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 13.0 mg O ₃ /l.....	53
Tabla 12. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 19.0 mg O ₃ /l.....	54
Tabla 13. Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 24.5 mg O ₃ /l.....	55
Tabla 14. Eficiencias del primer tratamiento para remoción de Cianuro Total con 2.63 mg O ₃ /l.....	62
Tabla 15. Eficiencias del segundo tratamiento para remoción de Cianuro Total con 7.03 mg O ₃ /l.....	62
Tabla 16. Eficiencias del tercer tratamiento para remoción de Cianuro Total con 8.59 mg O ₃ /l.....	63
Tabla 17. Eficiencias del cuarto tratamiento para remoción de Cianuro Total con 13.0 mg O ₃ /l.....	64
Tabla 18. Eficiencias del quinto tratamiento para remoción de Cianuro Total con 19.0 mg O ₃ /l.....	64
Tabla 19. Eficiencias del sexto tratamiento para remoción de Cianuro Total con 24.5 mg O ₃ /l.....	65
Tabla 20. Agrupación de datos obtenidos de la aplicación de la remoción de cianuro total por	

oxidación por ozono en efluentes mineros.....	66
Tabla 21. Prueba de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Eficiencias de Remoción).....	70
Tabla 22. Prueba de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Concentraciones Finales).....	71
Tabla 23. Tratamiento óptimo verificado estadísticamente para remover cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros.....	74
Tabla 24. Contrastación de Hipótesis de la Investigación.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Cuenca Camaná.....	35
Figura 2. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 2.63 mg O ₃ /l.....	56
Figura 3. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 7.03 mg O ₃ /l.....	57
Figura 4. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 8.59 mg O ₃ /l.....	58
Figura 5. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 13.0 mg O ₃ /l.....	59
Figura 6. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 19.0 mg O ₃ /l.....	60
Figura 7. Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 24.5 mg O ₃ /l.....	61
Figura 8. Resultados de aplicación de prueba de distribución de datos en la investigación para remover cianuro total en base a oxidación por ozono.....	69
Figura 9. Grafica de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Eficiencias de Remoción).....	72
Figura 10. Grafica de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Concentración Final).....	73

RESUMEN

La explotación de oro y su procesamiento pueden generar considerables impactos ambientales cuando los efluentes cianurados, producto de sus operaciones mineras no son manejados adecuadamente, en la presente investigación se planteó como objetivo la remoción de concentraciones de cianuro total por procesos de oxidación con ozono en efluentes mineros de extracción de oro. La metodología aplicada consistió en la dosificación de diferentes concentraciones de ozono con 2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O₃/l, trabajadas en jarras de floculación con tiempos de contacto de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos, y por triplicado, hasta alcanzar las mínimas concentraciones de cianuro total por cada tratamiento o dosis aplicada (6 totales). El resultado de la caracterización inicial para cianuro fue de 143.3 mg CN⁻/l, cuya concentración para un tiempo de 30 minutos dejó valores residuales promedios de 82.4, 75.4, 62.3, 40.3, 23.6 y 21.5 mg CN⁻/l respectivamente, alcanzando la dosis de 24.5 mg O₃/l una eficiencia máxima de 85%. En ninguno de los casos se pudo alcanzar o estar por debajo de los niveles establecidos en la normativa nacional (LMP=1.0 mg CN⁻/L). De los ensayos realizados se observa una reducción de las concentraciones residuales de cianuro total al incrementarse gradualmente las concentraciones de ozono y tiempos de contacto, mostrando una relación alta entre la variable dependiente e independiente con un coeficiente de determinación para la mayoría de los tratamientos de ($R^2 \geq 0.9$).

Palabras clave: Ozono, Oxidación de cianuro, efluentes mineros cianurados.

ABSTRACT

Gold exploitation and processing can generate considerable environmental impacts when cyanide effluents, a product of mining operations, are not properly managed. In this research, the objective was to remove total cyanide concentrations by oxidation processes with ozone in mining effluents from gold extraction. The methodology applied consisted of dosing different ozone concentrations with 2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 and 24.5 mg O₃ / l, worked in flocculation jars with contact times of 5, 10, 15, 20 and 30 minutes, and in triplicate, until reaching the minimum concentrations of total cyanide for each treatment or dose applied (6 total). The initial cyanide characterization result was 143.3 mg CN/L, whose concentration for a 30-minute period yielded average residual values of 82.4, 75.4, 62.3, 40.3, 23.6, and 21.5 mg CN/L, respectively. The dose of 24.5 mg O₃/L achieved a maximum efficiency of 85%. In none of the cases were the levels established in national regulations (LMP = 1.0 mg CN/L) reached or fell below. The tests performed showed a reduction in residual total cyanide concentrations with gradual increases in ozone concentrations and contact times, demonstrating a strong relationship between the dependent and independent variables, with a coefficient of determination for most treatments of ($R^2 \geq 0.9$).

Keywords: Ozone, cyanide oxidation, cyanide mining effluents.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen diversas empresas minero metalúrgica que tratan sus efluentes como consecuencia de sus procesos de lixiviación y que emplean el método de detoxificación de cianuro, siendo este un compuesto tóxico presente en aguas residuales del procesamiento de minerales de oro (Fernández, et al. 2021).

La cianuración consiste en la disolución del oro del mineral en una solución alcalina diluida de cianuro; luego el oro se recupera de la solución utilizando carbón activado, zinc o resinas de intercambio iónico, y cantidades importantes de cianuro permanecen en solución en forma de cianuro o como complejos de otros metales. Es difícil establecer el consumo promedio de agua para la operación de las empresas mineras de oro, ya que este depende de diversos factores, como el tipo de mineral, el grado de reciclaje del agua, la tecnología utilizada para la extracción e incluso las características del yacimiento, entre otros; sin embargo, las actividades de minería de oro tienen un impacto ambiental muy fuerte, y la mayoría de estos impactos se deben a las aguas residuales, tanto la calidad como la cantidad son problemáticas a la hora de evaluar el problema de las aguas residuales de la minería aurífera, ya que se generan enormes cantidades de agua contaminada con cianuro, que deben ser tratadas adecuadamente (Morillo et al. 2019).

La minería es uno de los sectores más importantes para la economía peruana; sin embargo, también es una de las fuentes más contaminantes para el medio ambiente, ocasionando una creciente preocupación por la disposición final de estos efluentes, en especial el cianuro, el cual es considerado como uno de los más perjudiciales. Actualmente hay estudios sobre la tratabilidad del cianuro en los relaves, existen diversos procesos de tratamiento conocidos para eliminar el cianuro de las aguas residuales de la minería de oro como son la degradación natural del cianuro (en estanques de relaves), los procesos biológicos, los procesos químicos, la oxidación electrolítica y otros métodos como la evaporación y ozonización

(Capatinta y Cárdenas, 2020).

Estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental Americana (U.S. Environmental Protection Agency) mencionan como posible tratamiento para aguas de desecho que contienen cianuro, el uso de gas ozono para la oxidación del mismo, logrando la oxidación total del cianuro a cianato y a continuación a bicarbonato y nitrógeno. Adicionalmente también indican que los complejos metálicos de cianuro con zinc y plata también son oxidados totalmente por el gas ozono; siendo las variables que afectarían el proceso de degradación de cianuro con ozono serían el pH, la temperatura, concentración de ozono, presencia de tiocianato, y la presencia de metales como el cobre. La ozonización es uno de los procesos empleados para eliminar cianuros de las soluciones provenientes de un procesamiento de minerales auríferos, encontrando que la ozonización simplifica y mejora la rentabilidad eliminando el cianuro hasta en un 98% gracias a su elevado potencial de oxidación (Garza et al. 2023).

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

El cianuro se puede encontrar de forma natural en unas 2000 fuentes (WHO ECEH, 2000). Las principales formas de cianuro producidas por el hombre son gaseosas como el cianuro de hidrógeno (HCN) y cianuro sólido como el sodio o potasio (NaCN o KCN). Los seres humanos están en estrecho contacto con el cianuro en su vida diaria a través de la comida, la bebida, el tabaco, los medicamentos y durante el uso productos que contienen cianuro (U.S. Environmental Protection Agency [USEPA], 1976).

Hace buen tiempo se sabe que el cianuro puede intoxicar el sistema respiratorio e inhibir fuertemente el metabolismo celular y ser altamente tóxico para los animales y seres humanos (Basile et al. 2008), en este sentido muchos países han impuesto normativas estrictas para prevenir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas causada por las descargas

de efluentes cianurados (Bozzini et al. 2011; Dubey y Holmes, 1995).

Existen diversas fuentes de cianuro tanto naturales como artificiales en el ambiente, y las fuentes más importantes de cianuro corresponden a los desechos industriales. Algunas industrias, como la galvanoplastia, de plástico, metalurgia, producción farmacéutica, y revelado fotográfico, descargan aguas residuales que contienen compuestos cianurados (El-Ghaoui, 1982; Osathaphan, 2011). Así tenemos, por ejemplo, los residuos de las operaciones de galvanoplastia contienen entre un 0,5 % y un 20 % cianuro en peso. Los cianuros no se absorben ni se retienen fácilmente en el suelo, por lo que permanecen en la fase acuosa y a menudo forman complejos con otros (Reyes-Cruz, 2005).

Estos residuos surgen también de diferentes industrias de procesos, como los residuos de la fabricación de productos sintéticos, fibra (acrilonitrilo), residuos de conversión de carbón o coquización efluentes (de las industrias siderúrgicas), residuos petroquímicos, y residuos del procesamiento de recursos de metales preciosos mediante cianuración. Todos estos residuos tienen características variadas y son, por lo tanto, sujetos a procesamiento y tratamiento. Las diferentes estrategias dependen de la concentración de cianuros y del caudal del flujo de residuos, por ejemplo, en las operaciones mineras, la cianuración es la predominante, método mediante el cual se recupera el oro y la plata de los minerales. Después de la extracción y recuperación de los metales preciosos, se generan y descargan cantidades sustanciales de cianuro a los relaves, estanques, que crean problemas ambientales debido a la toxicidad de los cianuros. El cianuro existe en tres formas en aguas residuales industriales: cianuro libre tal como cianuro de hidrógeno; cianuro simple tal como cianuro de sodio; cianuros complejos como cianuro de hierro, cianuro de níquel y cianuro de cobre. El cianuro total es la suma de compuestos simples y complejos cianuros, pero excluye los compuestos químicos separados como cianato y tiocianato (Parga et al., 2003).

Debido al uso generalizado de cianuro en la minería operaciones la recuperación y

destrucción del cianuro es importante tanto desde los aspectos ambientales del tratamiento de aguas residuales y efluentes, como en algunos casos, desde los aspectos económicos asociados con el alto consumo del reactivo por el propio proceso. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. ha propuesto un límite de 0,2 mg/l de cianuro en agua potable. Los alemanes y los suizos han fijado su normativa en un límite de 0,01 mg/l de cianuro para aguas superficiales y 0,5 mg/l para alcantarillas (Desai et al., 1998).

En México, la SEMARNAT ha fijado el límite para cianuro en 0,2 mg/l. En vista de estas consideraciones, la recuperación y/o destrucción del cianuro es necesaria para reducir las concentraciones de cianuros por debajo de los límites reglamentarios. Para el caso peruano el LMP establecido para descargas de efluentes minero-metalúrgicos se encuentra en 1.0 mg/l como CN Total en cualquier momento y 0.8 mg/l como promedio anual.

1.1.2 Formulación del Problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cómo es la remoción de Cianuro Total por oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración residual de Cianuro Total removido por oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro?
- ¿Como es la relación entre las dosis de Ozono, los tiempos de contacto y las concentraciones de Cianuro Total presente en los efluentes mineros de extracción de Oro?
- ¿Cuál es la eficiencia oxidativa del Ozono en la remoción de Cianuro en efluentes mineros de extracción de Oro?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes Internacionales

Goyburo et al. (2024), en su artículo científico evaluaron un tratamiento fisicoquímico convencional y un sistema de ósmosis inversa (OI) para efluentes altamente contaminados generados durante la cianuración de oro en el sector minero. Dentro de la metodología empleada se monitorearon el carbono orgánico e inorgánico total, los metales pesados (Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Pb, As total) y el CN total; en el sistema de tratamiento convencional y el producto de permeado de una unidad de OI a escala piloto equipada con una membrana BW30 durante aproximadamente cinco semanas de operación in situ. El proceso de tratamiento convencional redujo sustancialmente la carga de carbono orgánico, sin embargo, resultó ineficaz para reducir las concentraciones de As total y CN total, con niveles que oscilaron entre 0,2 y 0,3 mg/L para As total y 110–1620 mg/L para CN total después del tratamiento, excediendo así los estándares ambientales. En contraste, el tratamiento de ósmosis inversa logró tasas de eliminación de aproximadamente el 99 % para As total y CN total, resultando en concentraciones $<80 \mu\text{g/L}$ para As total y $<0,9 \text{ mg/L}$ para CN total, ambas en cumplimiento con los requisitos regulatorios para la descarga de efluentes. Concluyéndose que la ósmosis inversa a escala piloto es eficiente en la mitigación de efluentes potencialmente tóxicos en la industria minera para promover la producción sostenible.

Liu et al. (2023), en su artículo científico plantearon eliminar el cianuro para lo cual dentro de la metodología combinaron la oxidación con ozono con la oxidación catalítica con carbón activado para tratar sinérgicamente las aguas residuales con complejos de cobre-cianuro, primero emplearon la oxidación con ozono para descomponer el complejo de cobre-cianuro, separar y precipitar los iones de cobre, y oxidar y reducir el contenido de cianuro y DQO; luego el aire y el ozono residual en el gas de cola del reactor de ozonización se utilizaron como agentes oxidantes, y el carbón activado se utilizó como catalizador y adsorbente para

oxidar catalíticamente el cianuro y la DQO, adsorber iones metálicos en las aguas residuales y mejorar la capacidad catalítica del carbón activado para mejorar la eliminación de cianuro. Obteniéndose como resultado que el cianuro, la DQO y el Cu en las aguas residuales tratadas se redujeron a niveles inferiores a 0,2 mg/L, 20 mg/L y 1 mg/L, respectivamente, cumpliendo así con los estándares de calidad ambiental para aguas superficiales. El proceso desarrollado se aplicó para tratar 3000 m³/día de aguas residuales con cianuro y se verificó con éxito el proceso de tratamiento en laboratorio, logrando un tratamiento integral del cianuro y la recuperación eficaz de metales valiosos.

Zhang et al. (2022), en su artículo científico desarrollaron un nuevo método de oxidación ultrasónica mejorada con ozono (US/O₃) para el tratamiento integral de aguas residuales que contienen cianuro, su destrucción y la posterior recuperación de cobre. La tasa de eliminación de cianuro y la tasa de recuperación de cobre alcanzaron el 99.96 % y el 99.3 % en las condiciones óptimas de caudal de ozono de 80 L/h, temperatura de 25 °C, tiempo de reacción de 15 min y densidad de potencia ultrasónica de 80 W/L, respectivamente. El sedimento seco se caracterizó mediante XRD, SEM y análisis del tamaño de partícula; los resultados mostraron que el sedimento seco era escoria de Cu. Los resultados experimentales concordaron con el modelo cinético de pseudo primer orden con constantes de velocidad aparentes de 0,1662 L/(mg·min) y 0,2056 L/(mg·min) para la oxidación con ozono y la oxidación con ozono ultrasónico mejorado (US/O₃), respectivamente. El mecanismo de la oxidación con ozono ultrasónico mejorado se estudió mediante FT-Raman, FT-IR, EPR y cromatografía de gases. Concluyéndose que el proceso de oxidación con ozono ultrasónico mejorado (US/O₃) para el tratamiento de aguas residuales con cianuro se caracteriza por la descomposición rápida y completa del cianuro en las aguas residuales y la recuperación eficiente del valioso elemento cobre.

Das et al. (2021), en su artículo científico, plantearon como objetivo eliminar cianuro, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y cloruro del efluente tratado con oxidación biológica (BOT) de la industria del acero mediante un método integrado de electrocoagulación asistida por ozonización. Dentro de la metodología empleada se tiene que el efluente tratado con oxidación biológica (BOT) obtenido después del proceso del horno de coque se recogió de Tata Steel Ltd. Jamshedpur (India) para realizar los experimentos del presente estudio, siendo las características iniciales de las aguas residuales tratadas con BOT: concentración inicial de cianuro 150 mg/l, DQO 2050 mg/l, DBO: 490 mg/l, Cloruro 1820 mg/l, pH 7.72, conductividad 3.26 mS/cm y TDS: 2670 mg/l. Se utilizó H₂SO₄ puro al 98% y NaOH a 0,1M para ajustar el pH de la solución; los materiales de los electrodos utilizados para los experimentos de electrocoagulación estaban hechos de láminas de aluminio. Los electrodos se limpiaron después de cada experimento con la ayuda de papeles de lija de grano 120 para mantener su eficiencia. Para todos los experimentos se utilizaron productos químicos de grado reactivo analítico (AR) sin ninguna purificación adicional. Luego se utilizó un concentrador de oxígeno (HG 03, Oz-Air, India) junto con el generador de ozono (ISM 10 Oxy EC, Oz-Air, India) para el proceso de ozonización; la tasa de generación de ozono suele oscilar entre 0 y 3 mg/s; se suministró ozono al reactor mediante un rociador para generar microburbujas, el volumen de efluente tomado para cada análisis fue de 1 L, y la capacidad del reactor de vidrio fue de 2 L. El exceso de O₃ se transformó en O₂ con la ayuda de un destructor de ozono (Dest 50, Oz-Air, India). Durante la aplicación de diferentes tasas de generación de ozono, 1,00, 1,11 y 1,33 mg/s, se encontró que los experimentos realizados con una tasa de generación de ozono superior a 1,33 mg/s aumentan significativamente el costo operativo y el consumo de energía para todo el proceso híbrido. Además, los límites permisibles de todos los parámetros tratados se alcanzaron efectivamente con una tasa de generación de ozono de 1,33 mg/s. La eliminación se encontró al prolongar

el proceso de ozonización más allá de 40 minutos. Todo el análisis se realizó a temperatura ambiente. El análisis de la muestra se realizó en un intervalo de 5 min y el cambio en la concentración de los contaminantes se midió con la ayuda de un fotómetro (Palintest; Modelo 7100). La cantidad de generación y consumo de ozono se determinó mediante el método yodométrico como se describe en los Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales. Obteniéndose como resultado que la eficiencia de eliminación de los contaminantes era ineficiente cuando el proceso de electrocoagulación u ozonización se realizaba por separado. Sin embargo, una combinación de ozonización y electrocoagulación brinda resultados óptimos. La tasa de generación de ozono, la densidad de corriente y el tiempo de análisis de la eliminación de contaminantes se analizaron principalmente para el proceso híbrido. Se optimizó la condición de operación experimental y se observó que la tasa de generación de ozono de 1,33 mg/s, el tiempo de ozonización de 40 min, una densidad de corriente de 100 A/m² y el tiempo de electrólisis de 30 min fueron suficientes para reducir la concentración de contaminante por debajo de sus límites permisibles. Concluyéndose que las eficiencias de eliminación del proceso combinado en condiciones óptimas fueron 99,8%, 94,7%, 95% y 46,5% para iones cianuro, DQO, DBO y cloruro, respectivamente.

Goodarzvand et al. (2020), en su artículo plantearon como objetivo estudiar la activación del peroximonosulfato (PMS) en el proceso ultravioleta (UV)/ozono para la degradación del cianuro tóxico a partir de una solución acuosa mediante un método novedoso y simple. Dentro de la metodología empleada la degradación fotocatalítica del cianuro (CN⁻) se llevó a cabo utilizando un fotorreactor de mesa. Así se obtuvo la optimización del proceso UV/ozono para la mayor eliminación de cianuro. El efecto de parámetros como concentración de ozono, concentración de PMS, temperatura, cationes (Cu⁺², Co⁺² y Fe⁺²), concentración de cianuro, aniones (bicarbonato, carbonato, cloruro, nitrito, nitrato y sulfato [SO₄]⁻²) y se investigó la degradación de CN⁻ de captadores (etanol [EtOH], ácido húmico, TBA y NaN₃).

Obteniendo como resultados que la eliminación completa de 50 mg/L de CN se obtuvo en 4 minutos en un proceso de ozono/UV/PMS; la eliminación de cianuro aumentó del 49,3% al 100% al agregar la dosis de persulfato hasta 100 mg/L. El efecto de varios cationes (II) sobre la degradación del cianuro se incrementó en el orden $\text{Cu}^{+2} > \text{Co}^{+2} > \text{Fe}^{+2}$. El radical hidroxilo basado en diferentes inhibidores de radicales como el ácido salicílico demostró ser el principal radical oxidante para la oxidación. Concluyéndose que la aplicación de ozono/UV/PMS para tratar aguas residuales que contienen CN muestra una alta eficiencia de degradación, es así como el sistema ozono/UV/PMS podría ser un proceso para la degradación y desintoxicación del cianuro; ya que este estudio proporcionó un método simple y eficaz para la degradación del CN de una solución acuosa y se aplica para proteger el medio ambiente de una gran cantidad de aguas residuales tóxicas con CN producidas por diferentes procesos industriales.

1.2.2 Antecedentes Nacionales

Alfaro (2024), en su investigación planteó como objetivo reducir el cianuro total del efluente aurífero artesanal de Socorro-Pataz a menos de 1 ppm. Dentro de la metodología empleada se calculó la concentración inicial de cianuro total del efluente el cual fue de 4400 ppm, de esta se obtuvo una muestra de 13 ml y se adicionó 487 ml de agua destilada, obteniendo así 500 ml con una concentración de 113 ppm CN total, luego se realizó los experimentos modificando las concentraciones de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ desde 400, 800, 1600 hasta 2000 ppm, durante 1, 2 y 3 horas, manteniendo constante la velocidad de agitación a 400 RPM, presión 72 PSI y pH entre 11 a 12. Finalmente se logró reducir la concentración de cianuro total del efluente aurífero artesanal a menos de 1 ppm, con 2000 ppm $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ y un tiempo de agitación de 1 h, logrando un porcentaje de remoción del 99.61 %, posteriormente se realizó una regla de proporciones, donde se concluye que la concentración óptima necesaria de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ es de 77 876.1 ppm para reducir 4 400 ppm CN total hasta menos de 1 ppm, logrando así a la disminución del grado de contaminación del efluente cianurado en el medio ambiente.

Huanca y Quispe (2022), en su investigación, plantearon como objetivo establecer el volumen necesario de ozono y el tiempo óptimo para detoxificar a las soluciones cianuradas. El método empleado en esta investigación es de tipo tecnológico - cuantitativo, empleando instrumentos de investigación experimental (máquinas y herramientas), a un nivel descriptivo-correlacional de la causa-efecto. Se procedió a tomar muestras de las relaveras de la mina Santa Rosa, Apurímac para calcular la concentración inicial, luego se realizó el proceso de detoxificación con el ozono en distintos tiempos, a distintas dosis, al finalizar con la ozonificación se llevó a cabo el análisis químico de la muestra mediante el método volumétrico y se calculó la concentración del cianuro mediante el método de las diluciones. Posteriormente se calculó el orden y la constante de la velocidad con el método integral. Finalmente, se obtuvo como resultados que la detoxificación con ozono es eficiente en las diversas muestras experimentadas; a una dosificación al 100% (1000mg/h), lográndose detoxificar de 220.5mg a 2.45mg/l con un rendimiento de 98.9% y con el modelo cinético de orden cero. Concluyéndose que el tiempo requerido para llegar al LMP del cianuro de sodio fue de 2 horas y media, y la cantidad o dosificación de ozono en ese tiempo fue de 2500 mg de O_3 , la detoxificación en el reactor fue más efectiva que la detoxificación en un matraz a mano.

Arias (2022), en su estudio realizado, planteó como objetivo evaluar la remoción de cianuro empleando procesos fisicoquímicos con hipoclorito de sodio en efluentes de galvanizado. Dentro de la metodología empleada se tiene que la investigación fue de tipo aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño experimental; se procedió a realizar la caracterización inicial del efluente encontrando valores que superan los LMP; la experimentación se basó en la evaluación de la variable $NaClO$, el cual se determinó usando 3 concentraciones: 1, 2.5 y 5 % a distintas dosis: 5, 10, 15, 20 y 25 ml, se realizó 3 ensayos para cada concentración y se promedió para tener un valor específico para cada ensayo. Cada prueba se hizo con 1000 ml del efluente. Los resultados obtenidos evidenciaron que la concentración

de cianuro más bajo fue de 0.00 mg/l, con una concentración inicial de cianuro de 682.2 mg/l, a un pH de 13.9 y una dosis de 25 ml de NaClO al 5%. Finalmente, se concluye que según se aumente la dosificación de NaClO en 5, 10, 15, 20 y 25 ml los tratamientos alcanzaran resultados óptimos hasta de 0.00 mg/l del contaminante cianuro.

Cairo y García (2021), en su estudio realizado, plantearon como objetivo remover la concentración de cianuro mediante procesos de oxidación utilizando como oxidante el hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno para el tratamiento de muestras contaminadas a nivel de laboratorio, del mismo modo se planteó determinar las dosis óptimas de remoción considerando 2 tiempos de contacto, de 15 y 30 minutos respectivamente. Dentro del método de estudio se tiene que la investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, y de diseño experimental; posteriormente se procedió a evaluar la dosificación del oxidante peróxido de hidrógeno el cual se evaluó con una concentración patrón de 70 gr/L y dosis de 100, 130, 150, 170 y 200 mg/L, mientras que el oxidante hipoclorito de sodio tuvo una concentración patrón de 100 gr/L y dosis de 20, 30, 40, 50 y 70 mg/L. Obteniéndose que el método empleado de oxidación avanzada es altamente eficiente para reducir cianuro en efluentes, con una remoción de 99.97% a una dosis de 200 mg/L de H₂O₂ y 70 mg/L de NaClO, con un tiempo de contacto de 30 minutos. Concluyéndose que el peróxido de hidrógeno presenta un efecto significativamente elevado para remover cianuro, mientras que el oxidante hipoclorito de sodio no posee un efecto significativo para remover cianuro.

Bonilla y Pérez (2021), en su investigación realizada plantearon como objetivo general: determinar si la ozonificación influye en la reducción de cianuro en los efluentes de la industria galvánica, para lo cual dentro de la metodología se procedió a calcular la concentración de cianuro reducido, se llevaron a cabo experimentos pilotos para ello se instalaron módulos contracorriente conformado por: un reactor, generador de ozono, tanque colector, una bomba sumergible y reductor cinético. La muestra tomada para recircular en el sistema fue de 9 L la

cual fue sometida a flujo constante de ozono de 16.6 mg/min; al mismo tiempo se incorporó dos reductores cinéticos: chapas trituradas y enteras. Para calcular la reducción de cianuro y su eficiencia se llevaron a cabo 3 corridas en 3 intervalos de tiempo; 10 min, 20 min y 30 min. Se obtuvo como resultados que las óptimas condiciones de reducción de cianuro se logran con un tiempo de tratamiento de 30 min, a un pH de 12, siendo las chapas enteras el más eficiente, alcanzando una reducción de 318.5 mg/l de concentración inicial a 224,23 mg/l de cianuro al final. Concluyendo que se puede trabajar con tiempos de reducción mayores a 30 min, considerando una muestra mayor o igual a 9 litros.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Remover las concentraciones de Cianuro Total por procesos de oxidación con ozono en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones residuales de Cianuro Total por oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro.
- Analizar el nivel de relación entre las dosis aplicadas de Ozono, los tiempos de contacto y las concentraciones finales de Cianuro Total presente en los efluentes mineros de extracción de Oro.
- Determinar la eficiencia por procesos de oxidación con Ozono en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro.

1.4 Justificación

Justificación Teórica: Los métodos de oxidación generalmente tienen como propósito el poder cambiar estructuralmente la composición de un elemento o compuesto, haciéndolos por lo general más inocuos para el ambiente, así por ejemplo cuando se trata de desnaturalizar la materia orgánica. El cianuro es un compuesto altamente tóxico capaz de alcanzar un nivel

de mortalidad a bajas concentraciones, asociado principalmente a su alta inestabilidad y fácil capacidad de volatilización que alcanza en muchos casos la formación de ácido cianhídrico, en tal sentido los resultados esperados se sustentan en las formas de removerlo mediante la aplicación de ozono capaz de transformarlo en sustancias más inocuas para el ambiente, este nuevo conocimiento servirá para reafirmar y/o complementar como un aporte y demostrará que se puede utilizar dicho oxidante en el tratamiento de aguas cianuradas.

Justificación Práctica: La presente investigación pretende buscar una solución o forma de tratamiento de aguas cianuradas provenientes de la industria minera, de tal manera que sus descargas resulten inofensivas para el ambiente y la salud de las personas, dicha investigación se sustenta en el uso de un oxidante como el ozono. Los oxidantes por lo general varían en su potencial de oxidación, es así como el ozono puede ayudar debido a su alto poder o potencial oxidativo que posee capaz de poder transformar sustancias recalcitrantes tóxicas en sustancias menos tóxicas para el hombre y el ambiente, logrando de esta manera poder ser aplicada y cuyas descargas no afectaran los recursos hídricos principalmente.

Justificación Metodológica: La investigación plantea desarrollar el tratamiento mediante métodos ya estandarizados basados en la prueba de jarras a nivel de laboratorio, el cual consistirá en la dosificación de diferentes caudales de ozono alimentados por el oxígeno, y a temperatura ambiente, el cual permita posteriormente encontrar las mejores dosis y la óptima, así como las eficiencias de remoción de cianuro. La presente técnica si bien es cierto está estandarizada, los resultados pueden variar según el tipo de efluente, así mismo, otra variable de operación es el reactivo o sustancia utilizada, que también puede variar, es por ello que se pone a disposición el método aplicado para el caso de cianuro a ser validado en caso así se requiera.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

El proceso de oxidación con Ozono permitirá remover el Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- La oxidación con Ozono reduce las concentraciones de Cianuro Total hasta niveles residuales bajos en efluentes mineros de extracción de Oro.
- Las mayores dosis de Ozono y los tiempos de contacto se relacionan directamente con el comportamiento decreciente de Cianuro Total en los efluentes mineros de extracción de Oro.
- La oxidación con Ozono muestra resultados eficientes en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Teorías relacionadas a la investigación

2.1.1 Extracción de Oro

Es la explotación de recursos naturales mediante el aprovechamiento de depósitos superficiales o la excavación del subsuelo, donde se seleccionan minerales como oro, cobre, diamante, arcilla, cemento entre otros, para ser comercializados.

De acuerdo con las tecnologías de extracción empleadas en minería de oro, son clasificadas básicamente en función al lugar donde se encuentra el mineral, es decir, en la superficie a tajo abierto que por lo general son aluviones (depósitos aluviales) y subterráneas que se encuentran en vetas o yacimientos primarios. En la Tabla 1, se ilustra un resumen de las tecnologías (Arias, 2022).

Tabla 1

Tecnología de Extracción de Oro

Tipo	Característica	Tecnología Usada	Proceso
Por aluvión	Debido a procesos geológicos de millones de años, se encuentran depósitos aluviales con minerales de oro.	Motobombas	Concentración gravimétrica (bateo) (muy antiguo)
		Monitoreo de agua para desmorone de Material	Amalgamación (Mercurio) + Sopletes
		Dragas	
		Retroexcavadoras	Destilación (beneficio - separación amalgama)
		Buldóceres	
		Porras (almadanas) - Trituración	Trituración
Trituradoras Mecanizadas	Molienda (Trituración secundaria (molienda))		
Por veta (yacimientos primarios o filón)	El oro suele encontrarse en depósitos subterráneos.	Molino de Pizones	Amalgamación (Mercurio) + Hornos
		Circuitos semi-cerrados con piscinas o tanques de sedimentación	Cianuración (limpieza Hg residual, arenas y lodos)

Nota. Tomado de *Tecnologías de extracción de Oro*, por Saa y Guarnizo, 2022, Universidad de Antioquía.

2.1.2 Métodos de extracción del Mineral

Tabla 2

Métodos de Extracción del Mineral

Métodos de Extracción del Mineral	
Extracción minera de oro por lixiviación con cianuro (proceso MacArthur Forrest)	<p>Es el proceso más efectivo empleado para extraer oro. Es un método desarrollado por MacArthur y los hermanos Forrest, consiste en la capacidad del oro para formar una sal soluble en agua, al combinarse con cianuro de potasio en presencia de oxígeno. El proceso consiste en introducir la fuente mineral (finamente molido) en un tanque de lixiviación y agitarlo en una disolución diluida de cianuro de sodio. La concentración típica del cianuro de sodio está en el rango de 0,01% a 0,10%, es decir entre 100 a 1000 mg/L. La reacción química que describe la extracción del oro del mineral mediante el uso del cianuro es la siguiente:</p> $4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{NaAu}(\text{CN})_2 + \text{NaOH}$ <p>Para optimizar el proceso de lixiviación se debe de maximizar la superficie de contacto mediante una molienda fina. Adicionalmente, al agregar la solución de cianuro es necesaria la agitación mecánica y la inyección de aire, ya que la ecuación química indica que la reacción se encuentra en función del oxígeno disuelto, por lo que se requiere optimizar el contacto de oxígeno en la solución. Para la recuperación del oro, se utiliza principalmente polvo de zinc, conocido como proceso "Merril-Crowe". Se añade ácido concentrado en un digestor para disolver el zinc, liberando el oro. Se agrega cal o soda cáustica para mantener un pH elevado, para evitar la formación de ácido cianhídrico, como medida de seguridad. Adicionalmente también contribuye a sedimentar las partículas del mineral en la solución de lixiviación al concluir la reacción. Después de esta etapa de adsorción, pasa a una etapa de elusión donde se recuperan un concentrado de oro y plata que va a otras etapas de afinación. De la adsorción se obtiene un líquido agotado de oro y plata, pero con alto contenido de cianuro, este es el efluente de esta etapa del proceso adsorción</p>
Lixiviación Bacteriana (Biolixiviación)	<p>Consiste básicamente en el uso de bacterias para la generación del sulfato férrico, que se constituye en el disolvente del sulfuro de cobre. El principio se basa en la utilización de bacterias que oxidan el hierro y bacterias que oxidan el azufre. Estas bacterias utilizan el oxígeno y el carbono de la atmósfera para que mediante su metabolismo generen la oxidación del hierro y el azufre.</p>
Gravimetría	<p>Este método separa los minerales por su peso al colocarlos sobre tres mesas, previamente molidos, que al moverlas sueltan la arena u otro elemento adherido al oro.</p>
Amalgación	<p>El mercurio se usa para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra. El mercurio se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro. Se usan varias técnicas diferentes que liberan distintas cantidades de mercurio.</p>

Nota. Tomado de *Métodos de Extracción del Mineral*, por Serquén, 2020, Universidad

Nacional Pedro Ruiz Gallo.

2.1.3 Procesos de Cianuración

Para Saa y Guarnizo (2022), el proceso de cianuración es el más empleado en la industria extractora de minerales como el oro y plata, para este proceso se requiere oxígeno el cual está disponible en el ambiente y actúa como oxidante y al ion CN^- como agente complejante, en este método el oro y la plata se separan y disuelvan en solución acuosa de cianuro de sodio o potasio, para mejor facilidad, logrando así condiciones oxidantes favorables. Este método para extraer mineral produce una solución líquida de oro que luego se filtra mediante celdas de lixiviación, se transporta a las otras celdas, para evitar la contaminación de los efluentes, finalmente el oro se extrae de la solución y el sobrante de la mezcla se descarga a la fuente hídrica con tratamiento previo para reducir la sustancia cargada con cianuro. En esta sustancia se encuentra el cianuro de distintas maneras como: cianuro libre (CN^-) y los complejos cianurados metálicos del cobre y zinc, que constituyen el cianuro débilmente disociable en ácido (CN WAD). Estos complejos son elevadamente tóxicos para los animales, plantas y para la humanidad.

2.1.4 Cianuración Química y Electroquímica

La cianuración o disolución de oro se define por la reacción química denominada ecuación de Elsner ($4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 4\text{NaOH}$), y representa una reacción electroquímica (zona catódica), mientras los iones del metal son acomplejados en la zona anódica, generando el complejo soluble tetracianoaurato. Según esta reacción, cuando hay bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende directamente de este parámetro. A elevadas concentraciones, la velocidad de disolución depende del oxígeno (Saa y Guarnizo, 2022)

2.1.5 Cianuración con Minerales de Sulfuro

La adición de minerales de sulfuro como el rejalgar (ácido acetilsalicílico o aspirina, AsS), la pirrotita (Sulfuro Ferroso, FeS), la calcopirita (Sulfuro de Cobre y Hierro, CuFeS_2),

la pirita (Sulfuro de Hierro, FeS_2) y la Arsenopirita (Sulfuro de Hierro y Arsénico, FeAsS), en el proceso de cianuración de oro, ocasionaron reducciones significativas en el proceso. Los impactos negativos se generaron en el orden: rejalgar>pirrotita>calcopirita.

Mientras que el azufre lixiviado al disolver arsenopirita y pirita originó una capa parcial de sulfuro en las superficies de oro expuestas. Con los grandes tiempos de cianuración o concentraciones elevadas de los minerales agregados se encontró que la arsenopirita y la pirita son perjudiciales para la lixiviación de oro. La adición de nitrato de plomo ocasiona una aceleración significativa en la disolución del oro, aún en presencia de concentraciones elevadas de rejalgar, pirrotita y calcopirita. Aunque al agregar oxígeno se mejora efectivamente la lixiviación en presencia de minerales sulfurados, no reemplaza al nitrato de plomo en términos de eficiencia. El oxígeno mostró ser ineficiente para mejorar la lixiviación de oro en presencia de rejalgar (Saa y Guarnizo, 2022)

2.1.6 Contaminación por Cianuro

Los compuestos de CN se encuentran presentes en concentraciones cuantificables en aguas continentales no contaminadas, sin embargo, también puede estar presente en aguas residuales industriales en niveles de hasta 10.000000 veces mayores que en la naturaleza. Es así como la minería aurífera se considera la actividad de máxima incidencia de cianuro, puesto que es a sus alrededores existe mayor contaminación producido por descargas de efluentes cianurados al medio ambiente, esta actividad ha tenido diversos accidentes de impactos significativos en los ecosistemas, alterando regiones aledañas hasta los 2000 km de los lugares donde se han producido estos accidentes (Bonilla y Pérez, 2021, p.23).

2.1.7 Cianuro en procesos de Lixiviación

El CN^- es un anión que se combina con diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Es venenoso y actúa de forma rápida sobre el sistema respiratorio es sumamente peligroso en dosis superiores a 0.02 ppm. El cianuro es un componente primordial empleado en industrias

químicas en la lixiviación del oro y plata. El aumento de actividades mineras y la problemática de los impactos ambientales ocasionan un interés para desarrollar nuevos procesos de tratamiento de efluentes mineros, hoy en día hay diversos procesos de tratamientos químicos, físicos y biológicos para la remoción o recuperación de metales, cianuros y otros subproductos de los procesos. Es así que desarrollar un tratamiento eficiente de un efluente metalúrgico involucra conocimientos de los procesos metalúrgicos, de la geoquímica de los minerales, de la hidrología del lugar y de las posibles fuentes de efluentes residuales y sus características; ya que cada tratamiento se basa de cómo la explotación minera influye sobre la cantidad y calidad de efluentes generados y sobre la selección del método de tratamiento.

Las aguas residuales generadas en actividades mineras provenientes de procesos de lixiviación de oro y plata presentan valores elevados de CN^- las cuales generan preocupación por sus efectos dañinos al medio ambiente por lo cual se requiere de tratamientos previos a su descarga (Aroni y Morales, 2023, p. 18).

2.1.8 Cianuro

El cianuro es un compuesto químico que posee C y N. Los compuestos cianurados incluyen sustancias químicas creadas por el ser humano o presentes en el ambiente. Hay más de 2,000 fuentes de cianuro naturales, entre ellos encontramos diversas especies de insectos, artrópodos, bacterias, hongos, algas y plantas. Las formas principales de cianuro generadas por actividades antrópicas son el cianuro de sólido de potasio, el cianuro de hidrógeno gaseoso y el cianuro de sodio. Gracias a su generalidad el cianuro se emplea en la producción de partes metálicas y otros procesos esenciales como fertilizantes, plásticos, herbicidas, entre otros. El C y N que constituyen el cianuro, se encuentran como químicos naturales alrededor de nosotros, los dos se encuentran como moléculas orgánicas que son la base de todas las distintas formas de vida y componen alrededor del 80% del aire que respiramos (Bonilla y Pérez, 2021, p. 19).

El cianuro es llamado compuesto químico inorgánico constituido por un enlace triple

de carbono y nitrógeno, podemos encontrarlo en distintas formas: como gas cianuro de hidrogeno (HCN), en forma de cristales como cianuro de sodio (NaCN), cianuro de potasio (KCN), o cristales incoloros como el cianuro de amonio (NH₄CN). El cianuro es un componente químico altamente toxico, pero primordial en los procesos industriales, aun cuando sus residuos en forma de efluentes representen una amenaza para el ambiente, la fauna, flora y humano (Arias, 2022, p.19)

2.1.9 Fuentes de Cianuro

- **Naturales:** Son una combinación química originada por la acción de una aglicona y la glucosa las cuales al encontrarse expuestas a enzimas presentes en el mismo compuesto se degrada según pasa el tiempo dando origen al cianuro. A pesar de que las divisiones celulares puedan encontrarse separadas si se da la destrucción o degradación de la estructura del componente empieza la hidrólisis terminando con el principio de la generación del cianuro (Bonilla y Pérez, 2021, p. 21).
- **Artificiales:** conociendo la química del cianuro y sumando los avances científicos comprendidos en los siglos XIX y XX, el hombre pudo establecer diversas formas de sintetizar el ácido cianhídrico, esto al corroborar su elevada eficiencia en la producción de obtención de metales nobles y otras actividades económicas orientadas a fibras sintéticas y polímeros. En el rubro metalúrgico este compuesto es primordial para la obtención del oro y plata puesto que al mezclarse con estos elementos en los conocidos baños cianurados son altamente estables para extraerlos, pero también hay que considerar que el cianuro origina otros compuestos producto de la reacción, entre ellos tenemos: cianatos, fulminatos, sulfocianuros y otros que se originan como resultado de la fabricación de fibras sintéticas (Bonilla y Pérez, 2021, p. 21).

2.1.10 Clasificación del Cianuro

- **Cianuro Libre:** Son compuesto de carbón (C) y nitrógeno (N), que se expresan como

(CN⁻) en su forma simple, libres mediante disolución acuosa por la disociación (o ionización) y disolución iniciando como “compuestos cianurados complejos o simples.

El término cianuro libre está limitado por 2 especies, el ion cianuro (CN⁻) y el ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno (HCN) (Huanca y Quispe, 2022, p. 20).

El Cianuro libre es la forma más tóxica del cianuro, posee la forma HCN (aq), un ácido débil, que puede separarse según la reacción: $HCN(ac) \leftrightarrow H^+ + CN^-$. Para valores de pH menores a 9,24, el HCN es la forma dominante de cianuro libre en la solución, mientras que a pH elevados predomina el anión CN⁻ (Bonilla y Pérez, 2021, p. 20)

- **Cianuro Complejo:** El anión CN⁻ puede reaccionar con una gran diversidad de cationes metálicos para generar complejos metal-cianuro. Dichas sustancias aniónicas, se presentan mediante la fórmula $M(CN)_x^{n-}$, donde M representa el catión, x el número de grupos cianuro y n la carga iónica del complejo. La estabilidad de los complejos metal-cianuro es subjetiva y pueden requerir condiciones de pH ácido o alcalino para generar la separación del complejo en un catión y cianuro libre: $M(CN)_x^{n-} \leftrightarrow M^+ + xCN^-$; en base a la fuerza del enlace del ion cianuro y el metal, los complejos metal-cianuro se clasifican en débiles y fuertes. Los complejos que presentan enlaces fuertes son más estables en solución acuosa y se degradan mínima y lentamente (Bonilla y Pérez, 2021, p. 20)
- **Cianuro Total:** Son soluciones acuosas cianuradas, el cianuro total (CN) se encuentra constituido por cianuro libre, cianuros simples y los cianuros complejos; se denomina cianuro total a los compuestos de cianuro presentes en una solución acuosa (soluto y solvente). Por lo general el “cianuro total real” de una solución puede o no coincidir con el “cianuro total”. De manera general la solución está sujeta a la cuantificación del cianuro total por el método analítico empleado para dicha solución (Huanca y Quispe, 2022, p. 20).

Tabla 3*Clasificación del Cianuro*

Clasificación		Compuesto
Cianuro Libre		CN ⁻ , HCN
Cianuro Simples	Fácilmente Soluble	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂
	Cianuros Complejos Débiles	Zn(CN) ₂ ⁻² , Cd(CN) ₃ ⁻²
Cianuros Complejos	Moderadamente Fuertes	Cu(CN) ₂ ⁻¹ , Ni(CN) ₄ ⁻²
	Cianuros Complejos Fuertes	Fe(CN) ₆ ⁻⁴ , Co(CN) ₆ ⁻⁴

Nota. Tomado de *Clasificación del Cianuro*, por Arias, 2022, Universidad Nacional Federico Villarreal.

2.1.11 Métodos Oxidativos para la Reducción del Cianuro

Para eliminar el cianuro, se requieren métodos de oxidación posteriores. La oxidación del cianuro se puede dar empleando métodos catalíticos, químicos, biológicos, electrolíticos, y métodos fotolíticos (Bonilla y Pérez, 2021, p. 27)

La reacción de oxidación química del (CN) por medio de ozono (O₃) puede ejecutarse por procesos de tratamiento con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), por oxidación por cloración alcalina y procesos con SO₂/Aire (aplicados en empresa mineras auríferas). Del mismo modo existen métodos nuevos para tratar el cianuro CN, que emplean otras sustancias oxidantes (Huanca y Quispe, 2022, p. 22).

2.1.12 Tratamiento con Ozono

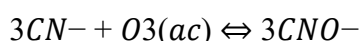
El O₃ es un gran desinfectante, destaca eficientemente en el tratamiento de agua, tanto en la potabilización como en la recuperación de aguas residuales, al ser capaz de descomponer diversos compuestos químicos nocivos. Es así como el ozono es un gran aliado en diversas industrias, puesto que su utilización genera un gran ahorro de agua y una mejora sustancial de las aguas de vertido (Correa y Neyra, 2020, p.20).

El O₃, es un tratamiento eficiente para los efluentes cianuradas. Las ventajas más

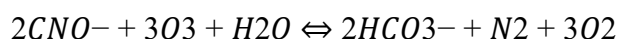
importantes están en función a la velocidad en el proceso que alcanza una completa detoxificación de cianuros, tiocianatos y cianatos. Así mismo se requiere de almacenamiento adecuado de reactivos químicos, y un nivel bajo de producción de residuos químicos tóxicos.

El reactivo para emplear de ozono y oxígeno (con un 3% en volumen) puede generar condiciones oxidantes fuertes si se dosifica en forma de burbujas en soluciones acuosas.

En el uso del método con ozono es muy importante el estudio del efecto de la temperatura, pH, velocidad de agitación y coeficientes de transferencia ya que la oxidación de 1 mol de cianuro es muy veloz y consume 1 mol de O₃ y produce 1 mol de cianato:



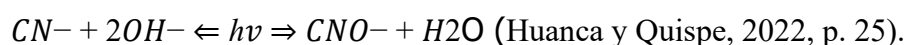
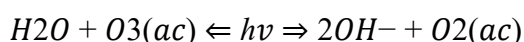
La primera reacción de ozonización simple, libera oxígeno molecular, la segunda, llamada ozonización catalítica, es de gran eficiencia oxidante; después el cianato es oxidado lentamente según la reacción:



La cantidad requerida de O₃ para una completa oxidación del cianuro es de 1.85 gr de Ozono por gramo de CN⁻; actualmente los valores se encuentran en el rango de 3-6 gr de Ozono por gramo de CN⁻.

El pH debe ser estable todo el tratamiento con un control riguroso, puesto que el ozono puede descomponerse por los iones hidronio, por lo que el pH a valores elevados a 11 puede hacer menos eficiente la oxidación.

Antes que se genere la oxidación, se tiene que transmitir el O₃ gaseoso a la solución. Las reacciones producidas por la formación de grupos OH⁻ (hidróxidos) y el ion cianuro son:



Por otro lado, Bonilla y Pérez (2021), indican que el para eliminar el cianuro; el pH, el

tiempo de reacción y la relación O_3/CN^- , son los parámetros primordiales para considerar, ya que la eficacia de reducción es prometedora si se da en concentraciones de ozono elevada, es así como la formación de pequeñas burbujas asegura un mejor rendimiento para el mismo volumen de gas introducido. Por otro lado, se tiene que la oxidación de metal-cianuro débiles de Cd, Cu, Ni, Ag y Zn (WAD) o de los cianuros libres por ozonización requieren condiciones alcalinas (pH 9-11). Es así como la descomposición se da de forma seguida oxidando principalmente el CN dando como resultado el cianato, luego los cianatos se hidrolizan originando bicarbonato y nitrógeno.

2.1.13 El Ozono

El ozono (O_3), es una molécula alotrópica, conformada por 3 átomos de oxígeno (O_2), constituida al disociarse los 2 átomos que componen el gas de oxígeno. Los átomos de oxígeno liberados se adhieren a otra molécula de oxígeno, dando origen a las moléculas de Ozono (O_3) (Huanca y Quispe, 2022, p. 27).

Bonilla y Pérez (2021, p. 34), mencionan que el ozono es una forma alotrópica del oxígeno elemental, constituido por 3 átomos de oxígeno (O_3) su olor es característico ya que para inhalarse se percibe ligeramente picante a 0.08 y 0.1 ppm de concentración. Así mismo indican que el ozono es un oxidante resistente empleado en el tratamiento de aguas y desinfección; puesto que puede reemplazar ocasionalmente al cloro y evita la creación de subproductos clorados no deseados, y el olor remanente; es así que el O_3 puede emplearse para tratar agua potable mejorando el sabor y color, así mismo se utiliza para la purificación del agua de industria farmacéutica en circuitos de agua purificada e industrias electrónicas donde se necesitan estándares óptimos purificación. Pero el O_3 no es estable en agua su vida media oscila entre segundos a horas según sea la pureza del agua.

Desde el punto de vista termodinámico y cinético el O_3 , es un agente con potencial elevado ya que su poder bactericida es mayor a comparación del cloro, y es muy independiente

del pH.

En Europa el O₃ es bastante recurrido en los tratamientos de agua (desinfección, sabor, color hierro y manganeso) gracias a sus propiedades ataca a microorganismos y reduce impurezas químicas; demostrando en diversos estudios que puede eliminar la bacteria E. Coli hasta en un 99,99% a una concentración de 0,010 ppm de ozono libre disponible en menos de 100 segundos (Bonilla y Pérez, 2021, p. 34).

2.1.14 Propiedades Fisicoquímicas del Ozono

El ozono gracias a sus propiedades química resulta ser muy activo y altamente un oxidante fuerte es por ello que se emplea como germicida; por otro lado, disuelto sirve para esterilizar el agua, purificar el aire y realizar reacciones de oxidación en química orgánica.

Se desprende fácilmente en forma de (O₂) a temperaturas que sobrepasan los 100°C y a temperatura ambiente cuando existen catalizadores como el MnO₂. Se sabe que existen 12 ppm de O₃ en la atmósfera lo cual alerta que se debe evitar aniquilar con productos químicos que lo desenvuelve.

El O₃ es un oxidante y ocupa el lugar secundario en el dominio de oxidación luego del flúor (F), se descompone como oxígeno gracias a su característica inestable, motivo por el cual el proceso depende de la concentración del gas y la temperatura. Por lo general cualquier reacción con O₃ es rápida que no deja que ocurra descomposición importante, igualmente hay un factor que permite que el O₃ sea estable, es el pH elevado, característica que posee la mayoría de las reacciones de oxidación en las que influye el O₃.

La propiedad física más importante que posee el O₃ es la solubilidad, la cual facilita la reacción con cianuro en una solución, la solubilidad se reduce cuando la temperatura y el pH del agua aumenta (Huanca y Quispe, 2022, p. 28).

- Ventajas y desventajas de la aplicación del Ozono en la destrucción de Cianuro

Dentro de las ventajas comparativas de la aplicación con Ozono, se sustentan en su

rapidez para destruir compuestos cianurados, sin embargo, los tiempos pueden variar ligeramente. Se puede considerar como un reactivo oxidante que no genera sustancias químicas tóxicas si lo comparamos con otros métodos de tratamiento convencional, el método puede requerir bajo mantenimiento y no requiere necesariamente manejo de agentes químicos peligrosos, siendo a su vez considerado a la larga como un proceso que resulta económico por que los costos se han reducido.

Dentro de las desventajas comparativas podemos indicar que el Ozono es un gas reactivo y corrosivo, por lo que se debe de tener en cuenta los materiales a utilizar que deben ser resistentes, lo cual puede aumentar los costos. En algunos casos los costos de mantenimiento y operación pueden elevarse de acuerdo a su complejidad, así mismo, en concentraciones elevadas a nivel del suelo puede causar irritación del sistema respiratorio, y bajo ciertas condiciones podría generar subproductos dañinos para la salud.

- Costo aproximado de implementación para su aplicabilidad en Planta

Si bien es cierto los costos pueden variar de acuerdo al volumen de efluente generado, para la implementación a mediana escala el equipamiento puede superar los 100 000 dólares.

2.1.15 Cuenca Camaná

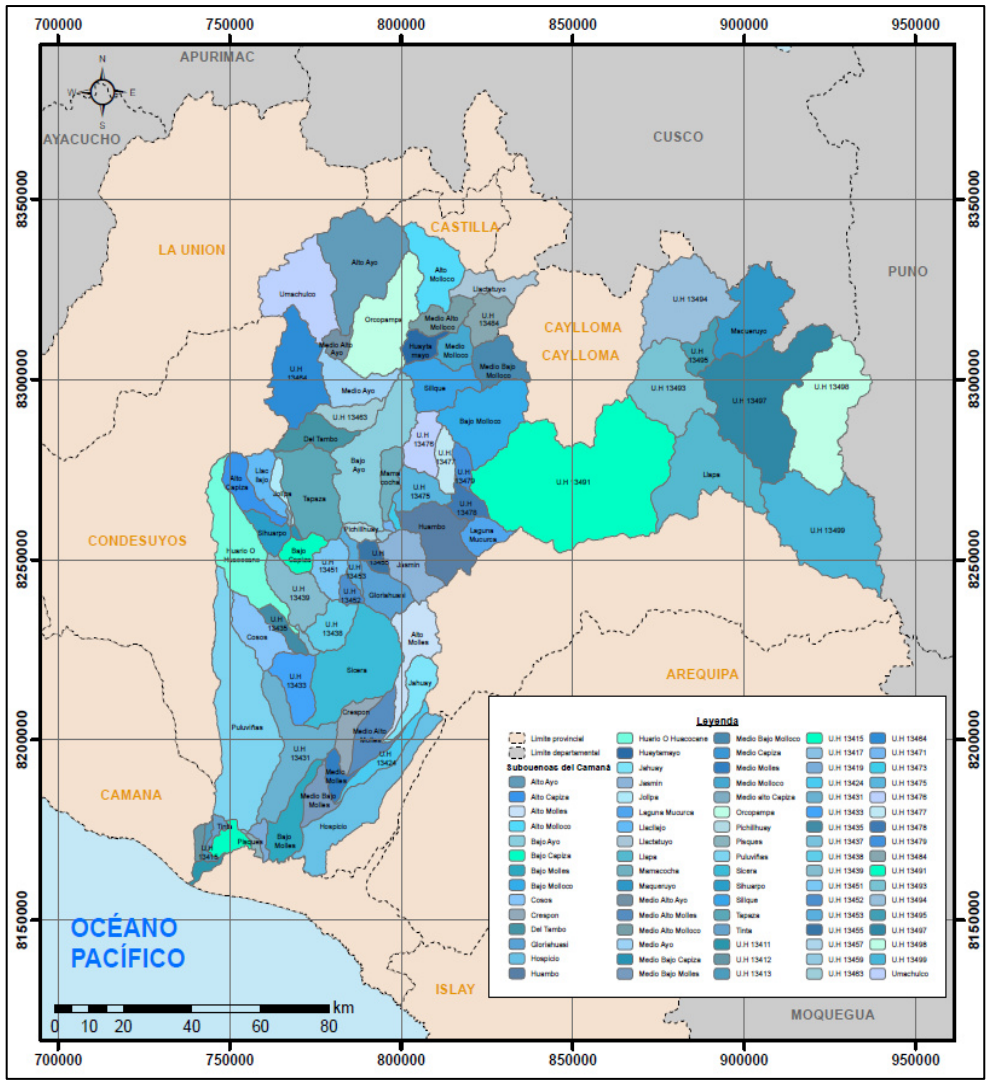
La cuenca del río Camaná, se ubica al Sur del Perú, y su ámbito está comprendido principalmente en el Departamento de Arequipa, e incluye un pequeño sector del Sur del Departamento de Cusco y otro del Oeste del departamento de Puno. La cuenca Camaná tiene una extensión de 17152,73 km² y se encuentra en la vertiente del Pacífico.

La cuenca tiene una población de 94 499 habitantes; siendo la unidad hidrográfica más poblada el Alto Camaná (25,1%), donde destacan los pueblos de Chivay, Cabanaconde, Lari y Coporaque. Las principales actividades económicas son la actividad agropecuaria y acuícola; en la parte alta de la provincia de Castilla destaca la actividad minera; en algunas de las principales minas se explota oro, plata y cobre. En Pampacolca existe antimonio y uranio

radioactivo.

Figura 1

Mapa de Ubicación de la Cuenca Camaná



2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Definición de Términos

- **Cianuro libre:** es un ion de cianuro no complejo (CN-) y cianuro de hidrógeno gaseoso o acuoso (HCN).
- **Detoxificar:** proceso de neutralización y eliminación de sustancias tóxicas dañinos para todos los seres vivos.
- **Ozono:** Molécula triatómica constituida por átomos de oxígeno. Es un alótropo del oxígeno más reactivo que el O₂. Poderoso oxidante que reacciona velozmente con diversos compuestos químicos, inestable a elevadas concentraciones
- **Oxidación:** proceso químico que genera la transformación de un cuerpo como resultado de la acción de oxígeno o de un oxidante, reacción química del oxígeno con una sustancia mineral, con formación de óxidos. El aumento de volumen de los óxidos resultantes puede constituir a la formación de descohesiones y desagregaciones granulares.

2.3 Marco Legal Ambiental

- **Ley N° 29338. Ley de Recursos Hídricos**, tiene por objetivo regularizar el uso y gestión integrada del agua, la participación del Estado y los privados en dicha gestión, rigiéndose con los principios de valoración del agua, participación de los ciudadanos y cultura del agua, respeto de los usos de agua por las comunidades campesinas y nativas, sustentabilidad, descentralización, prevención, eficiencia., gestión integrada y tutela jurídica.
- **Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, D.S. N° 001-2010 - AG**, direccionado a la protección del agua, tiene por objetivo la prevención y deterioro de su calidad; proteger y mejorar los cuerpos naturales y los ecosistemas acuáticos; implantar medidas específicas para minimizar las causas que generan su contaminación y

degradación.

- ***D.L N° 1083-2008-ANA***, promueve el aprovechamiento racional y la conservación de los recursos hídricos motivando el desarrollo de una cultura de uso responsable entre todos los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica, pública o privada. La ANA, fija los parámetros de eficiencia para el aprovechamiento de los recursos hídricos, los cuales son requisitos máximos y mínimos aplicables a cada tipo y forma de uso del recurso.
- ***D.S N° 004-2017-MINAM*** La presente norma establece los Estándares de Calidad Ambiental para caracterizar el cianuro. El cual se caracteriza por clasificar los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos desde un punto de vista del usuario, para lo cual se han generado cuatro categorías principales: I) Poblacional y Recreacional, II) Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales, III) Riego de vegetales y bebida de animales, y IV) Conservación del ambiente acuático. En todas las categorías mencionadas se indican los valores guías para Cianuro Total, Libre y Wad.
- ***D.S. N° 010-2010-MINAM***, establece los Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas. Dicha norma se encarga de reglamentar los diversos parámetros físicos y químicos presentes en los efluentes mineros-metalúrgicos, y muestra como límite al Cianuro Total con un valor de 1.0 ppm en cualquier momento y con 0.8 ppm como promedio anual, en tal sentido estos valores guías ayudan en el control de las descargas hacia los cuerpos receptores.

Tabla 4

ECA para Cianuro

NORMATIVA	APLICACIÓN	VALOR
	Categoría 1: Poblacional y Recreacional	
	Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	A1: Cianuro Total= 0.07 mg/l A2 y A3: Cianuro Libre= 0.2 mg/l
	Subcategoría B: Aguas superficiales destinadas para recreación.	B1 y B2: Cianuro Libre= 0.022 mg/l B1: Cianuro Wad= 0.08 mg/l
	Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales	
D.S N° 004-2017-MINAM (Estándares de Calidad Ambiental para agua)	C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino-costeras	Cianuro Wad= 0.004 mg/l
	C2: Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas marino costeras	
	C4: Extracción y cultivo de de otras especies hidrobiológicas en lagos y lagunas	Cianuro Wad= 0.0052 mg/l
	Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	
	D1: Riego de Vegetales	Cianuro Wad= 0.0052 mg/l
	D2: Bebida de animales	
	Categoría 4: Conservación del ambiente acuático	
	E1: Lagunas y Lagos	Cianuro Libre= 0.0052
	E2: Rios	
	E3: Ecosistemas costeros y marinos	Cianuro Libre= 0.001

Nota. Adaptado del DS N° 004-2017 MINAM, 2017, El Peruano.

Tabla 5*Límite Máximo Permisible para Cianuro Total*

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DESCARGAS DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO- METALÚRGICAS			
Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para 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
Arsenico 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

Nota. Tomado del D.S. N° 010-2010-MINAM, 2010, El Peruano.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

Según Hernández et al. (2016), la presente investigación es de tipo aplicada, por el planteamiento mostrado en la búsqueda de nuevos conocimientos, donde se acude a la información básica ya conocida, con el objeto de aplicarlos en la solución de problemas.

En cuanto al diseño metodológico con enfoque cuantitativo es experimental puro, en el sentido de que se realiza una manipulación intencional de la variable independiente “Aplicación de Ozono”, con el objeto de obtener resultados esperados en el comportamiento de la variable dependiente “Oxidación de Cianuro Total”.

3.2 *Ámbito temporal y espacial*

3.2.1 *Ámbito temporal*

El presente estudio fue desarrollado durante los meses comprendidos entre enero y julio del año 2025, se utilizaron antecedentes bibliográficos comprendidos entre los años 2016 al 2021. La búsqueda de información se inició en el mes de enero como se menciona, y la fase experimental fue desarrollada en los meses de marzo y abril del 2025. La presentación final de la investigación se proyectó entregarlo al término del mes de julio del 2025.

3.2.2 *Ámbito espacial*

El estudio, debido a que es netamente experimental, fue realizado únicamente en el laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal, ubicada en la Av. Oscar Benavides 450, Cercado de Lima. En cuanto al efluente fue recolectado de la cuenca Camaná en la provincia de Castilla, región de Arequipa.

3.3 Variables

3.3.1 Variable Independiente

- Aplicación de Ozono

3.3.2 Variable Dependiente

- Oxidación de Cianuro Total

Tabla 6

Operacionalización de Variables de Investigación

<i>Variables</i>	<i>Definición Conceptual</i>	<i>Definición Operacional</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>
Variable Independiente <i>Aplicación de Ozono</i>	El O ₃ es un desinfectante, destaca eficientemente en el tratamiento de agua, tanto en la potabilización como en la recuperación de aguas residuales, al ser capaz de descomponer diversos compuestos químicos nocivos. El O ₃ , es un tratamiento eficiente para los efluentes cianurados. Las ventajas más importantes están en función a la velocidad en el proceso que alcanza una completa detoxificación de cianuros, tiocianatos y cianatos. Así mismo se requiere de almacenamiento adecuado de reactivos químicos, y un nivel bajo de producción de residuos químicos tóxicos (Correa y Neyra, 2020, p.20).	La aplicación del Ozono será evaluada en función a los factores que influyen en el desarrollo del proceso, entre los cuales se consideran la dosis, el tiempo, la velocidad de agitación y el volumen de muestra. La operación implica el uso de indicadores que serán medidos y manejados de acuerdo con un procedimiento estandarizado pero que a su vez dichos indicadores serán modificados para observar los cambios en la muestra a ser tratada.	OPERACIÓN	Dosis (g) Velocidad de agitación (RPM) Tiempo (minutos) Volumen (ml)
Variable Dependiente <i>Oxidación de Cianuro Total</i>	La oxidación del cianuro se da empleando métodos catalíticos, químicos, biológicos, electrolíticos, y métodos fotolíticos (Bonilla y Pérez, 2021, p. 27). La reacción de oxidación química del (CN) por medio de ozono (O ₃) puede ejecutarse por procesos de tratamiento con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂), por oxidación por cloración alcalina y procesos con SO ₂ /Aire (aplicados en empresa mineras auríferas). Del mismo modo existen métodos nuevos para tratar el cianuro CN, que emplean otras sustancias oxidantes (Huanca y Quispe, 2022, p. 22).	Para evaluar la remoción de Cianuro total se realizará en función a los parámetros fisicoquímicos de Temperatura, pH, Concentración de Cianuro total y Rendimiento. Se tomará en cuenta la concentración inicial de CN- libre, para luego ser sometido a un proceso de tratamiento de oxidación y observar los nuevos niveles alcanzados terminado el tratamiento y determinar los niveles de eficiencia final.	PARAMETROS FISICOQUIMICOS RENDIMIENTO	Temperatura (°C) pH (Unidad de pH) CE (uS/cm) TDS (mg/l) Concentración CN ⁻ Total Eficiencia (%)

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población correspondiente a la investigación es el volumen de efluente sin tratamiento correspondiente a 400 m³ diarios por una Unidad Minera en la Cuenca Camaná.

3.4.2 Muestra

La muestra de agua cianurada considerada para nuestro estudio será de 15 litros por tratamiento, los cuales fueron divididos en seis tratamientos (tiempos: 5, 10, 15, 20 y 30 minutos) y concentraciones de (2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O₃/l), con dos repeticiones adicionales por tratamiento. Cada muestra tuvo un triplicado, haciendo un total de 90 litros.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Técnicas

- Protocolo de toma de muestras.
- Manual de bioseguridad de laboratorio.
- Métodos Estandarizados para análisis de aguas naturales y residuales.

3.5.2 Instrumentos

- Cadena de custodia
- Hojas de seguridad
- Ficha de recolección de datos de laboratorio.
- Ficha de observación

3.5.3 Equipos

- Multiparámetro marca HANNA
- Espectrofotómetro UV-Visible marca THERMO SCIENTIFIC
- Floculador programable marca PHILLIPS
- Balanza Analítica marca OHAUS
- Balón de oxígeno

- Equipo de Ozono

3.6 Procedimientos

El procedimiento para el desarrollo de la investigación tomó en cuenta tres etapas: i) Toma de muestra en campo y caracterización, ii) Ensayos de Pruebas de Jarras, y; iii) Determinación final de Cianuro Total.

3.6.1 Toma de Muestra de Campo y Caracterización

- La toma de muestra se inició con la visita a la cuenca Camaná, provincia Castilla, región de Arequipa ubicada al sur del Perú la cual se encarga de la extracción y procesamiento de Oro. Una vez llegado al lugar indicado, se aplicó el protocolo de monitoreo de toma de muestras de aguas residuales industriales mineras del MINEM.
- Considerando los EPP como mascarilla, guantes de nitrilo, lentes protectores y ropa de seguridad se procedió a llenar en un balde limpio un pequeño volumen de muestra para enjuagar el depósito tres veces, para luego finalmente tomar un volumen mayor y proceder a realizar las mediciones de los parámetros de campo.
- El Multiparámetro fue calibrado previamente para los sensores de pH y Conductividad Eléctrica, y se inició con la medición de la Temperatura. En el caso del pH se realizó la calibración con los Buffer de 4, 7 y 10, luego de ello se lavó el sensor con agua destilada y se procedió a medir la muestra, seguidamente se continuó con la calibración del sensor de Conductividad Eléctrica, para ello se utilizó una solución salina de Cloruro de Sodio Estándar de 1413 uS/cm, terminada la calibración se lavó con agua destilada el sensor y se realizó la medición de la muestra.
- Terminado el paso anterior se procedió a tomar la muestra cianurada mediante un embudo limpio y 9 galoneras de primer uso de aproximadamente 10 litros cada uno, luego de ello se continuó con el rotulado de las muestras en sus respectivos envases para ser posteriormente trasladados a las instalaciones del laboratorio donde se analizó la

concentración de Cianuro Total por espectroscopia UV-Visible.

- Una vez teniendo la muestra en el laboratorio, se determinó la concentración de Cianuro Total por medio del método colorimétrico, se preparó soluciones de Cloramina T al 1%, solución patrón de CN de 1000 mg/l, reactivo de piridina-acido barbitúrico, Fosfato de sodio dihidratado 1M y solución de Hidróxido de Sodio al 1.6 g/l.
- Seguidamente se mezclaron los reactivos antes indicados y se prepararon soluciones estándar para armar la curva de calibrado de 0.0, 1.0, 2.0 y 4.0 ppm, luego las muestras y los estándares fueron medidos en el Espectrofotómetro Visible a una longitud de onda de 578 nm y se cuantificó la concentración de la muestra (Ver ítem 3.6.3).

3.6.2 Ensayo de Prueba de Jarras

- Una vez culminado el acondicionamiento de las muestras en el laboratorio, se procedió a medir un volumen de muestra de 1 litro que contiene la concentración inicial caracterizada de Cianuro Total.
- Las muestras fueron trabajadas en el floculador programable (tres jarras), con una corrida inicial y dos repeticiones finales, para un volumen de 1 litro. Antes de iniciar el tratamiento con el ozono se procedió a verificar que el valor de pH sea superior a 12, un nivel alcalinizado con NaOH, donde luego se procedió a instalar todo el sistema con mangueras finas para la aplicación del ozono y un difusor para burbujas.
- A fin de alcanzar una concentración adecuada de ozono (O_3) se utilizó un balón de oxígeno de 5 Kg y un sistema de transformación de ozono con un difusor final para una aplicación e inyección fina bastante homogénea para cada una de las muestras y con agitación continua.
- Cada una de las muestras fueron tratadas en cinco (5) tiempos diferentes de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos y un pH inicial según su caracterización, cada tiempo fue considerado con seis concentraciones cada uno (2.63, 7.03, 8.59, 13.0, 19.0 y 24.5 mg O_3 /l) y con

dos repeticiones adicionales por tratamiento, haciendo un total de 90 litros.

- La velocidad a tener en cuenta para la agitación del floculador programable fue de 200 RPM, y los tiempos de programación fueron de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos, ya antes indicado. La inyección y flujo de oxígeno fue de $\frac{1}{4}$ L/min y $\frac{3}{4}$ L/min, para un volumen de muestra de 1000 ml.

3.6.3 Determinación Final de Cianuro Total

- La determinación de CN Total se basa en el principio donde el ion Cianuro Total, es convertido a cloruro de cianógeno (CNCl) por reacción con cloramina-T a pH entre 5 y 6. Este compuesto formado, en presencia del reactivo ácido barbitúrico-piridina desarrolla un complejo de coloración rosada que se determina espectrofotométricamente.
- Para la manipulación de reactivos se requirieron túnica, guantes y anteojos de protección.
- Las muestras fueron trabajadas en la campana de extracción por la naturaleza de los reactivos.
- Cada reactivo fue considerado como un peligro potencial para la salud, la exposición a los mismos tuvo que ser minimizada.
- Se tuvo especial consideración con el ácido cianhídrico, ya que en su forma molecular en la que se presenta el ion cianuro, es un gas muy tóxico. La relación CN-/HCN depende del pH, por ello todas las soluciones de cianuro se tuvieron que mantener a pH básico y se manejaron las muestras y estándares con sumo cuidado.
- Así mismo, se tuvo cuidado con el cloruro de cianógeno ya que es un gas altamente tóxico, evitando la inhalación y trabajando en campana durante el desarrollo de color.
- Seguidamente se tuvo que tener en cuenta que la piridina es un reactivo altamente inflamable nocivo por inhalación, en contacto con la piel o ingestión.

- El manejo del ácido clorhídrico es altamente corrosivo, causa quemaduras, irrita el sistema respiratorio por lo que se tuvo que tener en cuenta evitando su inhalación y contacto con la piel, priorizando su adecuado manejo y/o manipulación.
- Se realizó la recolección de la muestra en envase de polietileno de 15 L de capacidad.
- Se procedió a ajustar a $\text{pH} > 9$ inmediatamente luego de extraída la muestra, con NaOH 10 M.
- Se procedió a refrigerar la muestra a $\leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), y se mantuvo en la oscuridad.
- Se recomendó analizar la muestra lo antes posible, como máximo en tiempo recomendado para su análisis en 14 días.

✚ Para la curva de calibrado se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- En matraces aforados de 25 mL se pipeteó 25, 50, 75, 100 y 250 μL de la solución estándar de cianuro de 10 mg/L. Las concentraciones de los estándares quedaron comprendidas en el rango de 0,01 a 0,1 mg/L de CN, realizando siempre un blanco de reactivos.
- Se agregaron 400 μL de hidróxido de sodio 1 M y aproximadamente 10 mL de agua y se procedió a agitar y mezclar, luego se adicionó luego 2 mL del buffer de acetato y 1 mL de cloramina T, se mezcló por inversión 2 veces y dejó reposar exactamente 2 minutos.
- Finalmente, se adicionó 2,5 mL del reactivo ácido barbitúrico-piridina y se llevó a 25 mL con agua, se mezcló por inversión y dejó reposar por 10 minutos previo a la determinación espectrofotométrica, la medición se realizó a 580 nm contra el blanco de reactivos preparado anteriormente, y se procedió a graficar la absorbancia vs concentración de ión cianuro en mg/L.

✚ Para el análisis de la muestra se deberá realizar lo siguiente:

- Se colocó en un matraz aforado de 25 mL una alícuota de la muestra de tal manera que la concentración resultante esté en el rango de medida, es posible que la toma pueda estar comprendida entre 25 μ L y 19 mL.
- Se adicionó 2 mL del buffer de acetato y 1 mL de cloramina-T, se mezclaron por inversión 2 veces y se dejó reposar exactamente 2 minutos.
- Se agregó 2,5 mL del reactivo ácido barbitúrico-piridina y se llevó a 25 mL con agua, se mezcló por inversión y se dejó reposar 10 minutos previo a la determinación espectrofotométrica a una longitud de onda de 580 nm y contra el blanco de reactivos preparado.
- Se corroboró que el pH resultante estuvo comprendido entre 5 y 6, caso contrario tuvo que ser ajustado con hidróxido de sodio 1 M o ácido clorhídrico luego del agregado del buffer.

3.7 Análisis de datos

El análisis de datos para la presente investigación se realizará considerando los niveles de medición de las variables tanto independiente como la dependiente, con el desarrollo de la estadística inferencial se podrá describir las principales características de cada una de las variables de forma individual. Como ya se indicó se llevó a cabo un análisis y caracterización de cada una de las variables, en el cual se utilizó el MINITAB 19; por intermedio del programa en mención se realizó la data estadística descriptiva tabuladas y graficadas; luego de analizar y procesar la información con la distribución de la data y ver la prueba de normalidad, se llevó a cabo una tabulación de datos cuantitativos de cada variable en estudio en una matriz factorial, el cual incluye el análisis de varianza y significancia, para finalizar, se hará la contrastación de las hipótesis de acuerdo a los resultados de la investigación.

IV. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron al término de los ensayos experimentales y en función a los objetivos planteados en el presente estudio. De acuerdo con lo indicado, tenemos en primer lugar los resultados sobre las características fisicoquímicas del agua residual cianurada, en segundo lugar, tenemos las concentraciones residuales de Cianuro Total; y en tercer lugar se muestran las eficiencias de los tratamientos aplicados con Ozono. El tratamiento del agua cianurada fue mediante aplicación de Ozono (O_3), los cuales permitieron mostrar los resultados de las mejores dosis y las eficiencias en cada tratamiento aplicado.

4.1 Concentraciones residuales de Cianuro Total por oxidación con Ozono

En la Tabla 7, mostramos los resultados de las características fisicoquímicas del agua residual cianurada en estudio.

Tabla 7

Características fisicoquímicas de Agua Residual Cianurada

	Parámetros Fisicoquímicos					
	Temperatura (°C)	pH	TDS (g/l)	C.E (mS/cm)	Salinidad (psu)	CN ⁻ Total (mg/l)
Muestra	14.8	8.28	4.65	9.5	5.38	143.3
LMP	-	6-9	-	-	-	1

Cada uno de los parámetros de la Tabla 7, corresponden a T: Temperatura, pH: Potencial de Hidrógenos, TDS: Sólidos Totales Disueltos, CE: Conductividad Eléctrica, S: Salinidad, CN⁻: Cianuro. Los LMP corresponden al D.S N° 010-2010-MINAM.

La concentración de Cianuro Total excede largamente el Límite Máximo Permisible con una concentración de 143.3, el nivel de pH se encuentra dentro de lo permitido con 8.28, mientras que los niveles de Temperatura, TDS, Conductividad Eléctrica y Salinidad no cuentan con LMP de comparación.

A continuación, en las tablas indicadas debajo de cada tratamiento, se muestran los

resultados residuales de Cianuro Total al término del tratamiento de oxidación con Ozono (2.63, 7.03, 8.59, 13.0, 19.0 y 24.5 mg/l), trabajados en medio alcalino e iniciado con 12 de pH, con 3 réplicas para cada concentración y un promedio final para los cálculos por las tres repeticiones.

- Primer Tratamiento con 2.63 mg/l de O₃

Del primer tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 2.63 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 8

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 2.63 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (2.63 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	11.95	11.81	11.65	11.48	11.21
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	122.5	116.8	105.6	90.3	85.2
2	128.9	113.4	98.3	87.3	81.4
3	129.2	110.1	102.5	93.5	80.6
PROMEDIO	126.9	113.4	102.1	90.4	82.4

De la Tabla 8, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido de manera ligera y medianamente con la dosis de 2.63 mg/l de Ozono, así tenemos para los tiempos de 5 y 10 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 126.9 y 113.4 mg/l de Cianuro Total respectivamente, mientras que, para los tiempos de 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 102.1, 90.4 y 82.4 mg/l de Cianuro Total respectivamente.

- **Segundo Tratamiento con 7.03 mg/l de O₃**

Del segundo tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 7.03 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 9

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 7.03 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (7.03 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	11.15	11.03	10.82	10.64	10.41
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	112.5	96.8	89.6	83.3	78.2
2	118.9	93.4	85.3	80.3	72.4
3	109.2	90.1	92.5	77.5	75.6
PROMEDIO	113.5	93.4	89.1	80.4	75.4

De la Tabla 9, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido de manera ligera y medianamente con la dosis de 7.03 mg/l de Ozono, así tenemos para los tiempos de 5 y 10 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 113.4 y 93.4 mg/l de Cianuro Total respectivamente, mientras que, para los tiempos de 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 89.1, 80.4 y 75.4 mg/l de Cianuro Total respectivamente.

- **Tercer Tratamiento con 8.59 mg/l de O₃**

Del tercer tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 8.59 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación

a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 10

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 8.59 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (8.59 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	10.86	10.51	10.32	10.22	10.02
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	101.6	86.7	75.4	70.1	65.3
2	105.7	89.4	78.3	68.7	59.6
3	98.9	92.5	82.2	72.9	62.1
PROMEDIO	102.1	89.5	78.6	70.6	62.3

De la Tabla 10, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido de manera ligera y medianamente con la dosis de 8.59 mg/l de Ozono, así tenemos para los tiempos de 5 y 10 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 102.1 y 89.5 mg/l de Cianuro Total respectivamente, mientras que, para los tiempos de 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 78.6, 70.6 y 62.3 mg/l de Cianuro Total respectivamente.

- Cuarto Tratamiento con 13.0 mg/l de O₃

Del primer tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 13.0 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 11

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 13.0 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (13.0 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	10.91	10.72	10.12	9.75	9.56
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	84.2	73.2	65.5	60.6	43.6
2	78.8	76.5	62.6	54.4	40.8
3	81.5	70.3	59.3	57.8	36.4
PROMEDIO	81.5	73.3	62.5	57.6	40.3

De la Tabla 11, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido medianamente con la dosis de 13.0 mg/l de Ozono, así tenemos para los tiempos de 5 y 10 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 81.5 y 73.3 mg/l de Cianuro Total respectivamente, mientras que, para los tiempos de 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 62.5, 57.6 y 40.3 mg/l de Cianuro Total respectivamente.

- Quinto Tratamiento con 19.0 mg/l de O₃

Del primer tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 19.0 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 12

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 19.0 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (19 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	10.11	9.79	9.52	9.23	9.04
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	60.5	52.7	43.6	33.2	26.8
2	57.0	49.2	40.8	37.6	23.3
3	55.7	45.3	38.4	40.1	20.6
PROMEDIO	57.7	49.1	40.9	37.0	23.6

De la Tabla 12, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido de manera media y considerable con la dosis de 19.0 mg/l de Ozono, así tenemos para los tiempos de 5 y 10 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 57.7 y 49.1 mg/l de Cianuro Total respectivamente, mientras que, para los tiempos de 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedios finales de 40.9, 37.0 y 23.6 mg/l de Cianuro Total respectivamente.

- Sexto Tratamiento con 24.5 mg/l de O₃

Del primer tratamiento, tenemos los resultados del ensayo experimental que fue trabajado con un pH inicial en condiciones alcalinas de 12.0, y concentración de Ozono (O₃) de 24.5 mg/l y tiempos de inyección y contacto de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Con relación a los valores de los parámetros considerados para el ensayo fueron a temperatura ambiente de 24.7° C, 1 l de muestra y 200 rpm de agitación en el Floculador.

Tabla 13

Resultados de las concentraciones residuales de Cianuro Total con 24.5 mg O₃/l

MUESTRA	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (24.5 mg/l)	5	10	15	20	30
pH	10.24	9.78	9.56	9.27	9.08
Concentración inicial (CN ⁻)	143.3 mg/l				
REPETICIONES	Concentración residual de CN⁻ (mg/l)				
1	55.8	44.6	45.3	30.2	24.8
2	52.9	47.3	41.4	32.6	20.9
3	49.5	40.6	38.5	27.7	18.9
PROMEDIO	52.3	44.2	41.7	30.2	21.5

De la Tabla 13, se puede apreciar que las concentraciones de Cianuro Total Inicial (143.3 mg CN⁻/l), se han reducido de manera considerable para la dosis utilizada de 24.5 mg/l de Ozono, así tenemos para todos los tiempos utilizados de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos se alcanzó concentraciones promedio finales de 52.3, 44.2, 41.7, 30.2 y 21.5 mg/l de Cianuro Total respectivamente. Los valores registrados en este último tratamiento muestran que la dosis aplicada de Ozono para este ensayo alcanzó a remover el Cianuro Total hasta los valores residuales más bajos en comparación con los tratamientos anteriores.

4.2 Correlación entre las dosis de Ozono y concentración de Cianuro Total

A continuación, se muestra la correlación entre las dosis de Ozono aplicadas (2.63, 7.03, 8.59, 13.0, 19.0 y 24.5 mg/l) y las concentraciones residuales promedio de Cianuro Total obtenidas entre las tres repeticiones realizadas para cada tratamiento en particular. Se analiza estadísticamente el valor del coeficiente de determinación y apreciar la tendencia asumida por las variables.

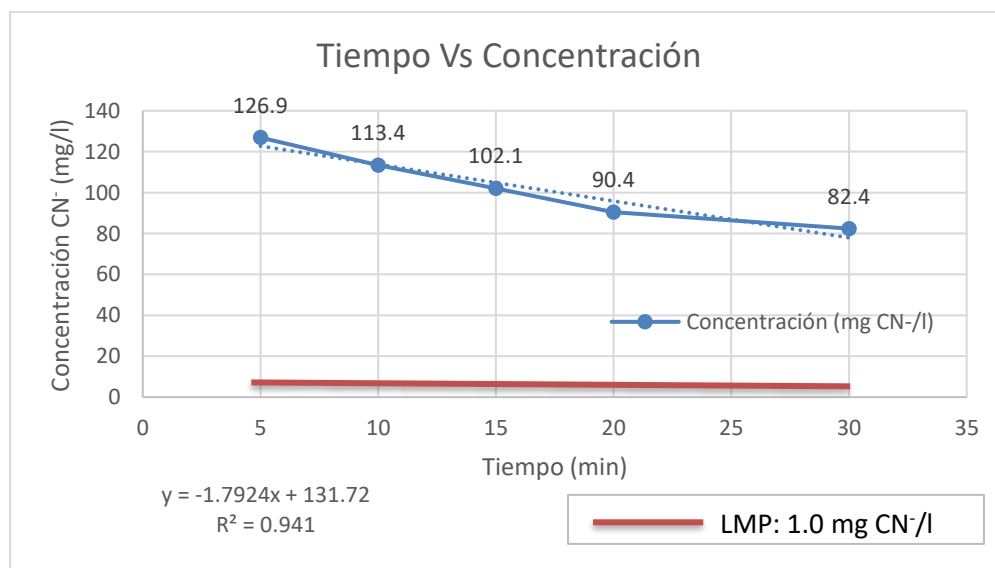
- Comportamiento de CN⁻ Total con la dosis de 2.63 mg/l de O₃

El primer tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 2.63 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de

Cianuro Total.

Figura 2

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 2.63 mg O₃/l



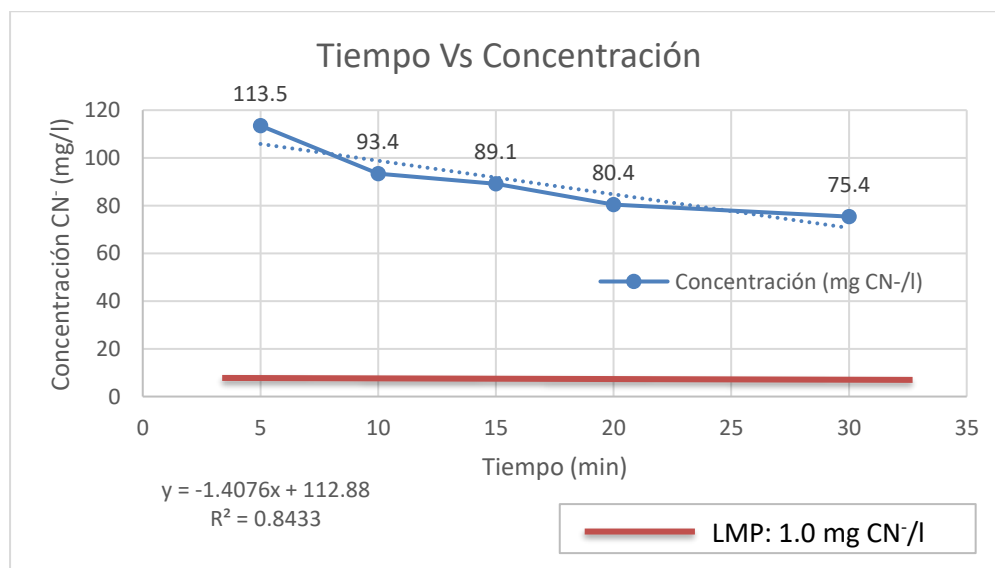
De la figura 2, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 2.63 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 126.9 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 82.4 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación alta ($R^2 \geq 0.9$), el cual puede deberse a la dependencia que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

- Comportamiento del CN⁻ Total con la dosis de 7.03 mg/l de O₃

El segundo tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 7.03 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de Cianuro Total.

Figura 3

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 7.03 mg O₃/l



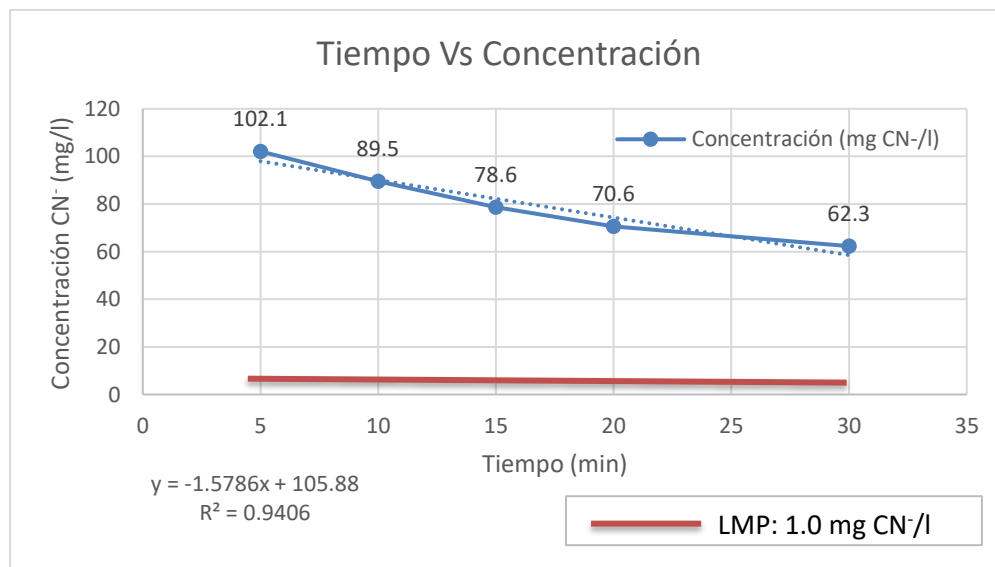
De la figura 3, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 7.03 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 113.5 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 75.4 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación media alta ($R^2 \geq 0.8$), el cual puede deberse a la dependencia media que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

- Comportamiento del CN⁻ Total con la dosis de 8.59 mg/l de O₃

El tercer tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 8.59 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de Cianuro Total.

Figura 4

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 8.59 mg O₃/l



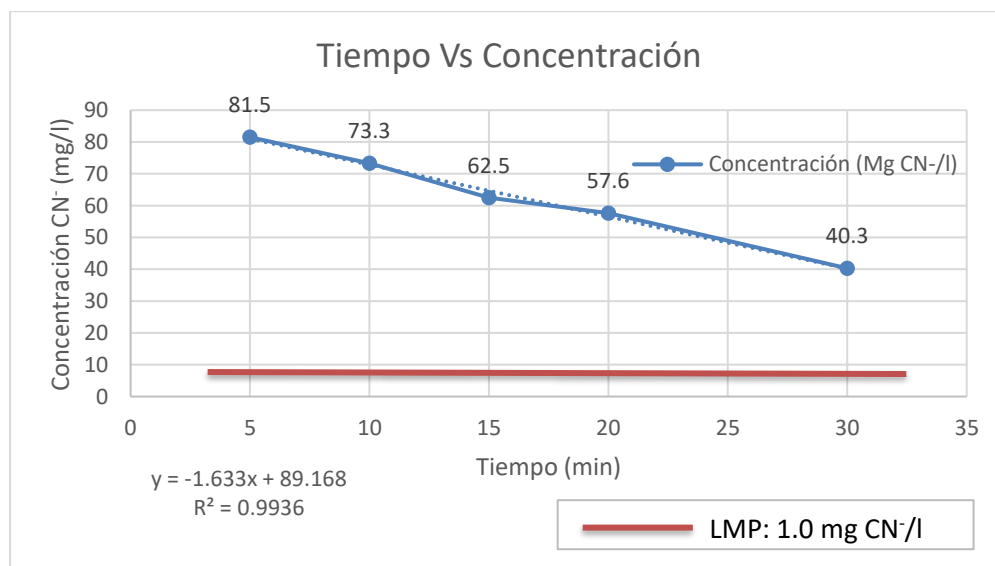
De la figura 4, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 8.59 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 102.1 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 62.3 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación alta ($R^2 \geq 0.9$), el cual puede deberse a la dependencia fuerte que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permissible normado para efluentes minero-metalúrgicos.

- Comportamiento del CN⁻ Total con la dosis de 13.0 mg/l de O₃

El cuarto tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 13.0 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de Cianuro Total.

Figura 5

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 13.0 mg O₃/l



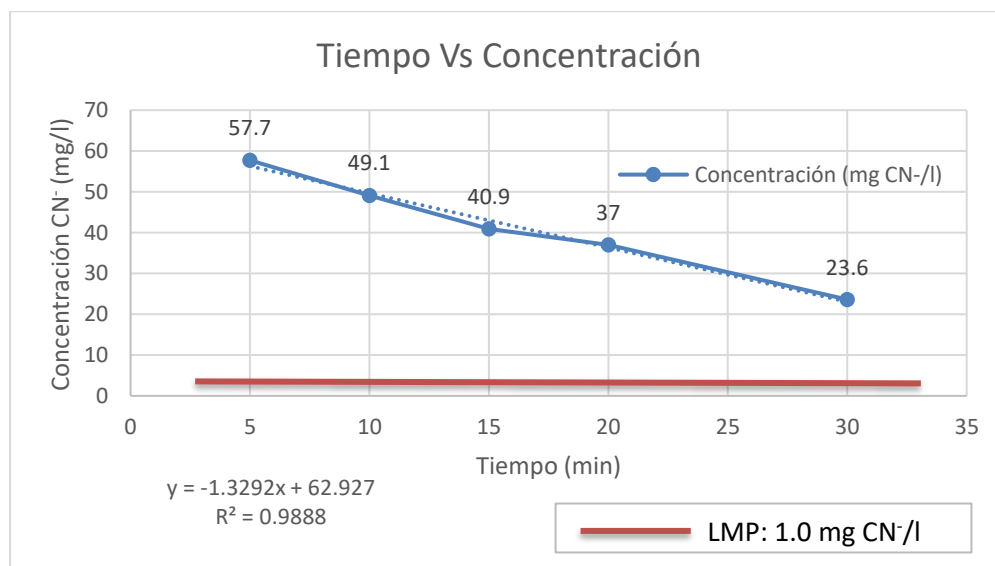
De la figura 5, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 13.0 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 81.5 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 40.3 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación alta ($R^2 \geq 0.9$), el cual puede deberse a la dependencia fuerte que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible normado para efluentes minero-metalúrgicos.

- Comportamiento del CN⁻ Total con la dosis de 19.0 mg/l de O₃

El quinto tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 19.0 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de Cianuro Total.

Figura 6

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 19.0 mg O₃/l



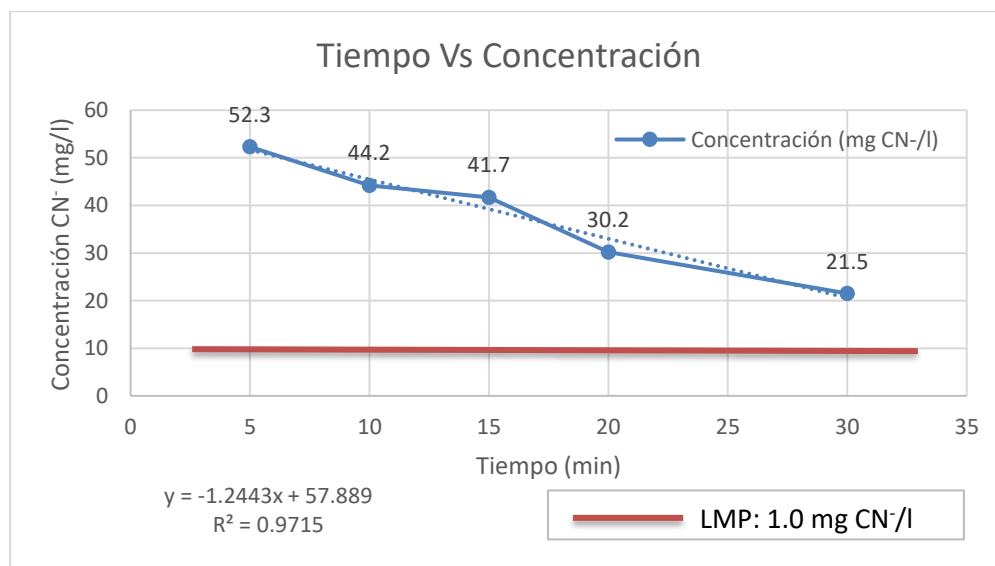
De la figura 6, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 19.0 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 57.7 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 23.6 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación alta ($R^2 \geq 0.9$), el cual puede deberse a la dependencia fuerte que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permissible normado para efluentes minero-metalúrgicos.

- Comportamiento del CN⁻ Total con la dosis de 24.5 mg/l de O₃

El sexto tratamiento se llevó a cabo con la dosis de Ozono de 24.5 mg/l y tiempos de aplicación de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos con la finalidad de observar los valores residuales de Cianuro Total.

Figura 7

Comportamiento de Cianuro Total con dosis de 24.5 mg O₃/l



De la figura 7, podemos apreciar que al utilizar la dosis de 24.5 mg O₃/l, la concentración de Cianuro Total inicial (143.3 mg/l) se va reduciendo ligeramente de acuerdo con los tiempos de contacto, así tenemos, para 5 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 52.3 mg CN⁻/l como nivel más alto, y para el tiempo de 30 minutos de contacto se alcanzó un valor residual de 21.5 mg CN⁻/l como nivel más bajo. Se observa una correlación alta ($R^2 \geq 0.9$), el cual puede deberse a la dependencia fuerte que hay entre ambas variables. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible normado para efluentes minero-metalúrgicos.

4.3 Resultados de las eficiencias en el tratamiento de Cianuro Total con Ozono

Culminado los seis (6) tratamientos se procedió a determinar las eficiencias, en base a las dosis aplicadas del oxidante (O₃) y relacionados con los valores de Cianuro Total inicial y final.

En las Tablas 14, 15, 16, 17, 18 y 19 se muestran los resultados de los seis (6) tratamientos aplicados en la remoción de Cianuro Total, el cual presentó una concentración inicial de 143.3 mg/l y trabajado con un pH de operación de 12.0, en condiciones alcalinas.

- **Eficiencias obtenidas del primer tratamiento con 2.63 mg/l de Ozono**

Tabla 14

Eficiencias del primer tratamiento para remoción de Cianuro Total con 2.63 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (2.63 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN-/l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN- (mg/l)					
[mg CN-/l] Final	126.9	113.4	102.1	90.4	82.4
% Eficiencia	11.5	20.8	28.7	36.9	42.5

De la Tabla 14, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de 2.63 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 82.4 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este primer tratamiento fue de 42.5%.

- **Eficiencias obtenidas del segundo tratamiento con 7.03 mg/l de Ozono**

Tabla 15

Eficiencias del segundo tratamiento para remoción de Cianuro Total con 7.03 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (7.03 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN-/l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN- (mg/l)					
[mg CN-/l] Final	113.5	93.4	89.1	80.4	75.4
% Eficiencia	20.8	34.8	37.8	43.9	47.4

De la Tabla 15, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de

7.03 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 75.4 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este segundo tratamiento fue de 47.4%.

- **Eficiencias obtenidas del tercer tratamiento con 8.59 mg/l de Ozono**

Tabla 16

Eficiencias del tercer tratamiento para remoción de Cianuro Total con 8.59 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (8.59 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN-/l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN- (mg/l)					
[mg CN-/l] Final	102.1	89.5	78.6	70.6	62.3
% Eficiencia	28.8	37.5	45.1	50.8	56.5

De la Tabla 16, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de 8.59 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 62.3 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este tercer tratamiento fue de 56.5%.

- **Eficiencias obtenidas del cuarto tratamiento con 13.0 mg/l de Ozono**

Tabla 17

Eficiencias del cuarto tratamiento para remoción de Cianuro Total con 13.0 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (13.0 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN-/l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN- (mg/l)					
[mg CN-/l] Final	81.5	73.3	62.5	57.6	40.3
% Eficiencia	43.1	48.8	56.4	59.8	71.9

De la Tabla 17, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de 13.0 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 40.3 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este cuarto tratamiento fue de 71.9%.

- **Eficiencias obtenidas del quinto tratamiento con 19.0 mg/l de Ozono**

Tabla 18

Eficiencias del quinto tratamiento para remoción de Cianuro Total con 19.0 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (19 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN-/l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN- (mg/l)					
[mg CN-/l] Final	57.7	49.1	40.9	37.0	23.6
% Eficiencia	59.7	65.8	71.4	74.2	83.6

De la Tabla 18, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de

19.0 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 23.6 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este quinto tratamiento fue de 83.6%.

- **Eficiencias obtenidas del sexto tratamiento con 24.5 mg/l de Ozono**

Tabla 19

Eficiencias del primer tratamiento para remoción de Cianuro Total con 24.5 mg O₃/l

VARIABLES	TIEMPOS (Minutos)				
Dosis O ₃ (24.5 mg/l)	5	10	15	20	30
[mg CN ⁻ /l] Inicial	143.3	143.3	143.3	143.3	143.3
Concentraciones Finales de CN⁻ (mg/l)					
[mg CN ⁻ /l] Final	52.3	44.2	41.7	30.2	21.5
% Eficiencia	63.5	69.2	70.9	78.9	85.0

De la Tabla 19, se puede apreciar que las eficiencias alcanzadas con la aplicación de 24.5 mg/l de Ozono, las concentraciones de Cianuro Total se van reduciendo desde su valor inicial de 143.3 mg/l hasta un valor final de 21.5 mg/l con un tiempo máximo de 30 minutos de aplicación y contacto, del cual se puede finalizar que la máxima eficiencia obtenida para este sexto tratamiento fue de 85.0%.

4.4 Resultados del Análisis Estadístico

Para poder verificar la remoción de cianuro total por oxidación con ozono, se desarrolló una matriz de agrupación de datos la cual integra los tratamientos, las dosis y las concentraciones obtenidas, así como la eficiencia de remoción del tratamiento:

Tabla 20

Agrupación de datos obtenidos de la aplicación de la remoción de cianuro total por oxidación por ozono en efluentes mineros

TRATAMIENTO	DOSIS	REPETICIÓN	CONCENTRACIÓN INICIAL (mg/l)	CONCENTRACIÓN FINAL (mg/l)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)
T1	D1	R1	143.3	122.5	14.515
T1	D1	R2	143.3	128.9	10.049
T1	D1	R3	143.3	129.2	9.839
T1	D2	R1	143.3	116.8	18.493
T1	D2	R2	143.3	113.4	20.865
T1	D2	R3	143.3	110.1	23.168
T1	D3	R1	143.3	105.6	26.308
T1	D3	R2	143.3	98.3	31.403
T1	D3	R3	143.3	102.5	28.472
T1	D4	R1	143.3	90.3	36.985
T1	D4	R2	143.3	87.3	39.079
T1	D4	R3	143.3	93.5	34.752
T1	D5	R1	143.3	85.2	40.544
T1	D5	R2	143.3	81.4	43.196
T1	D5	R3	143.3	80.6	43.754
T2	D1	R1	143.3	101.6	29.100
T2	D1	R2	143.3	105.7	26.239
T2	D1	R3	143.3	98.9	30.984
T2	D2	R1	143.3	86.7	39.498
T2	D2	R2	143.3	89.4	37.613
T2	D2	R3	143.3	92.5	35.450
T2	D3	R1	143.3	75.4	47.383
T2	D3	R2	143.3	78.3	45.359
T2	D3	R3	143.3	82.2	42.638
T2	D4	R1	143.3	70.1	51.082
T2	D4	R2	143.3	68.7	52.059
T2	D4	R3	143.3	72.9	49.128
T2	D5	R1	143.3	65.3	54.431
T2	D5	R2	143.3	59.6	58.409
T2	D5	R3	143.3	62.1	56.664
T3	D1	R1	143.3	84.2	41.242
T3	D1	R2	143.3	78.8	45.010
T3	D1	R3	143.3	81.5	43.126
T3	D2	R1	143.3	73.2	48.918
T3	D2	R2	143.3	76.5	46.615
T3	D2	R3	143.3	70.3	50.942
T3	D3	R1	143.3	65.5	54.292
T3	D3	R2	143.3	62.6	56.315
T3	D3	R3	143.3	59.3	58.618
T3	D4	R1	143.3	60.6	57.711
T3	D4	R2	143.3	54.4	62.038
T3	D4	R3	143.3	57.8	59.665

T3	D5	R1	143.3	43.6	69.574
T3	D5	R2	143.3	40.8	71.528
T3	D5	R3	143.3	36.4	74.599
T4	D1	R1	143.3	112.5	21.493
T4	D1	R2	143.3	118.9	17.027
T4	D1	R3	143.3	109.2	23.796
T4	D2	R1	143.3	96.8	32.449
T4	D2	R2	143.3	93.4	34.822
T4	D2	R3	143.3	90.1	37.125
T4	D3	R1	143.3	89.6	37.474
T4	D3	R2	143.3	85.3	40.475
T4	D3	R3	143.3	92.5	35.450
T4	D4	R1	143.3	83.3	41.870
T4	D4	R2	143.3	80.3	43.964
T4	D4	R3	143.3	77.5	45.918
T4	D5	R1	143.3	78.2	45.429
T4	D5	R2	143.3	72.4	49.477
T4	D5	R3	143.3	75.6	47.244
T5	D1	R1	143.3	60.5	57.781
T5	D1	R2	143.3	57.0	60.223
T5	D1	R3	143.3	55.7	61.130
T5	D2	R1	143.3	52.7	63.224
T5	D2	R2	143.3	49.2	65.666
T5	D2	R3	143.3	45.3	68.388
T5	D3	R1	143.3	43.6	69.574
T5	D3	R2	143.3	40.8	71.528
T5	D3	R3	143.3	38.4	73.203
T5	D4	R1	143.3	33.2	76.832
T5	D4	R2	143.3	37.6	73.761
T5	D4	R3	143.3	40.1	72.017
T5	D5	R1	143.3	26.8	81.298
T5	D5	R2	143.3	23.3	83.740
T5	D5	R3	143.3	20.6	85.625
T6	D1	R1	143.3	55.8	61.061
T6	D1	R2	143.3	52.9	63.084
T6	D1	R3	143.3	49.5	65.457
T6	D2	R1	143.3	44.6	68.876
T6	D2	R2	143.3	47.3	66.992
T6	D2	R3	143.3	40.6	71.668
T6	D3	R1	143.3	45.3	68.388
T6	D3	R2	143.3	41.4	71.110
T6	D3	R3	143.3	38.5	73.133
T6	D4	R1	143.3	30.2	78.925
T6	D4	R2	143.3	32.6	77.251
T6	D4	R3	143.3	27.7	80.670
T6	D5	R1	143.3	24.8	82.694
T6	D5	R2	143.3	20.9	85.415
T6	D5	R3	143.3	18.9	86.811

Nota. Elaboración propia.

Lo cual permite poder agrupar mejor los datos para poder realizar las pruebas inferenciales en la cual se verifica cual es el tratamiento optimo en remover cianuro total aplicando oxidación por ozono.

- **Análisis Estadístico Inferencial**

Después de agrupar los datos de manera tabular se procedió a verificar su verosimilitud estadística para ellos se aplica Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) el cual evaluará la significancia de las dosis aplicadas, así como el tratamiento aplicado dentro de proceso de remoción de cianuro total en base a oxidación por ozono.

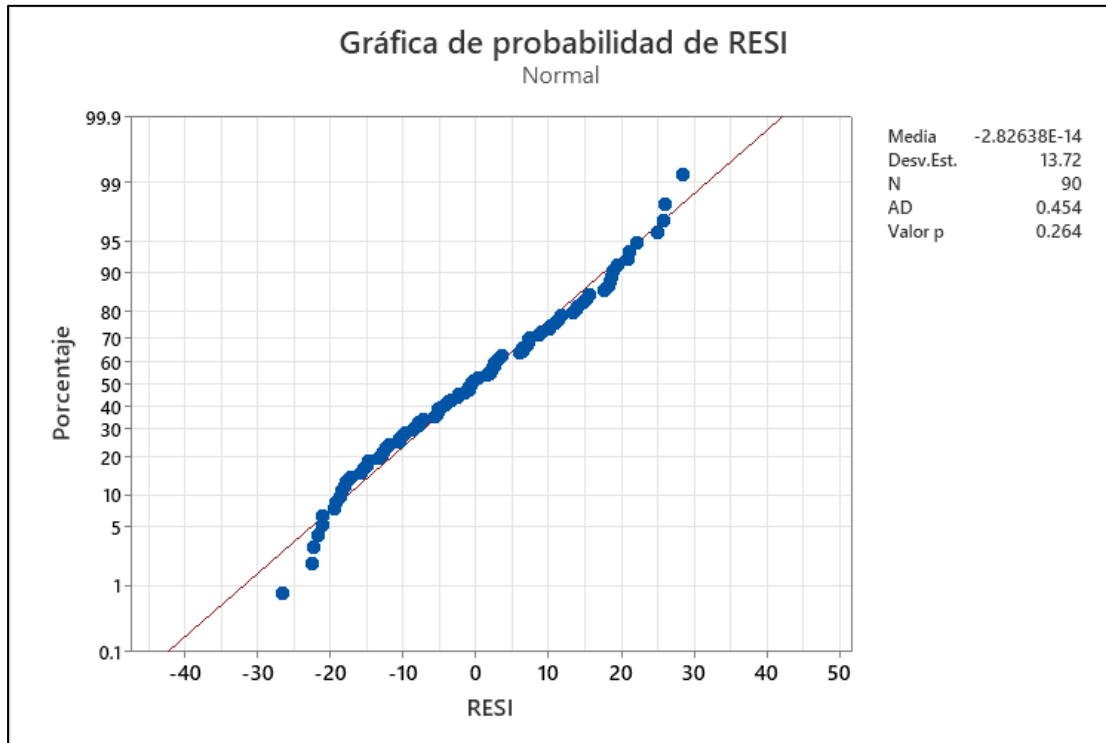
- ✓ Distribución de los errores: Para ello se evalúa la conformación y agrupación de la muestra por residuos para cual se aplica la prueba Anderson-Darling (AD) la cual mide qué tan bien siguen los datos una distribución en particular, para ello se plantean las siguientes hipótesis:

H₀: Los residuos presentan una distribución normal.

H_a: Los residuos no presentan una distribución normal

Figura 8

Resultados de aplicación de prueba de distribución de datos en la investigación para remover cianuro total en base a oxidación por ozono



Nota. Elaborado en MINITAB Versión 19.

Para poder conocer si los datos agrupados presentan o no una distribución normal, podemos inferir que con una significancia del 5% con resultado AD= 0.454 y un p-valor de 0.264 que es mayor a 0.05 de lo que se concluye que los datos presentan una distribución normal.

- ✓ Homogeneidad de Varianzas: Para ello se aplicó la prueba de Bartlett para lo cual se aplican las hipótesis:

H₀: Las Varianzas son iguales.

H_a: Al menos una varianza es diferente.

Obteniendo un indicador de Bartlett de 2.38 y un p-valor = 0.794, por lo cual se acepta la hipótesis nula de lo que se concluye que con una significancia de 5%, que existe estadísticamente igualdad de varianzas en los datos consignados.

- ✓ Verificación estadística de los tratamientos aplicados: Se plantea para ello las siguientes hipótesis:

H₀: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ (No hay diferencia significativa entre los tratamientos)

H_a: Al menos una varianza es diferente (Existen diferencias significativas entre los tratamientos)

De análisis realizado se tiene un indicador $F = 52.53$ y un p -valor = 0.00 que es menor a 0.05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alterna por lo que con una significancia del 5% se puede afirmar que existen diferencias significativas entre los tratamientos al momento de remover cianuro total con oxidación por ozono en efluentes mineros

- ✓ Efectividad de los tratamientos aplicados: Para ellos se aplica la comparación de Tukey teniendo en cuenta los siguientes supuestos:

H₀: $\mu_i = \mu_j$

H_a: $\mu_i \neq \mu_j$

Tabla 21

Prueba de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Eficiencias de Remoción)

Tratamiento	N	Media	Agrupación	
T6	15	73.4357	A	
T5	15	70.9328	A	
T3	15	56.0130	B	
T2	15	43.7358	C	
T4	15	36.9342	C	D
T1	15	28.0949	D	

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Elaborado en MINITAB Versión 22.

Tabla 22

Prueba de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Concentraciones Finales)

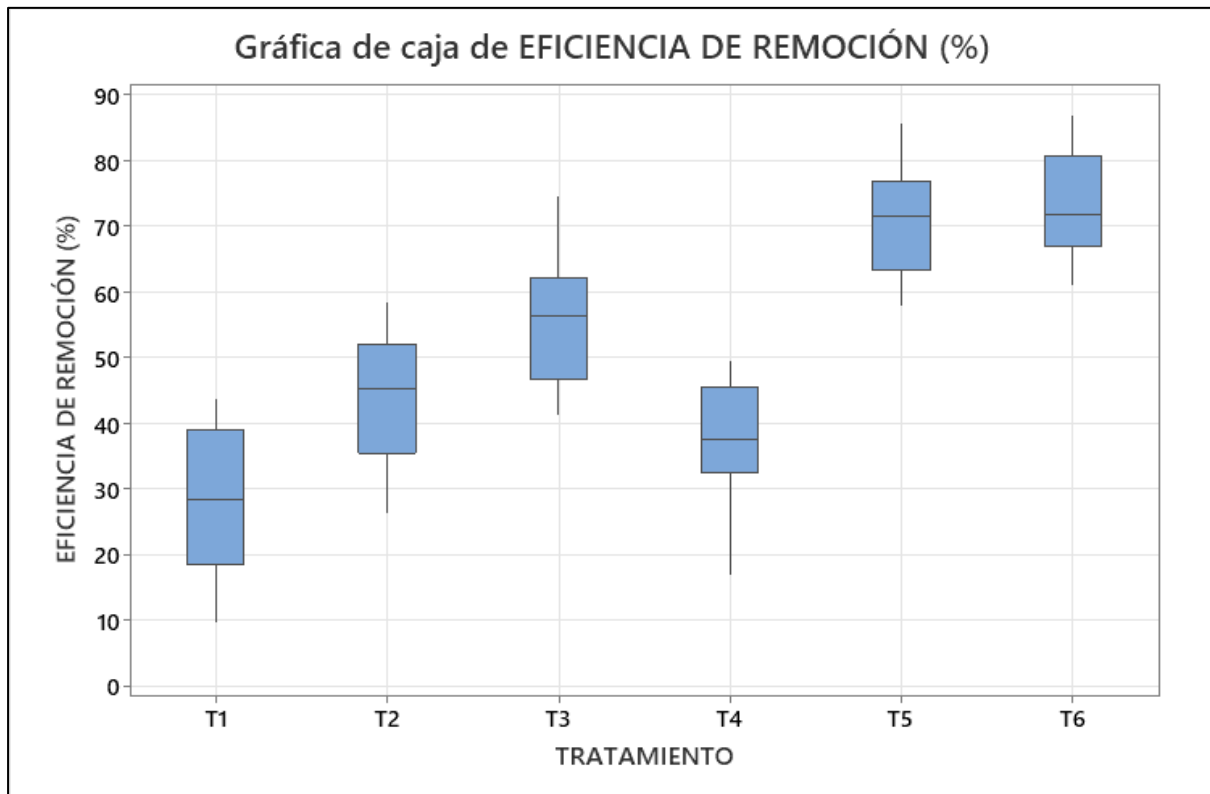
Tratamiento	N	Media	Agrupación	
T1	15	103.040	A	
T4	15	90.373	A	
T2	15	80.627	B	
T3	15	63.033	B	C
T5	15	41.653	D	
T6	15	38.067	D	

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Elaborado en

MINITAB Versión 22

Figura 9

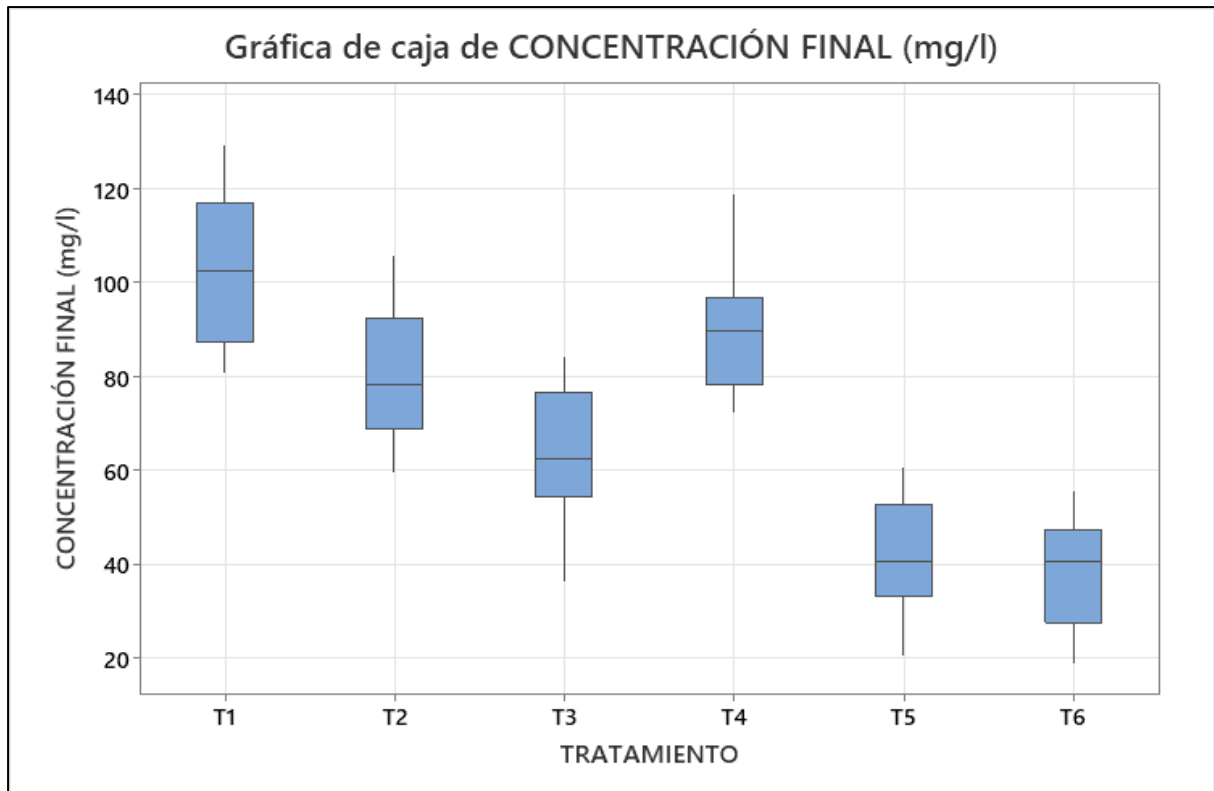
Grafica de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Eficiencias de Remoción)



Nota. Elaborado en MINITAB Versión 22.

Figura 10

Grafica de Comparación Tukey respecto a la remoción de cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros (Concentración Final)



Nota. Elaborado en MINITAB Versión 22

De lo que se desprende que el mayor porcentaje en eficiencia de remoción se presenta en el Tratamiento 6 siendo el más eficiente y presentando menores concentraciones finales de cianuro total por lo cual se desprende que:

Tabla 23

Tratamiento optimo verificado estadísticamente para remover cianuro total por oxidación con ozono en efluentes mineros

Tratamiento en base a la concentración de ozono expuesta	Dosis optima basada en el tiempo de contacto	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Eficiencia de remoción %
T6 Dosis de ozono 24.5 mg/l	D6 Tiempo de contacto 30 minutos	143.3	18.9	86.811

Los resultados que se muestran en la Tabla 23, se verifican en base al análisis de superficies de respuesta y el DCA aplicado en los tratamientos correspondientes

- **Contrastación de Hipótesis**

Tabla 24

Contrastación de Hipótesis de la Investigación

Hipótesis General	Análisis	Contrastación
El proceso de oxidación con Ozono permitirá remover el Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025	Se comprueba con el trabajo realizado que el ozono es eficiente al remover cianuro total con eficiencias mayores al 80%.	Verdadero
Hipótesis Especifica	Análisis	Contrastación
La oxidación con Ozono reduce las concentraciones de Cianuro Total hasta niveles residuales bajos en efluentes mineros de extracción de Oro.	Se comprueba que existe una reducción considerable de 143.3 mg/l a 18.9 mg/l siendo niveles residuales bajos de cianuro total en efluentes mineros de extracción de Oro.	Verdadero
Las mayores dosis aplicadas de Ozono se relacionan directamente con el comportamiento decreciente de Cianuro Total en los efluentes mineros de extracción de Oro.	Se comprueba en la investigación que a mayores dosis aplicadas de ozono menores son la concentración de cianuro total es decir con una dosis de ozono de 24.5 mg/l con tiempo de contacto de 30 minutos se reduce de 143.3 mg/l a 18.9 mg/l, agregando que la dosis de ozono a exponer es la mayor de seis dosis fundamentando el supuesto.	Verdadero
La oxidación con Ozono muestra resultados eficientes en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro.	Se comprueba el supuesto teniendo la eficiencia optima de 86.811% de eficiencia de remoción siendo una eficiencia considerable en el mismo.	Verdadero

Nota. Elaborado en MINITAB Versión 22.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Liu et al. (2023), en su artículo científico plantearon eliminar el cianuro aplicando dentro de su metodología la oxidación con ozono y la oxidación catalítica con carbón activado para tratar sinérgicamente las aguas residuales con complejos de cobre-cianuro, primero emplearon la oxidación con ozono para descomponer el complejo de cobre-cianuro, separar y precipitar los iones de cobre, y oxidar y reducir el contenido de cianuro y DQO; luego el aire y el ozono residual en el gas de cola del reactor de ozonización se utilizaron como agentes oxidantes, y el carbón activado se utilizó como catalizador y adsorbente para oxidar catalíticamente el cianuro y la DQO, adsorber iones metálicos de las aguas residuales y mejorar la capacidad catalítica del carbón activado para mejorar la eliminación de cianuro. Obteniéndose como resultado que el cianuro, la DQO y el Cu en las aguas residuales tratadas se redujeron a niveles inferiores a 0,2 mg/L, 20 mg/L y 1 mg/L, respectivamente, cumpliendo así con los estándares de calidad ambiental para aguas superficiales. El proceso desarrollado se aplicó para tratar 3000 m³/día de aguas residuales con cianuro y se verificó con éxito el proceso de tratamiento en laboratorio, logrando un tratamiento integral del cianuro y la recuperación eficaz de metales valiosos. En la presente investigación de igual forma se trabajó para la destrucción de CN⁻ en efluentes mineros de extracción de oro, con diferentes tiempos (5, 10, 15, 20 y 30 minutos) y diferentes dosis de Ozono (2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O₃/L), obteniéndose para cada una de estas dosis, desde una concentración inicial de 143.3 mg CN⁻/l y en un tiempo de 30 minutos valores de 82.4, 75.4, 62.3, 40.3, 23.6 y 21.5 respectivamente. En ninguno de los casos se pudo alcanzar o estar por debajo de los niveles establecidos en la normativa nacional (LMP=1.0 mg CN⁻/L), esto posiblemente asociado a que no se utilizó dosis mayores o no se complementó con un tratamiento secundario.

Goodarzvand et al. (2020), en su estudio plantearon como objetivo estudiar la activación del peroximonosulfato (PMS) en el proceso ultravioleta (UV)/ozono para la

degradación del cianuro tóxico a partir de una solución acuosa mediante un método novedoso y simple. Dentro de la metodología empleada la degradación fotocatalítica del cianuro (CN^-) se llevó a cabo utilizando un fotorreactor de mesa. Así se obtuvo la optimización del proceso UV/ozono para la mayor eliminación de cianuro. El efecto de parámetros como concentración de ozono, concentración de PMS, temperatura, cationes (Cu^{+2} , Co^{+2} y Fe^{+2}), concentración de cianuro, aniones (bicarbonato, carbonato, cloruro, nitrito, nitrato y sulfato [SO_4^{2-}]) y se investigó la degradación de CN^- de captadores (etanol [EtOH], ácido húmico, TBA y NaN_3). Obteniendo como resultados que la eliminación completa de 50 mg/L de CN se obtuvo en 4 minutos en un proceso de ozono/UV/PMS; la eliminación de cianuro aumentó del 49,3% al 100% al agregar la dosis de persulfato hasta 100 mg/L. El radical hidroxilo basado en diferentes inhibidores de radicales como el ácido salicílico demostró ser el principal radical oxidante para la oxidación. Concluyéndose que la aplicación de Ozono/UV/PMS para tratar aguas residuales que contienen CN muestra una alta eficiencia de degradación, es así como el sistema ozono/UV/PMS podría ser un proceso para la degradación y desintoxicación del cianuro. A diferencia del presente trabajo de investigación que no se realizaron combinaciones de posibles complementos para la destrucción del CN^- , y se trabajó únicamente con Ozono como oxidante de remoción o destrucción, en tal sentido la experimentación partió de una concentración inicial de 143.3 mg/l, obteniéndose como resultado final para la dosis de 24.5 mg O_3 /l en un tiempo de 30 minutos, una concentración final de Cianuro Total de 21.5 mg/l, que a diferencia del trabajo antecedido si llegó a remover el 100% de CN^- , asociado principalmente a los métodos complementarios utilizados.

Bonilla y Pérez (2021), en su investigación realizada plantearon como objetivo general: Determinar si la ozonificación influye en la reducción de cianuro en los efluentes de la industria galvánica, para lo cual dentro de la metodología se procedió a calcular la concentración de cianuro reducido, se llevaron a cabo experimentos pilotos para ello se

instalaron módulos contracorriente conformado por: un reactor, generador de ozono, tanque colector, una bomba sumergible y reductor cinético. La muestra tomada para recircular en el sistema fue de 9 L la cual fue sometida a flujo constante de ozono de 16.6mg/min; al mismo tiempo se incorporó dos reductores cinéticos: chapas trituradas y enteras. Para calcular la reducción de cianuro y su eficiencia se llevaron a cabo 3 corridas en 3 intervalos de tiempo; 10 min, 20 min y 30 min. Se obtuvo como resultados que las óptimas condiciones de reducción de cianuro se logran con un tiempo de tratamiento de 30 min, a un pH de 12, siendo las chapas enteras el más eficiente, alcanzando una reducción de 318.5 mg/l de concentración inicial a 224,23 mg/l de cianuro al final. Concluyendo que se puede trabajar con tiempos de reducción mayores a 30 min, considerando una muestra mayor o igual a 9 litros. En esa misma línea, la presente investigación se trabajó para la destrucción de CN^- en efluentes mineros de extracción de oro, con diferentes tiempos (5, 10, 15, 20 y 30 minutos) y diferentes dosis de Ozono (2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O_3/L), obteniéndose para cada una de estas dosis, desde una concentración inicial de 143.3 mg CN^-/l y en un tiempo de 30 minutos valores residuales de 82.4, 75.4, 62.3, 40.3, 23.6 y 21.5 mg CN^-/l respectivamente. En ninguno de los casos se pudo alcanzar o estar por debajo de los niveles establecidos en la normativa nacional (LMP=1.0 mg CN^-/L).

VI. CONCLUSIONES

- ✓ Las dosis utilizadas de 2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O₃/L, lograron remover el Cianuro Total hasta concentraciones residuales de 82.4, 75.4, 62.3, 40.3, 23.6 y 21.5 mg CN⁻/L, en un tiempo de 30 minutos, con lo cual se concluye que a mayor tiempo de contacto y mayor dosis se logró remover más Cianuro Total.
- ✓ Para todas las dosis aplicadas de Ozono (2.63, 7.03, 8.59, 13, 19 y 24.5 mg O₃/L) con tiempos de contacto de 5, 10, 15, 20 y 30 minutos, se observa una reducción de las concentraciones residuales de Cianuro Total al incrementarse gradualmente los mismos, mostrando una relación alta entre la variable dependiente e independiente con un coeficiente de determinación de ($R^2 \geq 0.9$).
- ✓ Las eficiencias finales registradas para cada uno de los tratamientos aplicados mostraron para la dosis de 2.63 mg O₃/l una eficiencia de 42.5%, para la dosis de 7.03 mg O₃/l una eficiencia de 47.4%, para la dosis de 8.59 mg O₃/l una eficiencia de 56.5%, para la dosis de 13 mg O₃/l una eficiencia de 71.9%, para la dosis de 19 mg O₃/l una eficiencia de 83.6%, para la dosis de 24.5 mg O₃/l una eficiencia de 85%, concluyéndose que este último porcentaje alcanzó el máximo valor para un tiempo de 30 minutos.

VII. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda aplicar el método desarrollado en la presente investigación a fin de que las industrias del rubro minero encargadas de la extracción de oro u otro tipo de actividad generadora de efluentes cianurados reduzcan sus concentraciones hasta niveles manejables e ino cuos, asegurando de esta manera la mayor remoción de Cianuro Total en el ambiente.
- ✓ Es recomendable utilizar otras dosis de Ozono en la destrucción de Cianuro, diferentes a las aplicadas en la presente investigación, de manera que se pueda conocer la concentración máxima necesaria hasta alcanzar el Límite Máximo Permisible normado para efluentes cianurados (D.S N° 010-2010-MINAM).
- ✓ A fin de mejorar la eficiencia de los tratamientos aplicados con Ozono en la destrucción de efluentes cianurados, es recomendable modificar las variables de operación como el volumen de trabajo, el tiempo de contacto, el caudal de flujo del Oxígeno y velocidad de agitación de la muestra.
- ✓ Se recomienda verificar los niveles de pH finales antes de su vertimiento a los cuerpos receptores, los cuales deben cumplir con la normativa correspondiente para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicos, establecido entre 6 y 9, caso contrario se deberá realizar una neutralización previa.
- ✓ Se recomienda realizar una caracterización total de los parámetros fisicoquímicos e inorgánicos del efluente tratado con Ozono en los efluentes cianurados, antes de su vertimiento a los diferentes cuerpos receptores.
- ✓ A fin de mejorar los procesos de eficiencia final se recomienda realizar una evaluación de las ventajas y desventajas del método aplicado teniendo en consideración las características fisicoquímicas del efluente a tratar.

VIII. REFERENCIAS

- Alfaro, R. (2024). *Disminución de la concentración de cianuro total en efluente aurífero artesanal de Socorro-Pataz por oxidación con el método INCO* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional de la UNT. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/57b9bdc4-4d6e-40e4-b02f-4c8dc3682408/content>
- Arias, V. (2022). *Remoción de Cianuro por procesos fisicoquímicos con hipoclorito de sodio en efluentes de Galvanizado, 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional de la UNFV. https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7796/UNFV_FIGAE_Ariaz_Mu%c3%b1oz_Viviana_Mirella_Titulo_profesional_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Aroni, K. y Morales, Y. (2023). *Condiciones óptimas para la Detoxificación de Efluentes Mineros Cianurados* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional de la UNAC. <https://repositorio.unac.edu.pe/item/f97e433e-fd40-412f-a2c1-9b3f5d2e129b>
- Bonilla, E. y Pérez, R. (2021). *Ozonificación de los efluentes de la industria galvánica para la reducción de concentración de cianuro en el distrito de Puente Piedra - Lima* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/81581>
- Basile, L. J., Willson, R. C., Sewell, B. T., & Benedik, M. J. (2008). Genome mining of cyanide-degrading nitrilases from filamentous fungi. *Applied microbiology and biotechnology*, 80, 427-435. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18587571/>
- Bozzini, B., Lacitignola, D., & Sgura, I. (2011). Frequency as the greenest additive for metal plating: mathematical and experimental study of forcing voltage effects on

electrochemical growth dynamics. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(10),4553-4571.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123183489>

Cairo, A. y García, A. (2021). *Remoción de cianuro mediante procesos de oxidación en muestras de agua contaminada a nivel laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71526>

Capatina, F. y Cardenas, A. (2020). *Análisis de los métodos de degradación de cianuro en los relaves generados por las mineras auríferas* [Tesis de pregrado, Universidad Católica San Pablo]. Repositorio Institucional de la UCSP. <https://repositorio.ucsp.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/04600d88-50bd-4a72-80e9-ed0fe9d3a40f/content>

Correa, H. y Neyra, P. (2019). *Cinética de Oxidación del Cianuro Libre en agua por aplicación de ozono* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. Repositorio Institucional de la UPAGU. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/967>

Desai, J.D., Ramakrishna, C., Patel, P.S., Awasthi, S.K. (1998). Cyanide wastewater treatment and commercial applications. *Chemical Engineering World*, 33(6), 115–121.

Dubey, S. K., & Holmes, D. S. (1995). Biological cyanide destruction mediated by microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 11, 257-265.

Da Cruz, A. (2016). *Detoxification of Effluents with Cyanide. Application on a Cyanided Gossan ore* [Tesis de maestría, Universidad de Barcelona]. Repositorio Institucional de la UB. <https://cris.continental.edu.pe/en/publications/detoxification-of-effluents-with-cyanide-application-on-a-cyanide/>

Das, PP, Anweshan, A., Mondal, P., Sinha, A., Biswas, P., Sarkar, S. y Purkait, MK (2021).

- Proceso integrado de electrocoagulación asistida por ozonización para la eliminación de cianuro de aguas residuales de la industria siderúrgica. *Quimiosfera*, 263, 128370. 10.1016/j.chemosphere.2020.12837010.1016/j.quimiosfera.2020.128370
- El-Ghaoui, E. A., Jansson, R. E. W., & Moreland, C. (1982). Application of the trickle tower to problems of pollution control. II. The direct and indirect oxidation of cyanide. *Journal of Applied Electrochemistry*, 12, 69-73.
- Fernández, B., Viña, J., Ayala, J. y Ania, C. (2020). Effectiveness of potassium permanganate for the degradation of cyanide and thiocyanate from mine wastewater. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 37, 109-117. <https://doi.org/10.20937/RICA.53701>
- Garza, M., Carrillo, F., Soria, M. y Picazo, N. (2023). Descomposición de cianuro usando ozono y óxidos de hierro. *Epistemos*, 15(31), 63-69. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i31.202>
- Goodarzvand, Z., Hassani, H., Torabian, A. y Borghei, S.M. (2020). Enhancement of PMS activation in an UV/ozone process for cyanide degradation: a comprehensive study. *Pigment & Resin Technology*, 1-6. 10.1108/prt- 05-2020-0044
- Goyburo, C., Mendez, J., Jiménez, S., Romero, P., Gutierrez L. y Valverde, P. (2024). Pilot-scale reverse osmosis treatment of gold cyanidation effluent for the removal of cyanide, heavy metal (loid)s, and ionic species. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 1-11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424000823>
- Hernández, J. (2019). *Desarrollo del proceso de degradación de cianuro procedente de la lixiviación de plata a partir de oxidación con ozono-cloruro de sodio* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio Institucional de la UAM. <https://zaloamati.azc.uam.mx/items/59b24cee-f445-4fd0-a713-197db230383d>

- Huanca, K. y Quispe, D. (2022). *Detoxificación de soluciones cianuradas en efluentes utilizando el ozono en la Mina Santa Rosa provincia de Grau – Apurímac* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional de la UNSAAC. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6962>
- El-Ghaoui, E. A., Jansson, R. E. W., & Moreland, C. (1982). Application of the trickle tower to problems of pollution control. II. The direct and indirect oxidation of cyanide. *Journal of Applied Electrochemistry*, 12, 69-73.
- Liu, Q., Wang, Q., Wu, Z. y Wang, Q., Sun, Z. y Shi, J. (2023). Research and Engineering for the Synergistic Treatment of Copper-Cyanide Wastewater by Ozone and Activated Carbon Catalytic Oxidation. *Environmental Engineering & Technology eJournal Follow*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4611466
- Morillo, J., Cevallos, N., Sandoval, C., Vargas, P. y Muñoz, F. (2019). Combined treatment using ozone for cyanide removal from wastewater: a comparison. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 459-467. 10.20937/RICA.2019.35.02.16
- Neyra, O., Dimpério, P., Brum, M., Silva, E., Martins, L., Gaspari, F & Swarowsky, A. (2024). Comparación de los métodos para estimar el caudal ecológico en la cuenca Camaná-Majes – Colca - Perú. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 21, 1-14. <https://doi.org/10.21168/reg.v21e2>
- Osathaphan, K., Tiyanont, P., Yngard, R. A., & Sharma, V. K. (2011). Removal of cyanide in Ni (II)–cyanide, Ni (II)–cyanide–EDTA, and electroplating rinse wastewater by ferrate (VI). *Water, Air, & Soil Pollution*, 219, 527-534. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-010-0725-1>
- Parga, J. R., Shukla, S. S., & Carrillo-Pedroza, F. R. (2003). Destruction of cyanide waste solutions using chlorine dioxide, ozone and titania sol. *Waste management*, 23(2), 183-

191. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X02000648>

Reyes-Cruz, V., González, I., & Oropeza, M. T. (2005). Voltammetric evaluation of the electrode material on the oxidation of cyanide catalyzed by copper ions. *Journal of Solid-State Electrochemistry*, 9, 566-573.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-004-0592-z>

Saa, L. y Guarnizo, J. (2022). *Análisis de alternativas para la remoción del cianuro presente en los efluentes de los relaves de minas auríferas*. [Trabajo de monografía como requisito para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua. Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la UdeA.
[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/32427/7/SaaLisethGuarnizoJuan_2022_AlternativasEemoci%
c3%b3nCianuro](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/32427/7/SaaLisethGuarnizoJuan_2022_AlternativasEemoci%c3%b3nCianuro)

Serquén, Y. (2020). *Influencia del ozono y cobre en la degradación del cianuro de los efluentes mineros* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio de la UPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8407>

World Health Organization's Environmental Health Criteria. (2000). Cyanide Use in the Mining Industry. Rome, Italy. <http://www.who.it/docs/Water/cyanmin.html>

U.S Environmental Protection Agency. (1976). The Manufacture and Use of Selected Inorganic Cyanides. EPA 560/6-76-012.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91012GL5.TXT>

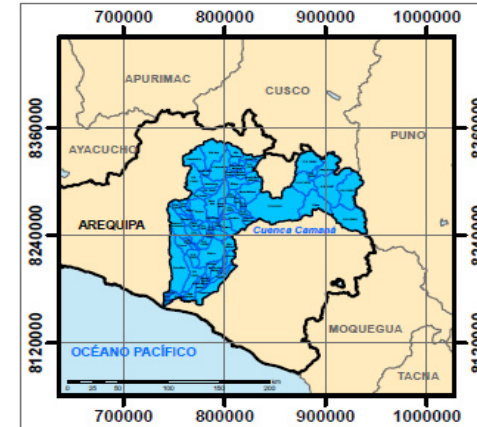
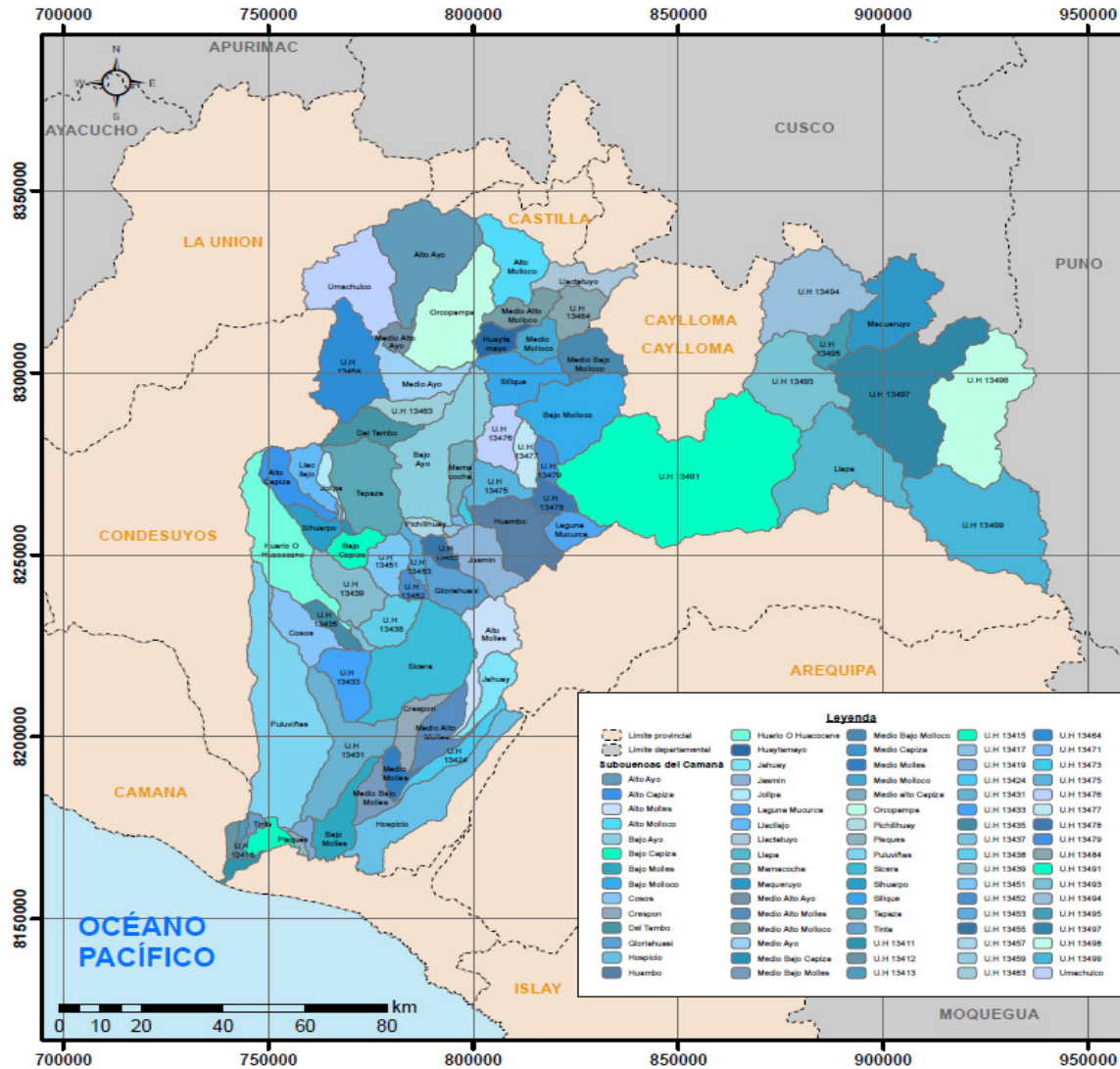
Zhang, H., Zhang, Y., Quiao, T., Hu, S., Liu, J., Zhu, R., Yang, k., Li, S. y Zhang, L. (2022). Study on ultrasonic enhanced ozone oxidation of cyanide-containing wastewater. *Separation and Purification Technology*, 303(22258).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586622018135>

IX. ANEXOS

A. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala			
<p>Problema general ¿Cómo es la remoción de Cianuro Total por oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025?</p> <p>Problemas Específicos 1. ¿Cuál es la concentración residual de Cianuro Total removido por procesos de oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro? 2. ¿Como es la relación entre las dosis de Ozono, los tiempos de contacto y las concentraciones de Cianuro Total presente en efluentes mineros de extracción de Oro? 3. ¿Cuál es la eficiencia oxidativa del Ozono en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro?</p>	<p>Objetivo general Remover las concentraciones de Cianuro Total por procesos de oxidación con ozono en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025.</p> <p>Objetivos Especificos 1. Determinar las concentraciones residuales de Cianuro Total por procesos de oxidación con Ozono en efluentes mineros de extracción de Oro. 2. Analizar el nivel de relación entre las dosis aplicadas de Ozono, los tiempos de contacto y las concentraciones finales de Cianuro Total presente en efluentes mineros de extracción de Oro. 3. Determinar la eficiencia por procesos de oxidación con Ozono en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro.</p>	<p>Hipótesis general El proceso de oxidación con Ozono permitirá remover el Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro, 2025.</p> <p>Hipótesis Especificos 1. La oxidación con Ozono reduce las concentraciones de Cianuro Total hasta niveles residuales bajos en efluentes mineros de extracción de Oro. 2. Las mayores dosis aplicadas de Ozono se relacionan directamente con el comportamiento decreciente de Cianuro Total en los efluentes mineros de extracción de Oro. 3. La oxidación con Ozono muestra resultados eficientes en la remoción de Cianuro Total en efluentes mineros de extracción de Oro.</p>	<p>Variable Independiente:</p>	<p>El O3 es un desinfectante, destaca eficientemente en el tratamiento de agua, tanto en la potabilización como en la recuperación de aguas residuales, al ser capaz de descomponer diversos compuestos químicos nocivos. El O3, es un tratamiento eficiente para los efluentes cianurados. Las ventajas más importantes están en función a la velocidad en el proceso que alcanza una completa detoxificación de cianuros, tiocianatos y cianatos. Así mismo se requiere de almacenamiento adecuado de reactivos químicos, y un nivel bajo de producción de residuos químicos tóxicos (Correa y Neyra, 2020, p.20).</p>	<p>La aplicación del Ozono será evaluada en función a los factores que influyen en el desarrollo del proceso, entre los cuales se consideran la dosis, el tiempo, la velocidad de agitación y el volumen de muestra. La operación implica el uso de indicadores que serán medidos y manejados de acuerdo con un procedimiento estandarizado pero que a su vez dichos indicadores serán modificados para observar los cambios en la muestra a ser tratada.</p>	<p>PARÁMETROS DE CONTROL</p>	Concentración	mg/l			
			Dosis				g				
			Tiempo				minutos				
			Velocidad				RPM				
			Volumen				ml				
			Densidad				g/cm ³				
			<p>Variable Dependiente:</p>				<p>La oxidación del cianuro se da empleando métodos catalíticos, químicos, biológicos, electrolíticos, y métodos fotolíticos (Bonilla y Pérez, 2021, p. 27). La reacción de oxidación química del (CN) por medio de ozono (O3) puede ejecutarse por procesos de tratamiento con peróxido de hidrógeno (H2O2), por oxidación por cloración alcalina y procesos con SO2/Aire (aplicados en empresa mineras auríferas). Del mismo modo existen métodos nuevos para tratar el cianuro CN, que emplean otras sustancias oxidantes (Huanca y Quispe, 2022, p. 22).</p>	<p>Para evaluar la remoción de Cianuro libre se realizará en función a los parámetros fisicoquímicos de Temperatura, pH, Concentración de Cianuro libre y Rendimiento. Se tomará en cuenta la concentración inicial de CN-libre, para luego ser sometido a un proceso de tratamiento de oxidación y observar los nuevos niveles alcanzados terminado el tratamiento y determinar los niveles de eficiencia final.</p>	<p>PARAMETROS FISICOQUIMICOS</p>	Potencial de Hidrógeno	Unidad de pH
										Conductividad Eléctrica	uS/cm
										Solidos Disueltos Totales	mg/l
										Cianuro Total	mg/l
<p>RENDIMIENTO</p>				<p>RENDIMIENTO</p>	<p>Eficiencia</p>	%					

B. MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA CAMANÁ



ESCALA 1 : 6 000 000

UBICACIÓN DEPARTAMENTAL



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
 Carrera profesional de Ingeniería Ambiental

MAPA N°1

MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA CAMANÁ

Elaborado por: Quiroz Montesinos, Natalia Camila	Tesis: APLICACIÓN DE OZONO PARA OXIDACIÓN DE CIANURO TOTAL EN EFLUENTES MINEROS DE EXTRACCIÓN DE ORO, 2025	Mapa N°
Revisor por: Omar Vasquez Aranda		01
Escala: 1:1 450 000	Formato: A-4	Proyección: WGS84 ZONA-18S
Fuentes: IGN - IDEP, ANA - GEOANA, MTC		

B. PANEL FOTOGRAFICO

Toma de muestra para su análisis



Preparación de reactivos para determinación de CN^-



Toma de muestra para análisis colorimétrico de CN^-



Llenado de muestras en las celdas del espectrofotómetro



Colocación de las celdas en el espectrofotómetro



Medición de las celdas en el espectrofotómetro



Medición de muestras cianuradas



Llenado de muestras en las jarras del
floculador



Calibración del equipo ozonificador



Ajuste de los niveles y concentración de ozono



Inyección de Ozono en las jarras de floculación



Inyección de Ozono por 5, 10, 15, 20 y 30 minutos

