

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Evaluación de las nanopartículas de óxido de zinc en la
reducción de materia orgánica y microorganismos de las
aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas**

Diego Franco Carhuamaca Pumacahua
Carlos Ricardo Flores Doroteo

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Anieval Peña Rojas
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 12 de Marzo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Evaluación de las nanopartículas de Oxido de Zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas

Autores:

1. Diego Franco Carhuamaca Pumacahua – EAP. Ingeniería Ambiental
2. Carlos Ricardo Flores Doroteo – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

Filtro de exclusión de bibliografía	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>
Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N.º de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 15	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>
Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante	SI	<input checked="" type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original

(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ASESOR

Dr. Anieval Peña Rojas

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Continental, por ser parte de nuestra formación académica y darnos las facilidades para desarrollar nuestra tesis

A nuestro asesor de tesis, Ing. Anieval Peña Rojas, por su dedicada orientación, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso. Sus valiosos consejos y su constante motivación han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

Los Autores.

DEDICATORIA

A nuestros padres, quienes con su apoyo incondicional y sabiduría nos han guiado en cada paso de nuestras vidas y por enseñarnos la importancia del sacrificio y perseverancia.

Ricardo.

A nuestro asesor por compartir su conocimiento y por su invaluable orientación durante el desarrollo de esta tesis.

A todos aquellos que, de una u otra forma, han contribuido a la culminación de este proyecto.

Diego.

ÍNDICE GENERAL

ASESOR	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1. Realidad Problemática	15
1.1.2. Formulación del problema	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo General	17
1.2.2. Objetivos Específicos.....	17
1.3. Justificación e importancia	18
1.3.1. Justificación.....	18
1.3.2. Importancia	19
1.4. Hipótesis y descripción de variables	20
1.4.1. Hipótesis.....	20
1.4.2. Descripción de variables	21
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes del Problema.....	24
2.1.1. Antecedentes Nacionales	24
2.1.2. Antecedentes Internacionales.....	25
2.2. Bases Teóricas.....	28
2.2.1. Aguas residuales.....	28
2.2.2. Fotocatálisis.....	30
2.2.3. Fuentes de luz.....	31
2.2.4. Nanopartícula de ZnO como fotocatalizador	32
2.2.5. Tiempo de contacto bajo la exposición a la irradiación de luz.....	36
2.3. Definición de términos básicos	37
2.3.1. Calidad del agua.....	37
2.3.2. Nanopartículas.....	37

2.3.3.	Fotocatálisis heterogénea	37
2.3.4.	Intensidad de la luz.....	37
CAPÍTULO III METODOLOGÍA		38
3.1.	Métodos y alcance de la investigación.....	38
3.1.1.	Método de investigación	38
3.1.2.	Tipo	38
3.1.3.	Nivel.....	38
3.2.	Diseño de la investigación	38
3.3.	Población y muestra.....	40
3.3.1.	Población.....	40
3.3.2.	Muestra.....	40
3.4.	Unidad muestral	41
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	41
3.6.	Desarrollo de la investigación.....	41
3.6.1.	Pre-campo	41
3.6.2.	Etapa de campo o monitoreo.....	41
3.6.3.	Etapa de laboratorio	42
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45
4.1.	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	45
4.1.1.	Ubicación del punto de monitoreo	45
4.1.2.	Análisis de FTIR de las nanopartículas de ZnO.....	46
4.1.3.	Caracterización de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas .	47
4.1.4.	Resultados de la concentración final y % de remoción de materia orgánica	48
4.1.5.	Resultados de la concentración final y % de eliminación de microorganismos.	52
4.1.6.	Comparación del mejor tratamiento.....	58
4.1.7.	Isoterma de adsorción	59
4.1.8.	Cinética de adsorción	61
4.2.	Mecanismo de reacción.....	64
4.2.1.	Remoción de materia orgánica.....	65
4.2.2.	Eliminación de microorganismos.....	66
4.3.	Análisis estadístico para la prueba de hipótesis	68
4.3.1.	Prueba de normalidad.....	68
4.3.2.	Contrastación de hipótesis.....	70
4.4.	Discusión de resultados.....	75
4.4.1.	Efecto de la masa de nanopartículas de ZnO	75
4.4.2.	Efecto del tiempo de contacto	75
4.4.3.	Efecto de la radiación UV	77

CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS	87
Anexo 01. Matriz de consistencia.....	87
Anexo 02. Panel fotográfico	90
Anexo 03. Reporte de laboratorio.....	96
Anexo 04. Cálculos de isoterma	100
Anexo 05. Cálculos de cinética.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables	22
Tabla 2. Diseño experimental con arreglo factorial 4x3x2	39
Tabla 3. Características físicas y microbiológicas del agua residual municipal	47
Tabla 4. Concentración final de DQO en aguas residuales municipales.....	48
Tabla 5. Concentración final de coliformes totales en aguas residuales municipales.....	53
Tabla 6. Resultados finales del tratamiento con NP-ZnO	58
Tabla 7. Concentración de DQO para isoterma	59
Tabla 8. Concentración de DQO para isoterma	62
Tabla 9. Kruskal Wallis para DQO y coliformes interacciones de variables	70
Tabla 10. Kruskal Wallis para DQO y masa de nanopartículas de ZnO	71
Tabla 11. Kruskal Wallis para coliformes totales y masa de nanopartículas de ZnO.....	72
Tabla 12. Kruskal Wallis para DQO y tiempo de contacto	72
Tabla 13. Kruskal Wallis para coliformes totales y tiempo de contacto	73
Tabla 14. Kruskal Wallis para DQO y radiación UV	74
Tabla 15. Kruskal Wallis para coliformes totales y radiación UV	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de fotocatalisis	30
Figura 2. Mecanismo fotocatalítico del ZnO	34
Figura 3. Métodos generales de síntesis de nanopartículas de ZnO	35
Figura 4. Aplicaciones de las NP de ZnO	36
Figura 5. Mapa de ubicación del punto de monitoreo.....	45
Figura 6. Análisis de FTIR del nanocatalizador ZnO	46
Figura 7. Concentración final de DQO	50
Figura 8. Remoción de DQO	51
Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO	51
Figura 10. Concentración final de coliformes totales	55
Figura 11. Eliminación de coliformes termotolerantes	56
Figura 12. Porcentaje de eliminación de coliformes totales	57
Figura 13. Isoterma de Langmuir.....	59
Figura 14. Isoterma de Freundlich	60
Figura 15. Corroboración de la isoterma de Freundlich	61
Figura 16. Cinética de pseudo primer orden	62
Figura 17. Cinética de pseudo segundo orden	63
Figura 18. Corroboración de la cinética de pseudo segundo orden	64
Figura 19. Mecanismo de degradación de contaminantes orgánicos	65
Figura 20. Mecanismos de eliminación de bacterias	66
Figura 21. Prueba de normalidad de DQO.....	69
Figura 22. Prueba de normalidad de coliformes totales.....	69

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo determinar el efecto del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes en aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas. Se utilizó un diseño experimental con un arreglo factorial 4x3x2, con 2 repeticiones, lo que resultó en un total de 48 corridas experimentales. Las variables evaluadas fueron la masa de NP-ZnO (0,25 g; 0,5 g; 1 g; y 1,5 g), el tiempo de contacto (60, 90 y 120 minutos) y la radiación UV (15 W/m² y 36 W/m²). Los resultados iniciales mostraron una concentración de DQO de 408,03 mg/L y de coliformes totales de 17,000 NMP/100 mL. Tras el tratamiento, los mejores resultados se obtuvieron con la combinación de una masa mayor de ZnO (1,5 g), una radiación UV de 36 W/m², y un tiempo de exposición de 120 minutos, logrando reducir la concentración de DQO a 13,18 mg/L, lo que representa una remoción del 96,73%. Además, la concentración de coliformes totales se redujo a 1900 NMP/100 mL, alcanzando una eliminación del 98,81%. Estos resultados cumplen con los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, que fija un máximo de 10000 NMP/100 mL para coliformes totales y 200 mg/L para la DQO. En conclusión, el tratamiento de aguas residuales municipales utilizando nanopartículas de ZnO, en combinación con radiación UV y tiempos de contacto prolongados, se presenta como una solución efectiva para la remoción de materia orgánica y microorganismos, cumpliendo con la normativa peruana.

Palabras clave: Nanopartícula, agua residual, materia orgánica, radiación UV

ABSTRACT

The aim of the study was to determine the effect of treatment with ZnO nanoparticles on the reduction of pollutants in municipal wastewater from San Agustín de Cajas. An experimental design with a 4x3x2 factorial arrangement was used, with 2 replicates, resulting in a total of 48 experimental runs. The variables evaluated were the mass of NP-ZnO (0,25 g; 0,5 g; 1 g; and 1,5 g), contact time (60, 90, and 120 minutes), and UV radiation (15 W/m² and 36 W/m²). Initial results showed a COD concentration of 408.03 mg/L and total coliforms of 17,000 NMP/100 mL. After treatment, the best results were obtained with the combination of a higher mass of ZnO (1,5 g), UV radiation of 36 W/m², and an exposure time of 120 minutes, achieving a reduction in the COD concentration to 13,18 mg/L, representing a removal of 96,73%. In addition, the concentration of total coliforms was reduced to 1900 NMP/100 mL, achieving a removal of 98,81%. These results comply with the limits established in Supreme Decree No. 003-2010-MINAM, which sets a maximum of 10000 NMP/100 mL for total coliforms and 200 mg/L for COD. In conclusion, the treatment of municipal wastewater using ZnO nanoparticles, in combination with UV radiation and prolonged contact times, is presented as an effective solution for the removal of organic matter and microorganisms, complying with Peruvian regulations.

Keywords: Nanoparticle, wastewater, organic matter, UV radiation

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la reutilización y recuperación de aguas residuales han cobrado rápidamente importancia a nivel mundial como una estrategia para asegurar una gestión y desarrollo sostenibles del agua. Esto se debe a la escasez de agua generada por el cambio climático y la inadecuada gestión de los recursos hídricos, lo que ha resultado en un acceso limitado a agua limpia y en una demanda de agua que supera la disponibilidad de recursos. Consecuentemente, el acceso a agua potable se está convirtiendo en un problema creciente en una economía global en expansión y en países con población en aumento (1).

La contaminación del agua se presenta en distintos niveles: primario, secundario y terciario, afectando las fuentes de agua a causa de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas. Entre los diversos métodos para tratar la contaminación del agua, la fotocátalisis se destaca como una opción atractiva debido a su comprobada eficacia en la purificación de diversos contaminantes, su bajo costo y alta eficiencia (2). Esta técnica utiliza energía solar para oxidar o reducir contaminantes mediante la estimulación de la transferencia de electrones de un fotocatalizador semiconductor (3). El fotocatalizador es importante en esta tecnología, ya que convierte la energía solar en energía química, destruyendo así los contaminantes. El ZnO, un fotocatalizador típico, puede generar carga eléctrica bajo la luz para producir radicales oxidantes que descomponen la materia orgánica en el agua (4). En su forma nanoestructurada, el ZnO es capaz de absorber radiación ultravioleta (UV) y es reconocido como uno de los semiconductores más eficaces para inducir la fotocátalisis, gracias a su bajo costo, composición no tóxica y notable eficacia catalítica (5).

Dado a lo mencionado es que el presente trabajo busca dar a conocer información de los efectos del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes como materia orgánica y microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas. Para ello el trabajo se estructura en cuatro capítulos: el Capítulo I presenta el planteamiento del problema, los objetivos del estudio, su justificación y la identificación de variables; el Capítulo II ofrece una revisión bibliográfica que incluye antecedentes relevantes, así como el marco teórico y conceptual que sustenta la investigación; el Capítulo III detalla la parte experimental realizada en el laboratorio, describiendo la metodología empleada, el diseño experimental y los equipos y materiales utilizados; y el Capítulo IV expone los resultados obtenidos y su discusión, presentando los datos a través de gráficos y tablas, además de la contrastación de hipótesis. Finalmente, se incluyen las conclusiones y recomendaciones del trabajo, así como los anexos que evidencian el desarrollo del estudio.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Realidad Problemática

1.1.1.1. Enfoque Internacional

En los últimos años, la recuperación y reutilización de aguas residuales ha ganado prominencia a nivel mundial como una estrategia clave para una gestión sostenible del agua. Esta tendencia surge ante la escasez de agua provocada por el cambio climático y la deficiente administración de los recursos hídricos. La limitada disponibilidad de agua limpia y una demanda creciente que supera los recursos disponibles están exacerbando los desafíos de acceso al agua potable en una economía global y en naciones con poblaciones en constante crecimiento (1). En América Latina, más del 80% de la población vive en áreas urbanas. A pesar de esta concentración, la disponibilidad de agua es limitada y cerca del 70% de las aguas residuales no se tratan. Esta situación impide cerrar el ciclo del agua y dificulta su reutilización debido a la contaminación (2).

1.1.1.2. Enfoque Nacional

En Perú, solo se ha ejecutado el 30% de la inversión pública destinada al tratamiento de agua. La contaminación del agua ocurre en distintos niveles, desde primario hasta terciario, y puede ser provocada por sustancias tanto orgánicas como inorgánicas (2). Entre los diferentes tratamientos de la contaminación del agua, la fotocatalisis es una opción atractiva debido a su probado potencial en la purificación de diferentes contaminantes, su bajo costo y alta eficiencia. La fotocatalisis puede utilizar energía solar para oxidar o reducir contaminantes estimulando la transferencia de electrones de un fotocatalizador semiconductor. En esta tecnología, el factor más importante es el fotocatalizador que convierte la energía solar en energía química y, por tanto, destruye los contaminantes (3).

1.1.1.3. Enfoque Local

En el distrito de San Agustín de Cajas, las aguas residuales se vierten directamente en un cuerpo receptor sin recibir tratamiento previo, se desencadenan diversos problemas en la localidad, que incluyen impactos medioambientales, sociales y económicos (6). En la Elaboración del Plan de Desarrollo Urbano del Distrito de San Agustín de Cajas, se destaca que actualmente, el distrito carece de un sistema completo para el tratamiento de aguas residuales. Solo dispone de una

laguna de oxidación situada en la zona oeste de la ciudad, la cual lleva a cabo el tratamiento de las aguas residuales de manera parcial y, en algunos casos, de forma ineficiente (7). Además, en la RESOLUCIÓN N°1002-2017-ANA/TNRCH se constató en el sector "Ace Pucará", el vertimiento de aguas residuales municipales sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua, estas aguas residuales son descargadas por medio de una tubería de PVC recubierto con material de concreto armado, con un caudal aproximado de 10 L/s hacia la quebrada denominada "Ace Pucara" (8).

En la fotocátalisis, como fotocatalizador convencional, el ZnO puede generar carga eléctrica al ser expuesto a la luz, lo que conduce a la formación de radicales de oxidación que descomponen la materia orgánica presente en el agua (4). Además, en su estructura nano, el ZnO puede absorber radiación ultravioleta (UV) y es considerado uno de los semiconductores más eficientes para promover la fotocátalisis. Esto se debe a ventajas como su bajo costo, su naturaleza no tóxica y su destacada eficiencia catalítica (5). Por este motivo, se ha propuesto evaluar las nanopartículas de ZnO en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema General

¿Cuál será el efecto del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

1.1.2.2. Problemas Específicos

A. Problema específico 1

¿Cuál será el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

B. Problema específico 2

¿Cuál es el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

C. Problema específico 3

¿Cuál es el efecto del tiempo de contacto en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

D. Problema específico 4

¿Cuál es el efecto del tiempo de contacto en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

E. Problema específico 5

¿Cuál es el efecto de la radiación UV en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

F. Problema específico 6

¿Cuál es el efecto de la radiación UV en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar el efecto del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

1.2.2. Objetivos Específicos

A. Objetivo específico 1

Determinar el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

B. Objetivo específico 2

Determinar el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

C. Objetivo específico 3

Determinar el efecto del tiempo de contacto en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

D. Objetivo específico 4

Determinar el efecto del tiempo de contacto en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

E. Objetivo específico 5

Determinar el efecto de la radiación UV en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

F. Objetivo específico 6

Determinar el efecto de la radiación UV en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

1.3.1.1. Justificación teórica

La fotocatalisis, y específicamente el uso de fotocatalizadores como el óxido de zinc (ZnO), ha demostrado ser una técnica prometedora en la purificación de aguas contaminadas. La capacidad del ZnO para absorber luz UV y generar radicales libres que oxidan y descomponen la materia orgánica y los microorganismos lo posiciona como un candidato ideal para el tratamiento de aguas residuales. El ZnO es conocido por su eficacia catalítica, bajo costo, composición no tóxica y capacidad para generar especies reactivas bajo iluminación UV. En su forma nanoestructurada, estas propiedades se ven significativamente mejoradas, aumentando la superficie activa y mejorando la eficiencia de la fotocatalisis.

1.3.1.2. Justificación practica

La implementación de un sistema eficaz de tratamiento de aguas residuales basado en nanopartículas de ZnO contribuirá directamente a la mejora de la calidad del agua en la comunidad. Esto es esencial para proteger la salud pública y el medio ambiente, especialmente en una región con crecientes desafíos de contaminación del agua. Los sistemas de tratamiento

basados en fotocatalisis con ZnO son relativamente simples de implementar y mantener (9). Esta facilidad de uso y escalabilidad permite que la tecnología sea adoptada no solo en San Agustín de Cajas, sino también en otras comunidades con recursos limitados y necesidades similares de tratamiento de aguas residuales.

1.3.1.3. Justificación ambiental

El tratamiento de aguas residuales con nanopartículas de ZnO ayuda a reducir la carga de contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos en los cuerpos de agua receptores (10). Esto es esencial para prevenir la degradación de los ecosistemas acuáticos y mantener la calidad del agua para la flora y fauna local. La implementación de nanopartículas de ZnO como fotocatalizadores puede reemplazar tecnologías de tratamiento más antiguas y contaminantes, como el uso excesivo de cloro, que puede formar subproductos nocivos y afectar la salud de los ecosistemas acuáticos.

1.3.1.4. Justificación social

El tratamiento eficaz de las aguas residuales para eliminar materia orgánica y microorganismos patógenos reduce significativamente el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, como infecciones gastrointestinales y enfermedades cutáneas (11). Esto tiene un impacto directo y positivo en la salud de la población local.

1.3.1.5. Justificación normativa y legal

La adopción de esta tecnología ayudará a la municipalidad a cumplir con las regulaciones ambientales y de salud pública relacionadas con el tratamiento de aguas residuales. El cumplimiento normativo es esencial para evitar sanciones y asegurar un entorno saludable para la comunidad. La implementación de tecnologías eficaces como el uso de nanopartículas de ZnO ayudará a San Agustín de Cajas a cumplir con los estándares y regulaciones establecidos por entidades como el Ministerio del Ambiente (MINAM) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

1.3.2. Importancia

La importancia de la presente investigación radica en su potencial para mejorar la calidad del tratamiento de aguas residuales municipales mediante el uso de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO). Al investigar cómo la masa de estas nanopartículas, el tiempo de contacto y la radiación UV afectan la reducción de materia orgánica y microorganismos, el estudio proporciona datos importantes que pueden optimizar procesos de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo

así a la sostenibilidad ambiental. Los resultados podrían ser aplicados para mejorar la calidad del agua en San Agustín de Cajas, beneficiando directamente a la comunidad y contribuyendo a la implementación de tecnologías más sostenibles en el tratamiento de aguas residuales.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

1.4.1.1. Hipótesis general

H0: El tratamiento con nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativo en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: El tratamiento con nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

1.4.1.2. Hipótesis específicas

A. Hipótesis específica 1

H0: La masa de nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

B. Hipótesis específica 2

H0: La masa de nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

C. Hipótesis específica 3

H0: El tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

D. Hipótesis específica 4

H0: El tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

E. Hipótesis específica 5

H0: La radiación UV no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

F. Hipótesis específica 6

H0: La radiación UV no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

1.4.2. Descripción de variables

1.4.2.1. Variable Independiente

- Cantidad de nanopartículas de ZnO

1.4.2.2. Variable Dependiente

- Materia orgánica
- Microorganismo

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	DIMENSIONES
DEPENDIENTE	Materia orgánica	La materia orgánica en aguas residuales proviene de la descomposición biológica y se presenta como partículas, coloides y macromoléculas disueltas. Su concentración se mide mediante parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), indicadores clave de contaminación orgánica.(12)	La materia orgánica fue cuantificada mediante el análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) al inicio y al final del proceso de fotocátalisis heterogénea, evaluando así la eficiencia del tratamiento en la degradación de compuestos orgánicos presentes en el agua residual.	Concentración de DQO	mg/L
	Microorganismos	Los microorganismos en aguas residuales, incluyendo bacterias, virus, protozoos y hongos, pueden actuar como contaminantes al representar riesgos para la salud humana y ambiental. Su presencia puede indicar contaminación biológica, afectando la calidad del agua y requiriendo tratamientos específicos para su eliminación. (13)	Los microorganismos fueron cuantificados mediante el análisis de los coliformes totales al inicio y al final del proceso de fotocátalisis heterogénea, evaluando así la eficiencia del tratamiento en la degradación microorganismos presentes en el agua residual.	Concentración de Coliformes totales	NMP/100 mL
INDEPENDIENTE	Cantidad de NP-ZnO	La cantidad de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) se refiere a la masa y el tamaño de estas partículas en soluciones o matrices en las que se encuentran. Las nanopartículas de ZnO son definidas como aquellas que tienen	Se determinó la proporción cuantitativa de nanopartículas de óxido de zinc necesaria para alcanzar la masa requerida en el proceso de fotocátalisis heterogénea. Este proceso se realizó bajo diferentes	Masa de NP-ZnO Tiempo de contacto	g min

		al menos una dimensión en el rango de 1 a 100 nanómetros. (14)	tiempos y exposiciones a radiación UV, evaluando su efecto en la remoción de contaminantes como materia orgánica y microorganismos presentes en aguas residuales.	Radiación UV	W/m ²
--	--	--	---	--------------	------------------

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Problema

2.1.1. Antecedentes Nacionales

Uribe, estudió la evaluación de la actividad fotocatalítica y capacidad de mineralización de los materiales, se llevó a cabo por medio de la fotocatalisis heterogénea y el análisis de carbono orgánico total, respectivamente. Para la evaluación de la actividad fotocatalítica se empleó una lámpara ultravioleta con espectro de radiación similar a la luz solar de 365 nm y de baja intensidad (90 W/m^2) y la cantidad de ZnO adicionado se varió en 13%, 25%, 50% y 75% mol, con la finalidad de analizar el efecto del ZnO en la actividad fotocatalítica del ZrO_2 . La sustancia recalcitrante de prueba fue el fenol; que es un compuesto químico orgánico que se encuentra en los cuerpos de agua como resultado de su alto uso industrial, farmacéutico y agroquímico. El estudio demostró que la principal ventaja de usar los óxidos ZnO- ZrO_2 para la degradación fotocatalítica del fenol, fue el grado de mineralización, ya que el compuesto ZnO- ZrO_2 con 75% mol a pH ácido, superó la mineralización alcanzada por el ZnO puro en un periodo de irradiación de 2 horas. (15)

Huanca, analizó la fotocatalisis heterogénea y su influencia en el tratamiento de las aguas residuales de la UNCP, usando como catalizadores el TiO_2 y el peróxido de hidrógeno a diferentes concentraciones. En los experimentos, el fotorreactor se colocó en un lugar sin sombra y en posición horizontal. Se llenó con 24 L del efluente y se ajustó el pH antes de agregar TiO_2 a una concentración de 1,0 g/L y H_2O_2 a concentraciones de 1,0 g/L y 1,5 g/L, según el diseño experimental. Se tomaron muestras antes y después de 2 horas o 4 horas de tratamiento para el análisis de DQO. En condiciones de días nublados, se observó que el pH, el tiempo de tratamiento y la concentración de H_2O_2 fueron críticos para la degradación de las aguas residuales, siendo 4 h y 1 g/L, respectivamente. Bajo estas condiciones, se alcanzó el mayor porcentaje de degradación, que fue del 62,75%. (16)

Soto, tuvo como objetivo determinar la eficiencia de la fotocatalisis utilizando plata (Ag) para inactivar coliformes totales (CT) en agua de pozo. Para medir la eficiencia de la fotocatalisis con plata, se recolectó una muestra de agua de pozo de 30 L, ubicado en AA.HH Márquez en la provincia de Callao, se llevó al laboratorio para medir como variable principal el indicador microbiológico Coliformes Totales, y la medición de este parámetro en el agua de pozo, resultó que inicialmente tenía 146 UFC/100mL, luego se puso a prueba un catalizador con plata y otro sin plata, se programó dos tiempos de tratamiento (1 h y 2 h) para cada catalizador, bajo

exposición a la radiación Ultravioleta-A con una longitud de onda (360nm-400nm) en un concentrador del espectro electromagnético. Los resultados obtenidos después del tratamiento fueron alentadores se puede observar que aplicando el catalizador sin plata el promedio de la eficiencia de eliminación o inactivación de los Coliformes Totales en 1 h fue de 45,4 % y en 2 h de 59,6 %, y para el catalizador con plata el promedio de la eficiencia de eliminación o inactivación de los Coliformes Totales en 1 h fue de 72,6 % y el 2 h de 93,2%, concluyendo así que la mayor inactivación de los Coliformes Totales se da en 2 h y además la eficiencia es mayor cuando se utiliza el catalizador con plata para la desinfección. (17)

Terreros, tuvo como objetivo determinar la influencia que presenta el proceso de fotocátalisis heterogénea sobre la concentración de coliformes totales de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja. Para las pruebas del proceso de fotocátalisis heterogénea, se utilizó tubos de vidrio de borosilicato (Pyrex) de 1L que garantiza buena transmitancia y captura de rayos UV (a 254 nm), se tomó 1L de muestra, y se estabilizó el pH con rangos de 6, 7, 8 y 9. Se preparó el catalizador de TiO_2 a 0,03 g/L, 0,04 g/L, 0,05 g/L y 0,06 g/L y se diluyó en la muestra para luego ser sometido a radiación solar de 6 h. En los resultados, la fotocátalisis heterogénea tiene un efecto en la concentración de coliformes totales y una influencia significativa de la concentración del catalizador TiO_2 , por lo que a mayor concentración 0,06 g/L se obtiene mejores resultados; el pH y el tiempo de exposición a la radiación solar no tienen gran influencia en el proceso individualmente, con valores de pH entre 6 y 7, y tiempo de exposición a radiación solar por 6 horas disminuye la concentración de coliformes totales hasta en un 98%, por lo que se sugiere, en futuras investigaciones, realizar pruebas utilizando diferentes intervalos de tiempo con la finalidad de determinar a qué tiempo de exposición se obtienen los resultados esperados. (18)

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Kanakaraju y otros, investigaron la degradación fotocatalítica de ZnO en condiciones aireadas y no aireadas, y foto-Fenton con el objetivo de reducir la demanda química de oxígeno en el efluente de sagú. En la fotocátalisis de ZnO, se utilizó una lámpara ultravioleta (UV) de 8 W (= 254 nm, Philips TUV) como fuente de irradiación en el tratamiento fotocatalítico con ZnO, se agregaron aproximadamente 150 mL de efluente de sagú y diferentes concentraciones de ZnO de 0,5 g/L, 1 g/L, 2 g/L y 3 g/L en vasos de precipitados de 250 mL bajo agitación magnética continua con 2 h de exposición a irradiación UV. Los resultados indican altas reducciones en DQO para diferentes concentraciones de efluente a 1:10, 1:100 y 1:1000 diluidos con agua destilada después del tratamiento fotocatalítico con ZnO en condiciones aireadas. Las reducciones de DQO de 90% –95% y 85% se obtuvieron utilizando 3 g/L de ZnO,

después de 2 h de tratamientos fotocatalíticos aireados y no aireados, respectivamente, para una proporción de efluente de sagú de 1:1000. Concluyendo que la fotocatalisis de ZnO se puede aplicar como posible método de tratamiento para reducir la demanda química de oxígeno en los efluentes del procesamiento de sagú. (19)

Adishkumar y otros, investigaron el tratamiento fotocatalítico solar de aguas residuales fenólicas sobre suspensiones de TiO₂. El estudio se centró en el efecto de varios parámetros operativos sobre la eficiencia del tratamiento, incluidos cloruros (50 mg/L – 200 mg/L), sulfatos (50 mg/L – 200 mg/L), aireación (preaireación, con y sin aireación), volumen de líquido (0,25 L-1,5 L) y la intensidad de la luz solar (durante todo el año). La presencia de iones cloruro y sulfato disminuyó la tasa de degradación del fenol debido a una disminución en la adsorción del contaminante y actúan como eliminadores de iones hidroxilo. Se observó que la eficiencia de eliminación de fenol fue de 30%, 85% y 77% para la preaireación, con y sin aireación, respectivamente. La eficiencia de eliminación de fenol fue de 99 %, 94% y 79% y 46% para un volumen de aguas residuales de 0,25 L; 0,50 L; 1,0 L y 1,5 L, respectivamente. Se observó que a medida que aumentaba el volumen de aguas residuales, disminuía la eliminación de fenol. La eficiencia de eliminación de fenol alcanzó su máximo del 95% con una intensidad de luz UV máxima de 32 W/m² y la eficiencia de eliminación de fenol mínima del 59% con una intensidad de luz UV mínima de 20 W/m². (20)

Kanakaraju y otros, investigaron el efluente de molienda de aceite de palma (POME) contiene cantidades importantes de materia orgánica, sólidos y grasa o aceite por ellos se investigó la radiación solar como una posible fuente de fotones en la fotocatalisis solar de TiO₂ y ZnO para reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en POME. La fotocatalisis solar de ZnO y TiO₂ se realizó variando las concentraciones de TiO₂ y ZnO de 0,02 g/L a 0,2 g/L y de 0,5 g/L a 4 g/L, respectivamente, en 150 mL de POME diluido (1:1000). La mezcla de POME y fotocatalizador (ya sea ZnO o TiO₂) se agitó magnéticamente durante 30 minutos en un ambiente oscuro. Luego, se descubrió la suspensión de reacción en el vaso de precipitados antes de exponerla a la luz solar directa, luego se agitó magnéticamente durante la exposición solar y la recolección de muestras se realizó a intervalos predeterminados utilizando una jeringa. El sobrenadante obtenido mediante filtración se utilizó para el análisis de DQO. Los resultados indicaron que la fotocatalisis solar de TiO₂ (pH de 3,7; TiO₂ = 0,1 g/L) ha superado a la fotólisis solar y a la fotocatalisis solar de ZnO en la reducción de los niveles de DQO en POME. Con aumentos sucesivos de TiO₂ de 0,02 g/L a 0,1 g/L, la eliminación de DQO aumentó linealmente del 54,3% al 88,5% después de 5 h de exposición solar. Basándose en las condiciones investigadas, se concluyó que la concentración óptima de TiO₂ es de 0,1 g/L. En conclusión, la

fotocatálisis solar de TiO_2 se puede aplicar como posible medio para reducir las cargas orgánicas en POME. (21)

Nguyen y otros, investigaron la degradación fotocatalítica de la materia orgánica disuelta (DOM) bajo un sistema de luz solar artificial asistido por ZnO en diversas condiciones. En los experimentos fotocatalíticos, la irradiación solar constaba de una fuente de luz y un reactor de vidrio de 100 mL. La fuente de luz fue una lámpara de xenón de 300 W instalada en un simulador. La solución en el reactor se agitó suavemente con una barra magnética para una mezcla uniforme, a temperatura ambiente (23 ± 1 °C) durante un tiempo de reacción de 3 h. Se analizó ZnO en dosis de 0,1 g/L, 0,2 g/L y 0,3 g/L. Para el análisis de DOM, se tomaron muestras a intervalos de tiempo regulares (0 min, 30 min, 60 min, 120 min y 180 min) y se filtraron inmediatamente a través de filtros de jeringa de PTFE de 0,45 μm para separar el polvo de ZnO de la solución. Según los resultados, después de 3 h de irradiación con 0,2 g / L de ZnO, eliminación total de DOM del 95,45% para la fotocatalisis. (22)

BakarSidik y otros, tuvieron como objetivo investigar el rendimiento de la degradación fotocatalítica de A-POME en la adición de NP verdes de óxido de zinc *Cymbopogon Citratus* (ZnO-CC) en términos de demanda química de oxígeno (DQO), turbidez y eliminación de color. El proceso de fotocatalisis se llevó a cabo en un reactor de 2L con luz ultravioleta, que tiene una potencia definida de 15 W y emite a 365 nm. Luego, el experimento utilizó 0,1 g/L de ZnO-CC como fotocatalizador en varias dosis (0,1 g/L, 0,3 g/L y 0,5 g/L). La mezcla se agitó vigorosamente a 150 rpm durante 30 minutos en la oscuridad antes de iniciar la técnica de fotocatalisis para obtener el equilibrio de adsorción-desorción. Los resultados mostraron que un pH 8 y una carga de NP de ZnO-CC de 0,3 g/L era ideal para la degradación fotocatalítica de A-POME con una reducción porcentual significativa de turbidez (68,03%), color (48,11%) y DQO (75,4. %). El aumento de la carga de NP de ZnO-CC en medio alcalino ayudó a la descomposición de los contaminantes A-POME al aumentar el área de superficie accesible para la adsorción de luz ultravioleta durante el proceso fotocatalítico. Por lo tanto, el hallazgo de este estudio puede ayudar al sector de molienda de aceite de palma a mejorar el tratamiento A-POME para proporcionar efluentes tratados de alta calidad. (23)

Hallak y otros, evaluaron la actividad antimicrobiana del TiO_2 , ZnO y Au/ZnO midiendo las reducciones logarítmicas de las poblaciones de *Escherichia coli* y *Aspergillus niger* tanto en la oscuridad como bajo una intensidad de luz cercana a las condiciones de la vida real. Las actividades bactericidas (reducción 2,3 log) de los productos probados fueron más fuertes que sus actividades fungicidas (reducción 1,4 log) después de 2 h de contacto. Se investigaron diferentes parámetros, incluida la concentración del fotocatalizador, la intensidad de la luz

(oscura frente a 5 W/m² UV-A) y la duración del contacto entre el fotocatalizador y las células microbianas y las esporas. Los resultados de este estudio confirmaron las actividades bactericidas del TiO₂, ZnO y Au/ZnO en *E. coli* y aportaron nuevos conocimientos sobre su actividad fungicida en las esporas de *A. niger*. También confirmaron la mayor eficacia antimicrobiana del ZnO en comparación con el TiO₂ y su mayor actividad fotocatalítica cuando está decorado con Au, lo que llevó a las reducciones logarítmicas más altas detectadas después de 2 h de contacto para ambos microorganismos probados (4 y 1,4 para *E. coli* y *A. Níger*, respectivamente). La actividad antimicrobiana se vio potenciada por la duración del contacto entre los microorganismos y las nanopartículas de los diferentes productos fotocatalíticos probados. (24)

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Aguas residuales

Se trata de aguas cuyas características o propiedades naturales han sido modificadas por la actividad humana. Debido a su estado o calidad, requieren de un tratamiento previo antes de ser reutilizadas, vertidas en fuentes naturales de agua, o descargadas en el sistema de alcantarillado (25).

2.2.1.1. Clasificación de aguas residuales

- a) **Aguas residuales industriales:** Son aguas que resultan de la realización de una actividad productiva, incluyendo aquellas derivadas de sectores como la minería, agricultura, energía y agroindustria, entre otros (26).
- b) **Aguas residuales domésticas:** Son aguas originadas en zonas residenciales y comerciales que incluyen desechos fisiológicos y otros residuos producidos por las personas, y que requieren un manejo adecuado (26).
- c) **Aguas residuales municipales:** Las aguas residuales municipales provienen de actividades domésticas y pueden incluir descargas de viviendas, así como aportes de aguas pluviales y efluentes industriales previamente tratados. Estas aguas son recolectadas a través de sistemas de alcantarillado combinados, donde se integran diferentes fuentes de contaminación antes de su tratamiento y disposición final (25).

2.2.1.2. Caracterización de las aguas residuales

a) Materia orgánica:

La concentración de materia orgánica en el agua residual se determina mediante la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO5). La DQO mide la cantidad de oxígeno necesario para descomponer los compuestos orgánicos presentes en la muestra mediante un agente oxidante potente, lo que la convierte en un parámetro clave para evaluar el nivel de contaminación orgánica en el agua (27).

b) Microorganismos:

Coliformes totales: Pertenecientes a la familia Enterobacteriácea, estos bacilos Gram negativos son anaerobios facultativos, no esporulados, y fermentan la lactosa a 35 °C produciendo gas y ácido láctico en 24 a 48 horas. Además, pueden mostrar actividad de la enzima β -galactosidasa. Representan aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de humanos y animales, y se encuentran en el ambiente, como fuentes de agua, vegetación y suelos. Aunque no están necesariamente ligados a la contaminación fecal, sirven como indicadores de degradación de cuerpos de agua. En aguas tratadas, su presencia sugiere contaminación o problemas en el tratamiento, distribución o fuentes, sin especificar el origen exacto (28).

Coliformes termo tolerantes: Son un subgrupo de bacterias coliformes que se encuentran en los intestinos de animales de sangre caliente, incluidos los humanos. Su origen principal es fecal y tienen la capacidad de fermentar la lactosa, produciendo ácido y gas a $44,0 \pm 0,2$ °C en 24 horas. Este grupo incluye principalmente a *Escherichia*, y en menor medida a especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. Estas últimas son especialmente útiles para evaluar la eficacia de los procesos de tratamiento de agua contra bacterias fecales. Su presencia indica la calidad del agua tratada y posibles niveles de contaminación fecal (28).

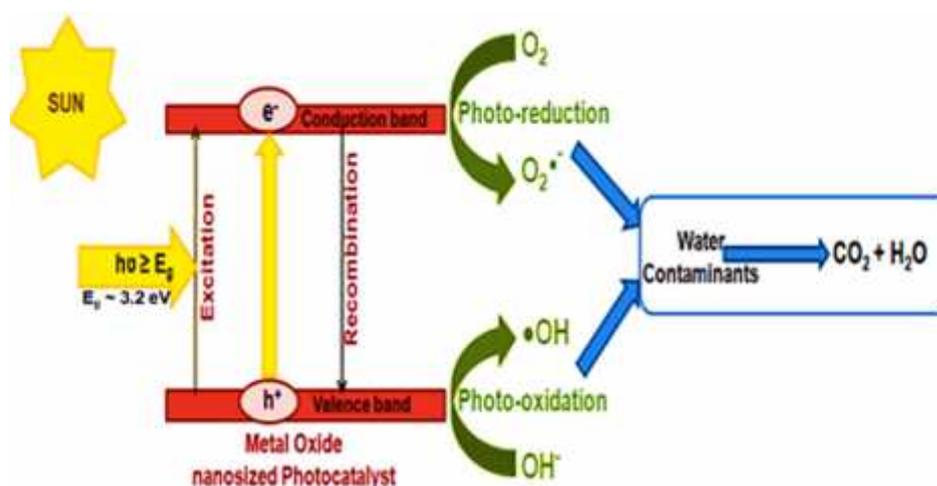
Escherichia coli: Es una bacteria que se encuentra exclusivamente en los intestinos, siendo un indicador claro de contaminación fecal. Se distingue por producir indol a partir de triptófano, ser negativa para oxidasa y no hidrolizar urea, además de tener actividad enzimática de β -galactosidasa y β -glucuronidasa. Estudios han mostrado que se halla en heces humanas y de animales de sangre caliente en concentraciones de 10^8 a 10^9 UFC/g de heces. Aunque *E. coli* es parte normal de la flora intestinal humana, puede estar relacionada con enfermedades. Las cepas patógenas de *E. coli* tienen especificidades de huésped y diferentes características de

virulencia. Aumentos súbitos en la concentración de estas bacterias pueden incrementar significativamente el riesgo de brotes de enfermedades (28).

2.2.2. Fotocatálisis

Este proceso es una oxidación catalítica que involucra la absorción de luz al añadir una sustancia catalizadora, generalmente nanopartículas semiconductoras, que permanecen intactas al finalizar la reacción. Esta técnica combina aspectos fotoquímicos con la acción catalítica para preparar el tratamiento de aguas residuales, eliminando compuestos orgánicos peligrosos, persistentes y no degradables, lo que mejora su capacidad para ser biodegradadas. Los semiconductores tienen una estrecha diferencia de energía entre sus bandas de valencia y conducción; los electrones se activan de la banda de valencia a la de conducción mediante radiación visible o ultravioleta (29).

Figura 1. Esquema del proceso de fotocatálisis



Tomado de Puri y Gupta, 2023 (30)

Los contaminantes se adhieren a los sitios activos de los fotocatalizadores, y la descomposición fotocatalítica de estos contaminantes comienza cuando los electrones son excitados. Al ser foto excitado un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, se genera un hueco positivo en la banda de valencia. El electrón en la banda de conducción reacciona con el oxígeno, formando un radical hidropéroxido (HO_2) o un ion superóxido (O_2^-). Simultáneamente, el agua se oxida con la participación del hueco en la banda de valencia, produciendo iones de hidrógeno (H^+) y radicales hidroxilos (OH). Estos radicales son los responsables de descomponer los contaminantes en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Al

finalizar la descomposición, el proceso de desorción libera las moléculas deterioradas al agua (30).

2.2.2.1. Factores que afectan la degradación de la fotocatalisis

- a) **Dosis de catalizador:** Mayores concentraciones de catalizador ofrecen un mayor número de sitios activos y, consecuentemente, tasas de producción de radicales reactivos más elevadas. No obstante, un exceso de catalizador puede tener efectos adversos, como la agregación de partículas y un incremento en la opacidad de la solución, lo que disminuirá la eficacia de la radiación (31).
- b) **Intensidad de la luz:** La intensidad de la luz es crucial para la velocidad de degradación fotocatalítica, pero solo hasta cierto punto debido a la cantidad limitada de sitios activos en la superficie del fotocatalizador. A mayor intensidad de luz, mayor será la velocidad fotocatalítica, hasta que todos los sitios activos estén ocupados (30).
- c) **pH:** El pH del agua juega un papel significativo en las características de los catalizadores, afectando la estructura, carga y propiedades electrónicas de las partículas del catalizador. Investigaciones han indicado que un pH ácido es más efectivo para degradar contaminantes orgánicos. Un pH ácido provoca una carga positiva en la superficie del fotocatalizador, lo que atrae a los contaminantes orgánicos cargados negativamente (30).
- d) **Estabilidad:** Un fotocatalizador debe ser duradero frente a la foto corrosión, adaptarse a diferentes condiciones de reacción y mantener su eficiencia incluso después de un uso continuado o prolongado (32).

2.2.3. Fuentes de luz

Se reconoce ampliamente que la luz desempeña un papel fundamental en la eficacia de la fotocatalisis, especialmente en términos de su espectro de longitud de onda y su nivel de intensidad. Una reacción fotocatalítica solo puede ocurrir cuando la iluminación con luz permite la generación de especies altamente reactivas, como los radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) y los radicales oxis ($\text{O}\cdot$). La influencia de la intensidad de la luz en la fotocatalisis ha sido objeto de gran interés, y se ha observado consistentemente que un aumento en la intensidad de la luz tiene un efecto positivo en estas reacciones fotocatalíticas (33).

La fotocatalisis es una tecnología de oxidación avanzada, se basa en la luz como su principal fuente de energía para abordar la descontaminación del medio ambiente; por lo tanto, la fuente de luz es un factor importante que afecta la fotocatalisis (34).

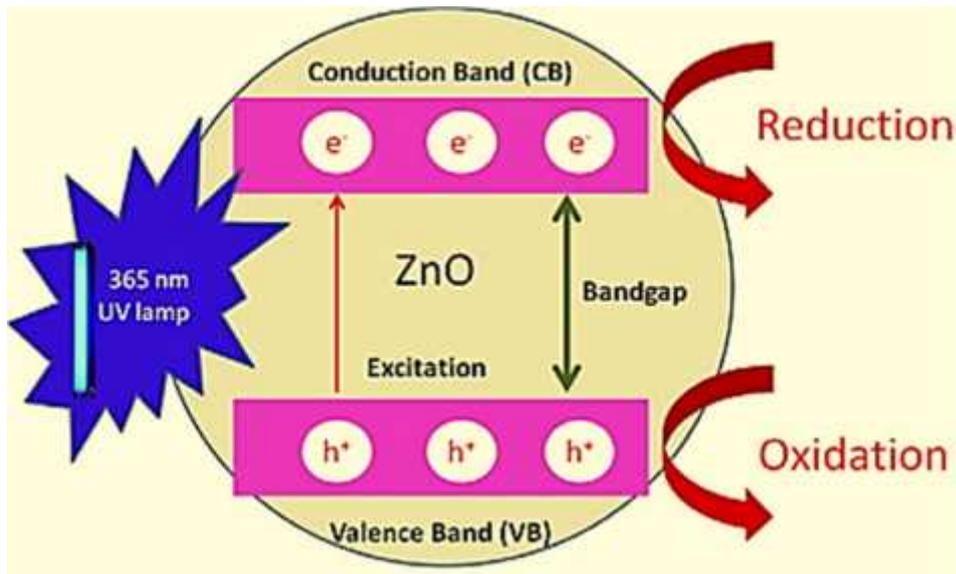
- a) **Luz UV:** El ZnO absorbe luz ultravioleta con una longitud de onda inferior a 387 nm; por tanto, su actividad fotocatalítica se limita a la región UV (35). En el proceso de fotocatalizador UV/ZnO, el óxido de zinc, cuando se ilumina con fotones que tienen un nivel de energía que supera su vitalidad de banda prohibida, excita los electrones (e^-) de la banda de valencia a la banda de conducción, creando así agujeros (h^+) en la banda de valencia. Los agujeros de la banda de valencia fotogenerados reaccionan con agua (H_2O) o iones hidroxilo (OH^-) adsorbidos en la superficie del catalizador para crear radicales hidroxilo ($\bullet OH$), que son oxidantes potentes y degradan contaminantes (36).
- b) **Luz visible:** Las nanoestructuras de ZnO como semiconductor de banda prohibida ancha (3,37 eV) sufren una limitación intrínseca para utilizar solo ~ 4% de la porción UV de la energía solar como fuente de energía para la foto excitación en el proceso fotocatalítico. Por lo tanto, se han aplicado esfuerzos considerables para extender la foto respuesta del ZnO a la región de luz visible (~ 43% del espectro solar). La modulación de la estructura de la banda de ZnO hasta la banda prohibida inferior para adaptar la absorción de luz visible es una de las principales estrategias (37).
- c) **Luz solar:** La luz solar está compuesta por menos del 5% de radiación UV, por lo que es necesario mejorar esta eficiencia modificando su banda prohibida del fotocatalizador (35). Las iluminaciones de la luz solar inducen rápidamente una gran separación de los portadores de carga de pares de electrones y huecos de moléculas de ZnO NP. Esta gran cantidad de portadores de carga pueden adsorberse fácilmente en la superficie del fotocatalizador de ZnO y también aumentan las posibilidades del proceso de oxidación y reducción en los sitios activos del fotocatalizador de ZnO. Esta rápida capacidad de desprendimiento entre los electrones y los huecos podría ser una de las razones detrás de la mejora de la eficiencia fotocatalítica de las NP de ZnO (38).

2.2.4. Nanopartícula de ZnO como fotocatalizador

El ZnO es un semiconductor con una banda prohibida de 3,37 eV, lo que le permite absorber una parte significativa de la radiación UV, con un umbral específico de 425 nm. Su actividad fotocatalítica está influenciada por su fase estructural, tamaño de cristalitos, área superficial específica y estructura porosa (5).

El óxido de zinc (ZnO) en forma de nanopartícula absorbe la luz ultravioleta (UV) y actúa como un semiconductor eficaz para la fotocatálisis. Su popularidad se debe a su bajo costo, carácter no tóxico y alta eficiencia catalítica. Se ha investigado extensamente su uso en la eliminación de compuestos orgánicos tanto del aire como del agua contaminados mediante fotocatálisis (5).

Figura 2. Mecanismo fotocatalítico del ZnO

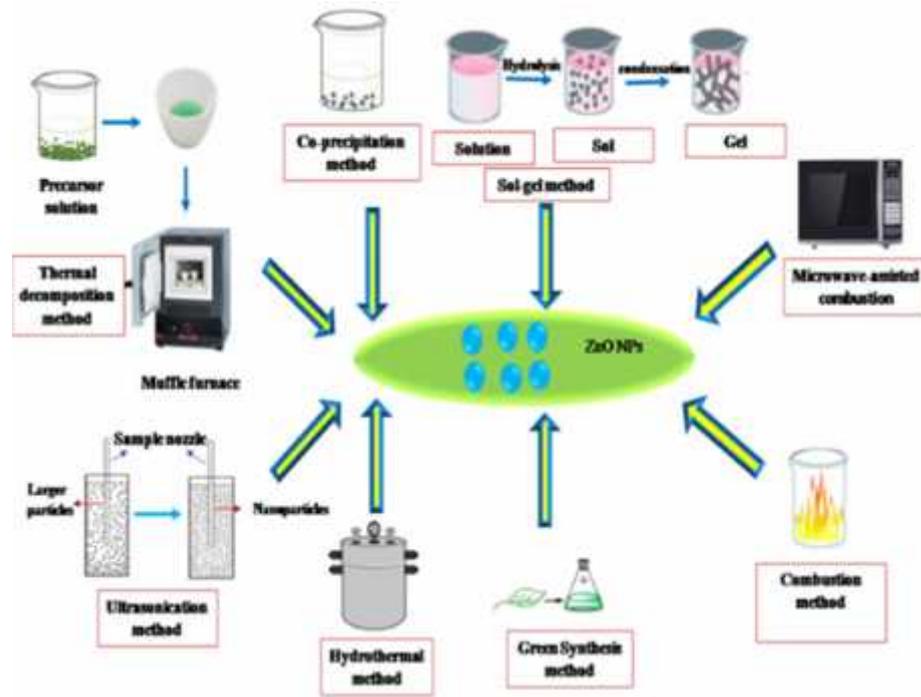


Tomado de Saravanan y compañeros, 2013 (39)

2.2.4.1. Síntesis de nanopartícula de ZnO

Generalmente hay dos enfoques principales para sintetizar nanopartículas: el enfoque de arriba hacia abajo y el de abajo hacia arriba. El primero implica la reducción de materiales más grandes a nanopartículas más pequeñas, mientras que el segundo implica la construcción de nanopartículas utilizando unidades más pequeñas, como átomos y moléculas. Varios métodos han sido utilizados desde períodos anteriores para preparar nanopartículas de óxido de zinc (ZnONP), como la combustión, descomposición térmica, método sol-gel y métodos hidrotermales. Sin embargo, las últimas técnicas incluyen la ultra sonicación, coprecipitación, combustión asistida por microondas y síntesis verde (40).

Figura 3. Métodos generales de síntesis de nanopartículas de ZnO



Nota. Tomado de Singh y compañeros, 2020 (40)

2.2.4.2. Aplicaciones de las nanopartículas de ZnO

En los últimos años, ha habido un notable aumento en la atención hacia las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en la investigación, debido a sus propiedades singulares que se han aprovechado para una amplia gama de aplicaciones en electrónica transparente, emisión de luz ultravioleta (UV), dispositivos piezoeléctricos, sensores químicos, optoelectrónica, células solares y electrónica de espín. Dado que el ZnO es no tóxico, ha sido ampliamente utilizado como un excelente fotocatalizador para la descomposición de numerosos contaminantes orgánicos emergentes (41).

Figura 4. Aplicaciones de las NP de ZnO



Nota. Tomado de Raha y Ahmaruzzaman, 2022 (41)

2.2.5. Tiempo de contacto bajo la exposición a la irradiación de luz

El tiempo de contacto de irradiación en el proceso de foto degradación es la duración de la interacción entre el fotocatalizador y los rayos internos para producir radicales hidroxilos, y la interacción entre los radicales hidroxilos y el sustrato de los compuestos orgánicos. Los radicales hidroxilo son oxidantes fuertes utilizados en la degradación de compuestos, mientras más radicales hidroxilo se forman mayor es el porcentaje de degradación producida (42).

La inactivación de bacterias y especies orgánicas mediante la exposición a fuentes de luz ultravioleta, se ha observado que la utilización más efectiva de la luz se logra con una intensidad baja y una exposición prolongada en comparación con una intensidad alta y una exposición breve (33).

Por lo tanto, se necesita un mayor tiempo de irradiación para optimizar significativamente el porcentaje de degradación del contaminante. Además, este tiempo de irradiación más largo puede no ser necesario para otros contaminantes o si se utilizan otros fotocatalizadores (42).

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Calidad del agua

La calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas o biológicas del agua. Los estándares más comunes que se utilizan para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, la seguridad del contacto humano y el agua potable (43).

2.3.2. Nanopartículas

Se definen como partículas que tienen al menos una de las dimensiones en el rango comprendido entre 1 nm y 100 nm (44).

2.3.3. Fotocatálisis heterogénea

Se trata de un procedimiento de oxidación avanzada que aprovecha la capacidad catalizadora de la luz ultravioleta, ya sea natural o artificial. Este proceso consiste en excitar un material semiconductor mediante la luz, lo que activa reacciones de óxido-reducción a través de la generación de pares electrón-hueco en la superficie del material (31).

2.3.4. Intensidad de la luz

Se refiere a la cantidad de energía luminosa que incide en la superficie del material fotocatalítico por unidad de área y tiempo. Una mayor intensidad de luz suele favorecer el proceso de fotocatálisis, ya que proporciona más energía para excitar los electrones en el material semiconductor, generando así pares electrón-hueco que participan en reacciones de óxido-reducción (31).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

En este estudio se empleó el método hipotético-deductivo, que consistió en formular y verificar hipótesis a través de la manipulación y observación de las variables definidas. Además, se siguió un enfoque experimental-observacional para examinar detenidamente cómo la modificación de las variables independientes afectaron a las variables dependientes (45).

3.1.2. Tipo

El tipo de investigación en la presente investigación fue aplicado debido a que se buscó una solución práctica al problema, en este caso, el tratamiento de aguas residuales municipales (46).

3.1.3. Nivel

El nivel de investigación en la presente investigación fue explicativo pues se tuvo la finalidad de buscar la relación de causa-efecto, además que se dio explicación del resultado del efecto de las variables manipuladas en la variable dependiente (46).

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de investigación propuesto en la que se determinó el efecto de las variables independientes (Masa de Np-ZnO, tiempo de contacto y radiación UV) sobre la variable dependiente (materia orgánica y microorganismos), fue un arreglo factorial de $4 \times 3 \times 2$ con 2 repeticiones, obteniendo un total de 48 corridas experimentales:

Tabla 2. Diseño experimental con arreglo factorial 4x3x2

Radiación UV						
(W/m²)						
15			36			
Tiempo de contacto						
(min)						
Masa de Np-ZnO						
(g)	60	90	120	60	90	120
	T1-1	T2-1	T3-1	T4-1	T5-1	T6-1
0,25	T1-2	T2-2	T3-2	T4-2	T5-2	T6-2
	T7-1	T8-1	T9-1	T10-1	T11-1	T12-1
0,5	T7-2	T8-2	T9-2	T10-2	T11-2	T12-2
	T13-1	T14-1	T15-1	T16-1	T17-1	T18-1
1,0	T13-2	T14-2	T15-2	T16-2	T17-2	T18-2
	T19-1	T20-1	T21-1	T22-1	T23-1	T24-1
1,5	T19-2	T20-2	T21-2	T22-2	T23-2	T24-2

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

3.3.2. Muestra

La muestra fue el conjunto total de todas las unidades experimentales o muestrales que se utilizaron en nuestra investigación. Por lo que el tamaño de la muestra que fue extraída las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas fue hallado por medio de la siguiente formula:

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{E^2}$$

Donde:

n: Tamaño de muestra aproximado

Z: Nivel de confianza (95%)

E: Error de la estimación (0,043)

p: Probabilidad de que ocurra (0,50)

q: Probabilidad que no ocurra (0,50)

$$q = 1 - p$$

$$q = 1 - 0,95$$

$$1 - \frac{q}{2} = 0,975$$

En el libro de metodología del licenciado Nel Quezada Lucio, se incluye la tabla de distribución normal. Al referirse al valor de 0,975 en esta tabla, se encuentra que $Z = 1,96$.

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,50 \times 0,50}{0,043^2}$$

$$n = 519,41 \text{ m}$$

A partir del resultado de la ecuación, se puede mencionar que por cada unidad experimental o muestral se utilizó 500 mL de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas. Por ende, para 48 corridas experimentales que se realizó, se utilizaron 24 L de agua residual residuales municipales de San Agustín de Cajas.

3.4. Unidad muestral

La unidad muestral fue la cantidad específica de agua residual municipal que se utilizó en cada experimento individual; siendo cada unidad muestral un volumen de 500 mL de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas fueron el muestreo de agua residual municipal, análisis fisicoquímico, análisis microbiológico, reportes de laboratorio, cronometría, para evaluar el tiempo en el que se da mayor reducción de materia orgánica y coliformes totales.

Los instrumentos fueron las herramientas en línea que proporcionaron acceso a una amplia variedad de recursos académicos, incluyendo libros, revistas, artículos y publicaciones científicas, además de informes y reportes de laboratorio y de campo. Asimismo, se utilizaron fichas para el registro de análisis, datos y el análisis estadístico.

3.6. Desarrollo de la investigación

3.6.1. Pre-campo

- Se determinó el tipo de muestreo que se desarrolló.
- El muestreo fue simple, puesto que, se desarrolló en un momento específico y en un lugar determinado. Este tipo de muestreo se realizó en un solo punto en el tiempo y espacio, sin considerar variaciones temporales o espaciales.
- Verificamos la calibración adecuada de los equipos de monitoreo.
- Revisamos los instrumentos de investigación.

3.6.2. Etapa de campo o monitoreo

El muestreo de agua se realizó siguiendo estrictamente el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N°010-2016-ANA). Este documento estableció con precisión cada fase del proceso, desde la planificación y preparación previa, hasta la ejecución y seguimiento posterior del monitoreo. Además, definió

los procedimientos específicos, los equipos necesarios y las condiciones óptimas para obtener mediciones fiables, asegurando así la validez y representatividad de los datos sobre la calidad del agua en los cuerpos hídricos superficiales.

- Se contó con la indumentaria de protección como: Casco, guantes de nitrilo, mascarilla descartable, zapatos de seguridad.
- Se colocó una placa de identificación en el punto a muestrear el cual debe contar con el código de muestreo y las coordenadas UTM tomadas con el GPS.
- Se realizó la medida de los parámetros en campo en el mismo lugar tales como pH, conductividad y temperatura.
- Se recogieron 24 L de agua muestra en un balde de plástico previamente esterilizado y desinfectado.
- Luego del muestreo las muestras fueron preservadas con ácido nítrico.

3.6.3. Etapa de laboratorio

Los experimentos de fotocatalisis sobre las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas se realizaron con cuatro niveles de masa de nanopartículas de ZnO (0,25 g, 0,5 g, 1 g y 1,5 g), tres niveles de tiempo de contacto (60 min, 90 min y 120 min) y variando dos niveles de radiación UV (15 W/m^2 y 36 W/m^2) para reducción de materia orgánica y microorganismos.

3.6.3.1. Obtención de las nanopartículas de ZnO

Las nanopartículas fueron adquiridas del proveedor mKnano teniendo las siguientes características:

- Código: MKN-ZnO-020
- Número CAS:1314-13-2
- Fórmula: óxido de zinc
- Pureza del 99,9%
- APS: 20 nm
- Lot: # VA0809

3.6.3.2. Tratamiento fotocatalítico

Se siguió la siguiente metodología de (19):

- Se pesaron en una luna de reloj cantidades de 0,25 g, 0,5 g, 1 g y 1,5 g de nanopartículas de ZnO.
- Las cantidades de 0,25 g, 0,5 g, 1 g y 1,5 g de nanopartículas de ZnO se añadieron a 500 mL de muestra de agua residual municipal contenido en vaso de precipitados y el pH fue ajustado a 6 utilizando HCl 1M y NaOH 1M.

Hidróxido de sodio 1 M

$$W = \overline{PM} * M * V$$

$$W = 39,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 0,1\text{L}$$

$$W = 3,998 \text{ g de NaOH}$$

Se necesitó 3,998 g de NaOH 1 M en 100 mL de agua destilada.

Ácido clorhídrico 1 M

Ácido clorhídrico concentrado al 37% con una densidad de 1,18 g/mL.

$$C = \frac{1,18 \text{ g d H}}{0,001 \text{ L d H}} * \frac{37 \text{ g d H}}{100 \text{ g d H}} * \frac{1 \text{ m H}}{36,5 \text{ g d H}} = 11,96 \frac{\text{m}}{\text{L}} = 12 \text{ M}$$

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$12 \text{ M} * V_1 = 1 \text{ M} * 100 \text{ mL}$$

$$V_1 = 8,3 \text{ mL}$$

Se necesitó 8,3 mL de HCl 1M en 100 mL de agua destilada.

- Las muestras fueron expuestas bajo irradiación de lámpara ultravioleta (UV) en dos niveles de 15 W/m² y 36 W/m² (47)(48).
- Simultáneamente las soluciones fueron agitadas mediante agitación magnética a 150 rpm durante diferentes tiempos de 60 min, 90 min y 120 min y se determinó la concentración de materia orgánica (DQO) y microorganismos (Coliformes totales)

según APHA-AWWA-WEF (2017) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

3.6.3.3. Determinación de isothermas

- Para construir las isothermas de adsorción, se llevaron a cabo experimentos considerando cantidades diferentes de adsorbente (0,1 g, 0,25 g, 0,5 g, 1 g, 1,25 g y 1,5 g) con tiempo de contacto de 120 min y radiación UV de 36 W/m^2 y a pH 6 y mediante agitación magnética a 150 rpm.
- Después del tratamiento, las muestras fueron enviadas al laboratorio para su análisis y así determinar la concentración final de DQO.
- El procedimiento se realizó con el objetivo de modelar el proceso de adsorción y analizar su característica, adaptándolo a los parámetros de las isothermas de Freundlich y Langmuir.

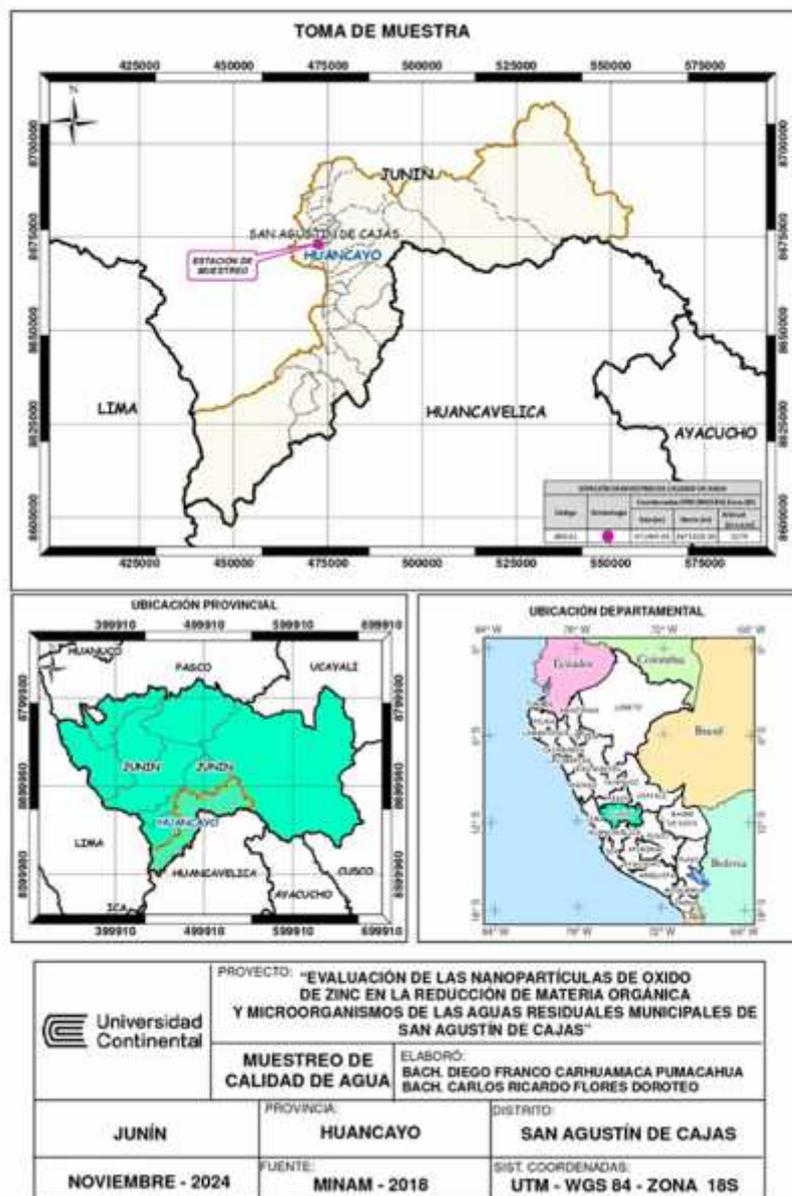
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Ubicación del punto de monitoreo

La muestra fue tomada en el punto de vertimiento a un cuerpo receptor de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas, en la provincia de Huancayo, departamento de Junín con coordenadas UTM: Este 471949 m, Norte 863328 m y altitud 3279 m.s.n.m.

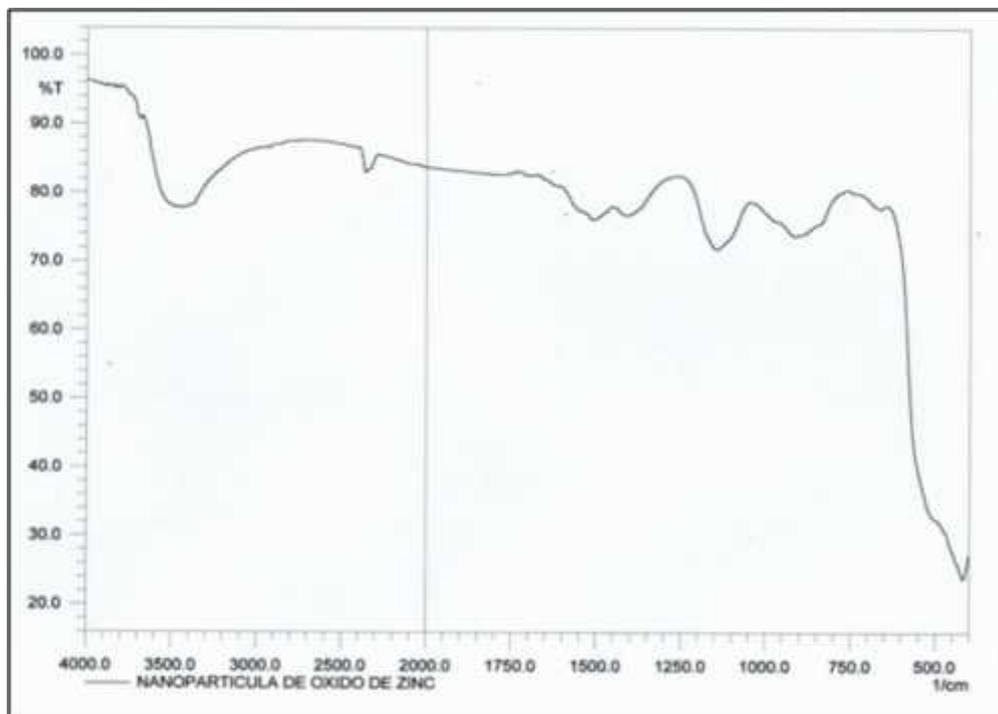
Figura 5. Mapa de ubicación del punto de monitoreo



4.1.2. Análisis de FTIR de las nanopartículas de ZnO

Se realizó el análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier de las nanopartículas de ZnO dando como resultado la siguiente figura.

Figura 6. Análisis de FTIR del nano catalizador ZnO



La figura 6 muestra el espectro FTIR para nanopartículas de óxido de zinc (ZnO). Dando como resultados las siguientes características:

- **Pico ancho alrededor de 3400 cm⁻¹ - 3600 cm⁻¹:** Esta área suele indicar la presencia de vibraciones de estiramiento O-H, que pueden provenir de agua adsorbida o grupos hidroxilo en la superficie de la nanopartícula.
- **Pico alrededor de 1600 cm⁻¹:** A menudo se atribuye al modo de flexión de las moléculas de agua (flexión H-O-H), lo que sugiere que hay agua presente en la superficie de la muestra.
- **Picos alrededor de 500 cm⁻¹ - 700 cm⁻¹:** Estos picos se asocian comúnmente con las vibraciones de estiramiento Zn-O, que son características de las nanopartículas de ZnO.

Otros picos menores pueden representar contaminantes orgánicos o subproductos residuales del proceso de síntesis, dependiendo de la preparación de la muestra.

4.1.3. Caracterización de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas

Se determinaron las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual municipales de San Agustín de Cajas, dando como resultados lo mencionado en el informe de ensayo N° 1-0027/24 (ver anexo 3) y el cual se encuentra organizado en la tabla 3.

Tabla 3. Características físicas y microbiológicas del agua residual municipal

Parámetros	Resultados	Unidades
pH	6,7	Unidades de pH
Conductividad eléctrica	850	uS/cm
Temperatura	17,4	°C
Turbidez	70,3	NTU
TSD	410	mg/L
DQO	408,383	mg/L
Coliformes totales	17000	NMP/100 mL

La Tabla 3 revela que los niveles de coliformes totales y demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales municipales exceden los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). De acuerdo con esta normativa, los límites máximos permisibles (LMP) son de 10,000 NMP/100 mL para coliformes totales y 200 mg/L para DQO. Estos resultados evidencian que la calidad del efluente no cumple con los estándares ambientales exigidos, lo que podría representar un riesgo para el ecosistema y la salud pública.

4.1.4. Resultados de la concentración final y % de remoción de materia orgánica

Después de realizar los experimentos de fotocátalisis en las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas, se obtuvieron los resultados detallados en los informes de ensayo N°1-0031/24 y N°1-0038/24, correspondientes a las réplicas I y II, respectivamente. Con estos valores, se calculó el promedio, cuyos resultados se presentan en la tabla 4, además de ello se calculó el porcentaje de remoción aplicando la siguiente formula:

$$\% \text{ remoción} = \frac{D_i - D_f}{D_i} \times 100$$

Tabla 4. Concentración final de DQO en aguas residuales municipales

Tratamiento	Masa NP ZnO (g)	Rad UV (W/m ²)	Tiempo (min)	DQO (mg/L)	DQO (%)
T01	0,25	15	60	82,74	79,49
T02	0,25	15	90	72,07	82,13
T03	0,25	15	120	55,76	86,18
T04	0,5	15	60	54,01	86,61
T05	0,5	15	90	32,70	91,90
T06	0,5	15	120	26,94	93,32
T07	1	15	60	49,31	87,78
T08	1	15	90	30,95	92,33
T09	1	15	120	25,75	93,61
T10	1,5	15	60	42,08	89,56
T11	1,5	15	90	35,12	91,29

T12	1,5	15	120	28,11	93,03
T13	0,25	36	60	38,64	90,42
T14	0,25	36	90	32,00	92,07
T15	0,25	36	120	23,77	94,11
T16	0,5	36	60	35,07	91,30
T17	0,5	36	90	29,61	92,66
T18	0,5	36	120	21,55	94,66
T19	1	36	60	30,35	92,47
T20	1	36	90	20,82	94,84
T21	1	36	120	14,78	96,34
T22	1,5	36	60	22,57	94,41
T23	1,5	36	90	18,43	95,43
T24	1,5	36	120	13,18	96,73

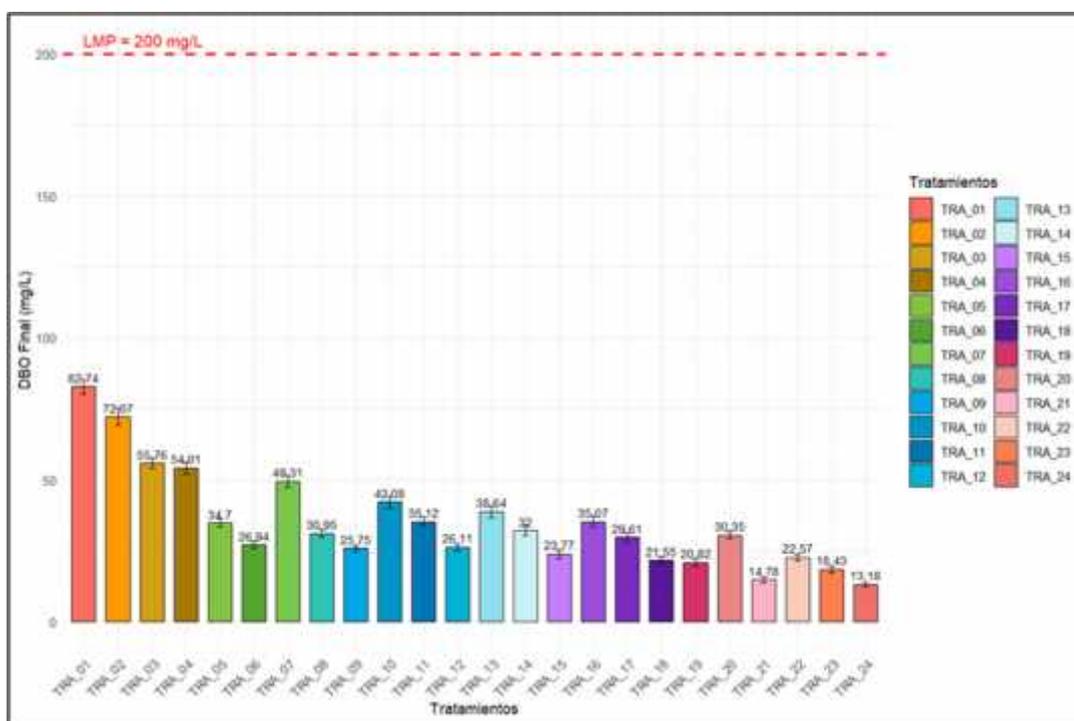
La tabla 4 se muestra cómo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua residual se ve afectada por diferentes combinaciones de masa de nanopartículas de ZnO, radiación UV, y tiempo de exposición. Inicialmente, para una radiación UV de 15 W, se observa que al aumentar la masa de NP-ZnO de 0,25 g a 1,5 g y extender el tiempo de exposición de 60 a 120 minutos, la DQO disminuye considerablemente. Por ejemplo, con 0,5 g de ZnO, la DQO se reduce de 54,01 mg/L a 26,94 mg/L al pasar de 60 a 120 minutos, lo que sugiere que tanto el aumento de masa de NP-ZnO como el tiempo de exposición son factores cruciales para mejorar la eficiencia del tratamiento.

Cuando se incrementa la radiación UV a 36 W/m², la reducción de la DQO es aún más significativa en comparación con 15 W/m². Por ejemplo, con 1 g de NP-ZnO y 120 minutos de

exposición, la DQO baja a 14,78 mg/L, en contraste con 25,75 mg/L bajo la misma masa de NP-ZnO, pero con 15 W/m² de radiación UV. Este patrón se repite en todas las combinaciones de masa y tiempo, lo que indica que una radiación UV más alta es más efectiva para descomponer los contaminantes en presencia de NP-ZnO.

Entonces podemos decir que, el tratamiento con nanopartículas de ZnO bajo radiación UV demostró ser altamente efectivo para reducir tanto la DQO en aguas residuales y que los mejores resultados se lograron con la combinación de una mayor masa de NP-ZnO (1,5 g), mayor radiación UV (36 W/m²), y mayor tiempo de exposición (120 minutos), sugiriendo que este método es viable para aplicaciones que requieren una eliminación significativa de contaminantes en el agua residual.

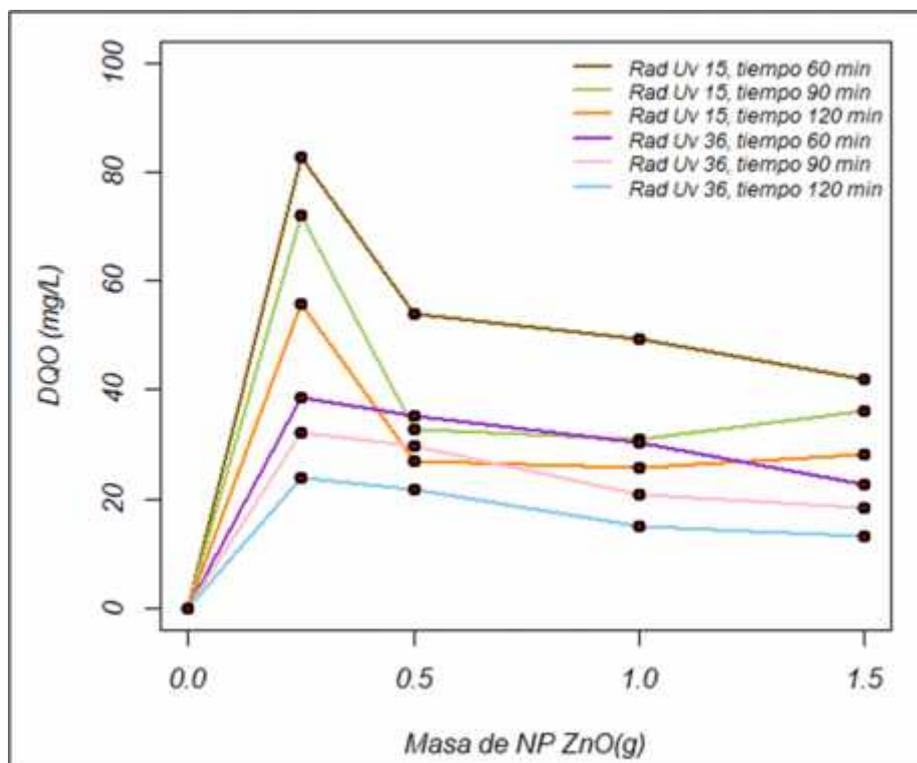
Figura 7. Concentración final de DQO



La Figura 7 presenta la desviación estándar de la DQO final, expresada en mg/L, para diferentes tratamientos que combinan diversas masas de nanopartículas de óxido de zinc (NP-ZnO), niveles de radiación UV y tiempos de exposición. Se observa que los tratamientos que utilizan mayores masas de NP-ZnO, junto con niveles elevados de radiación UV y tiempos de exposición prolongados, como los tratamientos 24 y 23, muestran una DQO final más baja. Esto indica una mayor eficacia en la reducción de la DQO. Por otro lado, los tratamientos con menores masas de NP-ZnO y niveles reducidos de radiación UV, especialmente aquellos con tiempos de exposición cortos (tratamientos 1 y 2), presentan DQO finales más altas, lo que

sugiere que son menos efectivos en la remoción de contaminantes orgánicos. Además, es importante destacar que todos los tratamientos se encuentran por debajo del límite máximo permisible (LMP) para la DQO establecido en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM.

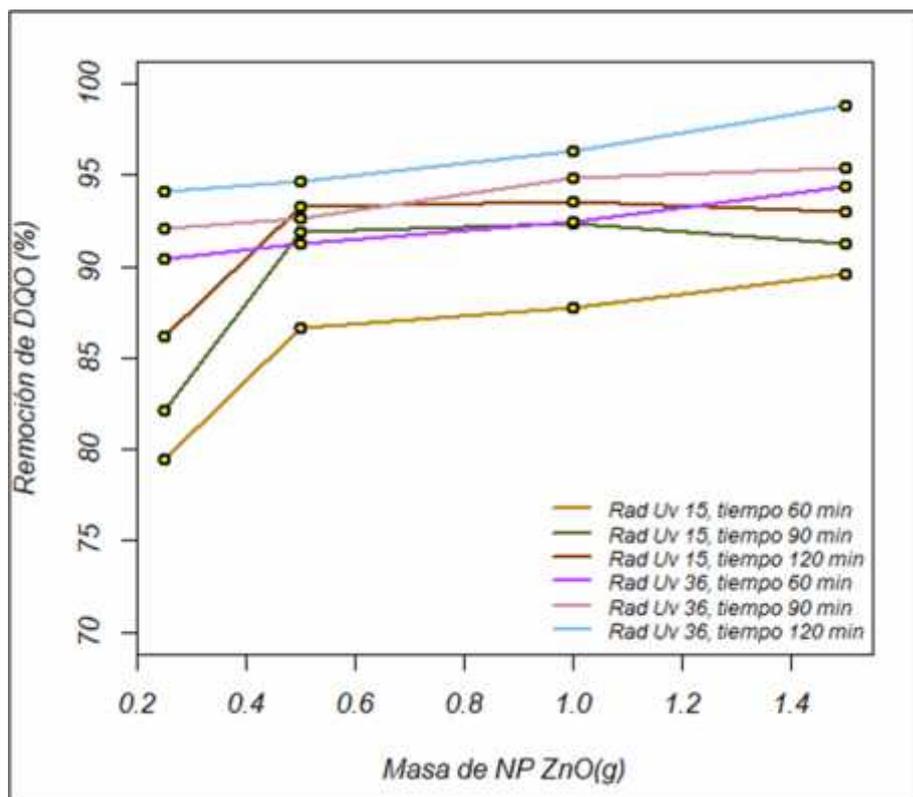
Figura 8. Remoción de DQO



La figura 8 ilustra cómo la masa de nanopartículas de ZnO, la radiación UV y el tiempo de exposición afectan la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua residual. En general, se observa que a medida que aumenta la masa de ZnO, la DQO disminuye, lo que indica que una mayor cantidad de NP-ZnO mejora la eficiencia en la reducción de contaminantes. Además, la radiación UV más alta (36 W/m^2) resulta consistentemente más efectiva en la disminución de la DQO en comparación con la radiación UV de 15 W/m^2 , especialmente cuando se combina con tiempos de exposición prolongados.

Un punto destacado es que los tiempos de exposición más largos (90 minutos y 120 minutos) son más efectivos para reducir la DQO, independientemente del nivel de radiación UV. En conjunto, la figura sugiere que para lograr una mayor remoción de DQO, es más efectivo emplear una mayor masa de NP-ZnO, junto con una radiación UV intensa y un tiempo de exposición adecuado.

Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO



La figura 9 muestra la relación entre la remoción de DQO y la masa de nanopartículas de ZnO bajo diferentes niveles de radiación UV (15 W/m² y 36 W/m²) y tiempos de tratamiento (60 minutos, 90 minutos y 120 minutos). A medida que aumenta la masa de NP-ZnO, se observa una mejora en la remoción de DQO, especialmente con radiación UV de 36 W/m², que alcanza porcentajes cercanos al 99%. La radiación UV 15 muestra un incremento más moderado, estabilizándose alrededor del 90% en tiempos más largos. En general, la radiación UV de 36 W/m² resulta más efectiva que la de 15 W/m² para tiempos equivalentes.

4.1.5. Resultados de la concentración final y % de eliminación de microorganismos

Después de realizar los experimentos de fotocátalisis en las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas, se obtuvieron los resultados de concentración de microorganismos, los cuales se detallan en los informes de ensayo N°1-0031/24 y N°1-0038/24, correspondientes a las réplicas I y II, respectivamente. A partir de estos valores, se calculó el promedio, cuyos resultados se presentan en la tabla 5. Además, se determinó el porcentaje de eliminación utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ e } \text{ lim } = \frac{C_i \cdot C_f - C_i \cdot C_i}{C_i \cdot C_i - C_i \cdot C_i} \times 100$$

Tabla 5. Concentración final de coliformes totales en aguas residuales municipales

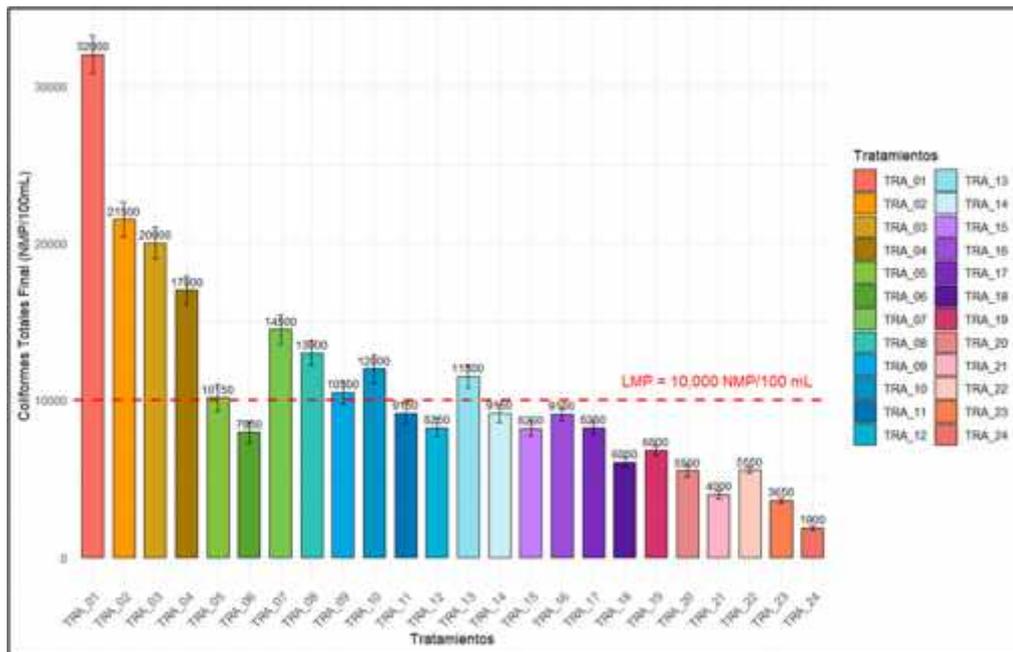
Tratamiento	Masa NP ZnO (g)	Rad UV (W/m²)	Tiempo (min)	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Coliformes totales (%)
T01	0,25	15	60	32000,00	80,00
T02	0,25	15	90	21500,00	86,56
T03	0,25	15	120	20000,00	87,50
T04	0,5	15	60	17000,00	89,38
T05	0,5	15	90	10150,00	93,66
T06	0,5	15	120	7950,00	95,03
T07	1	15	60	14500,00	90,94
T08	1	15	90	13000,00	91,88
T09	1	15	120	10500,00	93,44
T10	1,5	15	60	12000,00	92,50
T11	1,5	15	90	9150,00	94,28
T12	1,5	15	120	8250,00	94,84
T13	0,25	36	60	11500,00	92,81
T14	0,25	36	90	9150,00	94,28
T15	0,25	36	120	8200,00	94,88

T16	0,5	36	60	9100,00	94,31
T17	0,5	36	90	8250,00	94,84
T18	0,5	36	120	6050,00	96,22
T19	1	36	60	6800,00	95,75
T20	1	36	90	5550,00	96,53
T21	1	36	120	4000,00	97,50
T22	1,5	36	60	5550,00	96,53
T23	1,5	36	90	3650,00	97,72
T24	1,5	36	120	1900,00	98,81

La tabla 5 muestra la reducción de coliformes totales en agua residual al variar la masa de nanopartículas de ZnO, la radiación UV y el tiempo de exposición. En general, se observa que al aumentar la masa de NP-ZnO y prolongar el tiempo de exposición, disminuye significativamente el número de coliformes. Esto es particularmente evidente con la mayor masa de NP-ZnO (1,5 g) y tiempos más largos (120 minutos), donde los valores de coliformes totales se reducen drásticamente, especialmente bajo la radiación UV de 36 W/m², alcanzando un mínimo de 1900 NMP/100 mL.

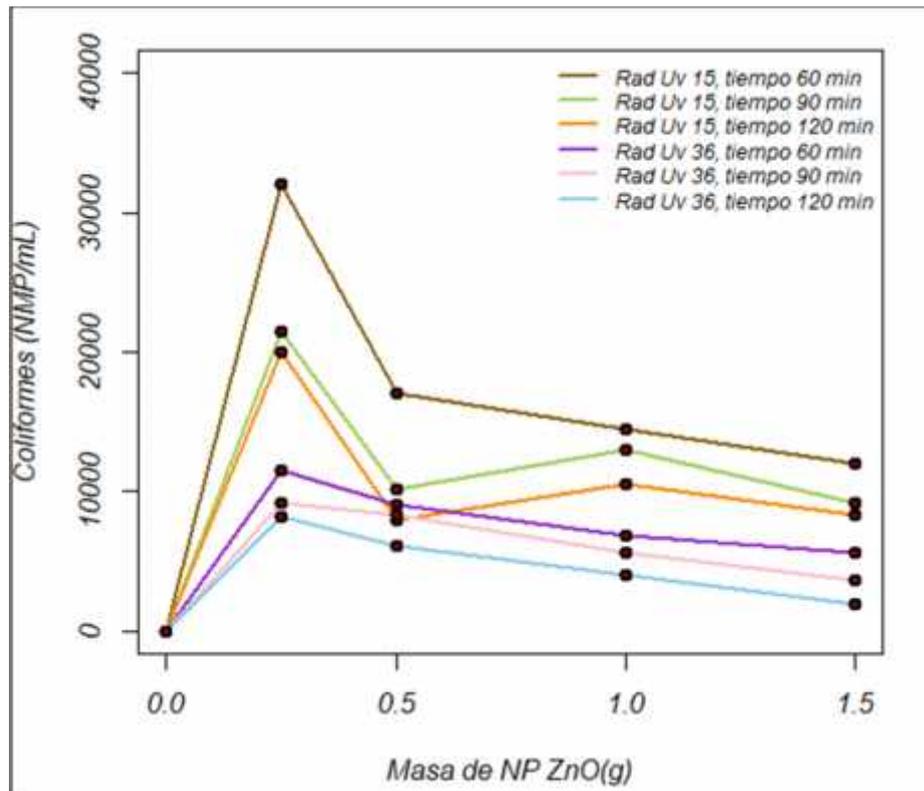
Además, la radiación UV de 36 W/m² muestra una mayor efectividad en la eliminación de coliformes en comparación con la de 15 W/m², especialmente con mayores tiempos de exposición. En resumen, la combinación de una mayor masa de NP-ZnO, mayor radiación UV y tiempos prolongados es la más efectiva para la reducción de coliformes totales en agua residual, lo que indica que estos parámetros son cruciales para optimizar el proceso de desinfección.

Figura 10. Concentración final de coliformes totales



La figura 10 muestra la desviación estándar de coliformes totales en diferentes para diferentes tratamientos que combinan distintas masas de NP-ZnO, niveles de radiación UV y tiempos de exposición, cada uno representado por una barra de color distinto. Se observa que el tratamiento 1 tiene el valor más alto de coliformes totales (32000 NMP/100mL), mientras que el tratamiento 24 muestra el valor más bajo (1900 NMP/100mL). Por lo que se puede decir que los tratamientos con mayor masa de NP-ZnO, mayor radiación UV y tiempos de exposición más prolongados tienen mejores resultados. Además, según la línea roja que indica el Límite Máximo Permissible (LMP) para coliformes totales establecido en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, permite menciona que los tratamientos del 1 al 6 tienen valores de coliformes por encima del LMP, lo que sugiere que no cumplen con el estándar. En cambio, los tratamientos del 7 al 24 se encuentran por debajo o cerca de este límite, siendo el tratamiento 24 el más bajo con 1900 NMP/100 mL.

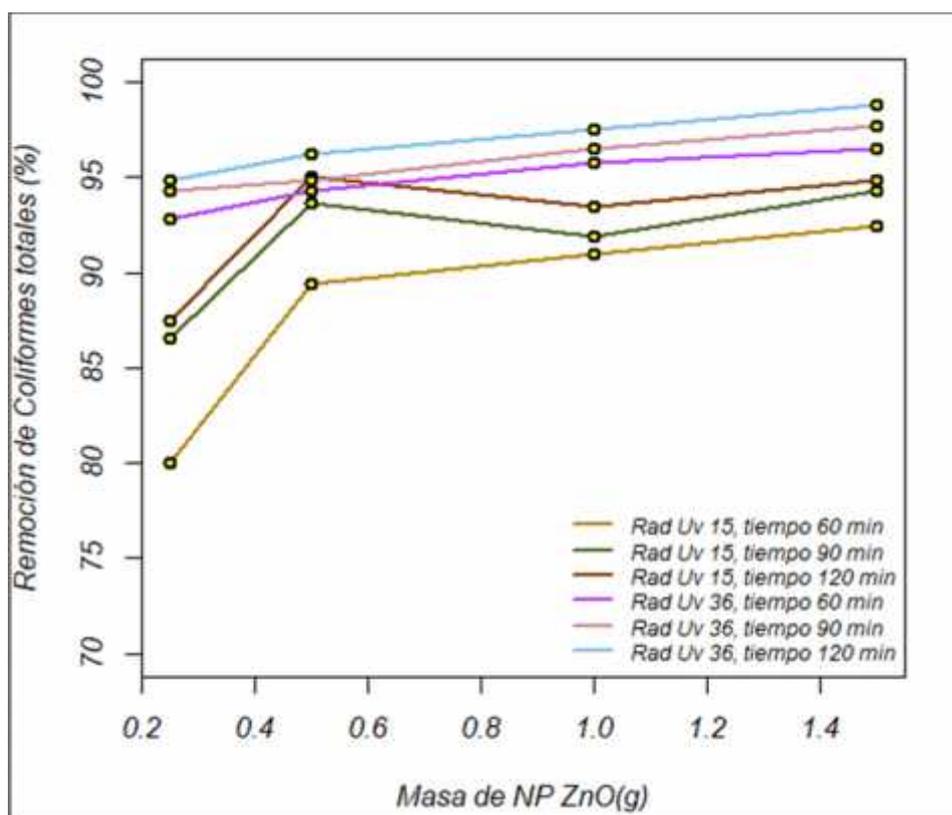
Figura 11. Eliminación de coliformes termo tolerantes



La figura 11 muestra la eliminación de coliformes totales en función de la masa de nanopartículas de óxido de zinc (NP-ZnO) utilizada, bajo diferentes condiciones de radiación UV y tiempo de exposición. Se presentan seis curvas que corresponden a dos niveles de radiación UV (15 W/m^2 y 36 W/m^2) y tres tiempos de exposición (60 minutos, 90 minutos, y 120 minutos) para cada nivel de radiación.

En general, se observa que a medida que aumenta la masa de NP-ZnO, la cantidad de coliformes totales disminuye, lo que indica una mayor eficiencia en la eliminación de coliformes. Además, las curvas muestran que las condiciones de radiación UV más altas (36 W/m^2) y los tiempos de exposición más largos tienden a ser más efectivos en la reducción de coliformes, especialmente cuando se emplea una mayor cantidad de NP-ZnO. Esto destaca la importancia de optimizar tanto la masa de NP-ZnO como las condiciones de radiación para lograr una eliminación eficaz de coliformes.

Figura 12. Porcentaje de eliminación de coliformes totales



La figura 12 muestra el porcentaje de eliminación de coliformes totales en función de la masa de nanopartículas de óxido de zinc (NP-ZnO) utilizada, bajo diferentes condiciones de radiación UV y tiempo de exposición. Se presentan seis curvas correspondientes a dos niveles de radiación UV (15 W/m² y 36 W/m²) y tres tiempos de exposición (60 minutos, 90 minutos y 120 minutos) para cada nivel de radiación. En general, se observa que la remoción de coliformes aumenta con la masa de NP-ZnO hasta un punto de saturación, donde la remoción tiende a estabilizarse cerca del 100%. Comparando las diferentes curvas, se puede ver que mayores niveles de radiación UV (Rad UV 36 W/m²) y tiempos de exposición más prolongados tienden a mejorar la eficiencia de remoción de coliformes, especialmente cuando se usa una mayor cantidad de NP-ZnO (0,8 g). Sin embargo, a masas de NP-ZnO más bajas, se observa una mayor variabilidad en la remoción de coliformes, destacando que la combinación de 15 de radiación UV y 60 minutos de exposición presenta la menor eficiencia inicial. Esto sugiere que tanto la cantidad de NP-ZnO como las condiciones de radiación UV y tiempo son factores críticos para optimizar la remoción de coliformes en el proceso estudiado.

4.1.6. Comparación del mejor tratamiento

Se estructuró una tabla que organiza los resultados iniciales y finales, así como los valores del LMP según la normativa peruana, con el fin de facilitar la evaluación del impacto del tratamiento de aguas residuales utilizando nanopartículas de ZnO.

Tabla 6. Resultados finales del tratamiento con NP-ZnO

Parámetros	Concentración inicial	Concentración final	LMP - Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM
DQO (mg/L)	408,383	13,18	200
Coliformes totales (NMP/100 mL)	17000	1900	10000

Según la tabla 6 el tratamiento de fotocatalisis con nanopartículas de ZnO en las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas mostró resultados positivos en la reducción de dos parámetros clave: la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los coliformes totales. La concentración inicial de DQO en las aguas residuales fue de 408,383 mg/L, y después de aplicar el tratamiento con una masa de 1,5 g de NP-ZnO, durante 120 minutos y con una radiación UV de 36 W/m², la concentración final disminuyó a 13,18 mg/L. Este valor es significativamente inferior al límite máximo permisible (LMP) establecido por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, que es de 200 mg/L, indicando una notable eficacia en la eliminación de materia orgánica presente en el agua tratada.

En cuanto a los coliformes totales, la concentración inicial fue de 17,000 NMP/100 mL, y después del tratamiento, se redujo a 1,900 NMP/100 mL. Este valor también se encuentra por debajo del LMP establecido por la normativa peruana, que es de 10,000 NMP/100 mL, demostrando la efectividad del proceso fotocatalítico con NP-ZnO en la eliminación de microorganismos patógenos. En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento de aguas residuales con nanopartículas de ZnO cumple con los estándares ambientales y presenta un alto potencial para la depuración de aguas residuales municipales.

4.1.7. Isotherma de adsorción

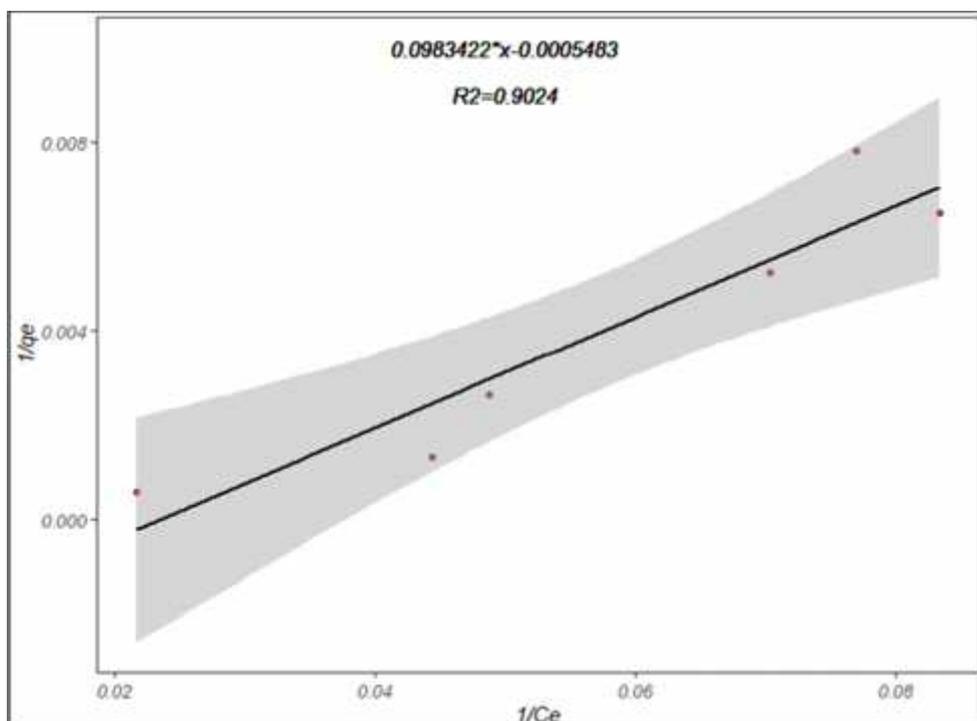
La isoterma de adsorción se determinó con 6 masas de nanopartículas de ZnO, tiempo de 120 minutos y un volumen de 0,5 L. Dando como resultados la tabla 7, a partir de los cálculos mencionados en el anexo 4.

Tabla 7. Concentración de DQO para isoterma

Masa de NP de ZnO (g)	DQO
0,1	46,03
0,25	22,55
0,5	20,52
1	14,22
1,25	12,01
1,5	13

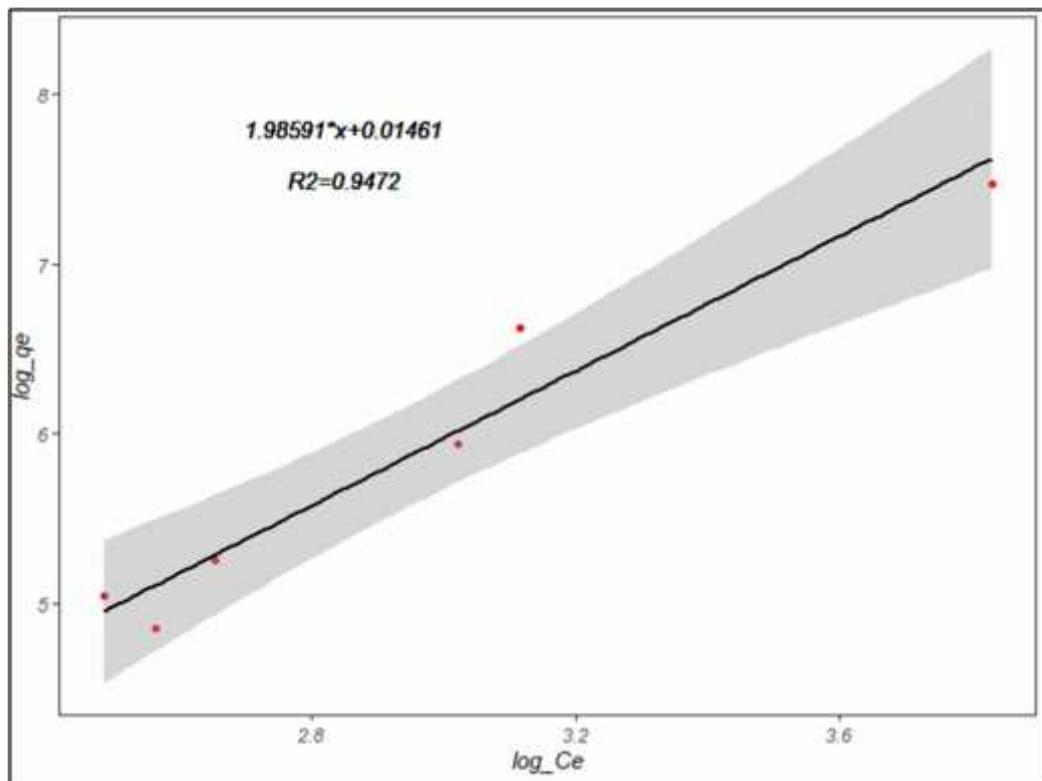
Con estos valores se realizó cálculos en el programa R y realizando la linealización de las Isothermas se obtuvo como resultados las siguientes figuras.

Figura 13. Isotherma de Langmuir



La figura 13 muestra el ajuste lineal realizado para la Isoterma Langmuir dando una ecuación de $0,0983422X-0,0005483$ y un coeficiente de correlación de 0,9024. Además, se sabe que el valor de la pendiente es igual a $(1/q_{max} \cdot b)$ y la ordenada es igual a $1/q_{max}$. De esta manera se determina que la capacidad máxima de adsorción del NP-ZnO (q_{max}) que fue de 1823,81 mg/g y la constante de equilibrio de adsorción (b) de 0,00557 L/mg.

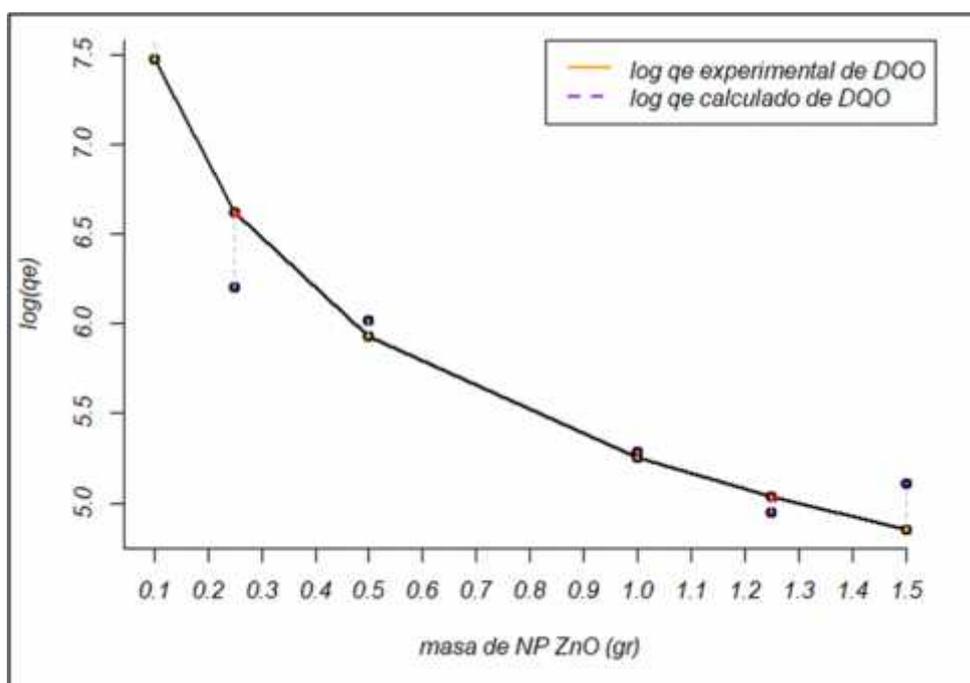
Figura 14. Isoterma de Freundlich



La Figura 14 presenta el ajuste lineal realizado para la isoterma de Freundlich, obteniendo una ecuación de $1,98591X+0,01461$ y un coeficiente de correlación de 0,9472. Dado que el valor de la pendiente corresponde a $1/n$ y la ordenada al origen es igual $\text{Log}K_f$, se determinó que la constante de adsorción de Freundlich K_f es 1,034 mg/g y la intensidad de adsorción n es 0,5035.

En resumen, considerando que la isoterma que mejor se ajusta al estudio es aquella con un coeficiente de correlación más cercano a 1, se puede concluir que la isoterma de Freundlich es la más adecuada para describir el comportamiento de las nanopartículas de ZnO en el tratamiento de aguas residuales municipales.

Figura 15. Corroboración de la isoterma de Freundlich



La figura 15 verifica la isoterma de Freundlich para la remoción de DQO en función de la masa de nanopartículas de ZnO, mostrando que la cantidad de DQO adsorbida por gramo de NP-ZnO disminuye al aumentar la masa de adsorbente. Las curvas, que representan valores experimentales y calculados de $\log(q_e)$, se ajustan bien, lo que indica que el modelo de Freundlich describe adecuadamente la adsorción en este sistema. Aunque hay pequeñas desviaciones en algunos puntos, en general, el ajuste es satisfactorio, lo que respalda la validez del modelo para este proceso.

4.1.8. Cinética de adsorción

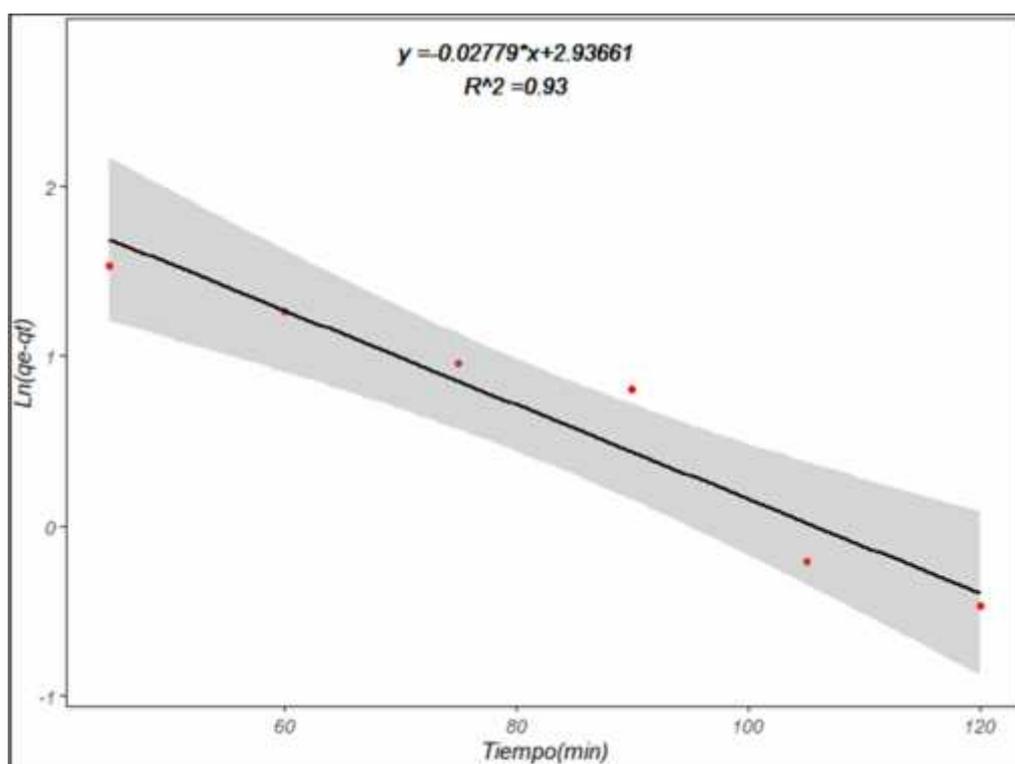
La cinética de adsorción se determinó con 6 tiempos, 1,5g de masas de nanopartículas de ZnO y un volumen de 0,5 L. Dando como resultados la tabla 8, a partir de los cálculos mencionados en el anexo 5.

Tabla 8. Concentración de DQO para isoterma

Tiempo (min)	DQO
45	24,975
60	21,718
75	18,946
90	17,814
105	13,551
120	12,999

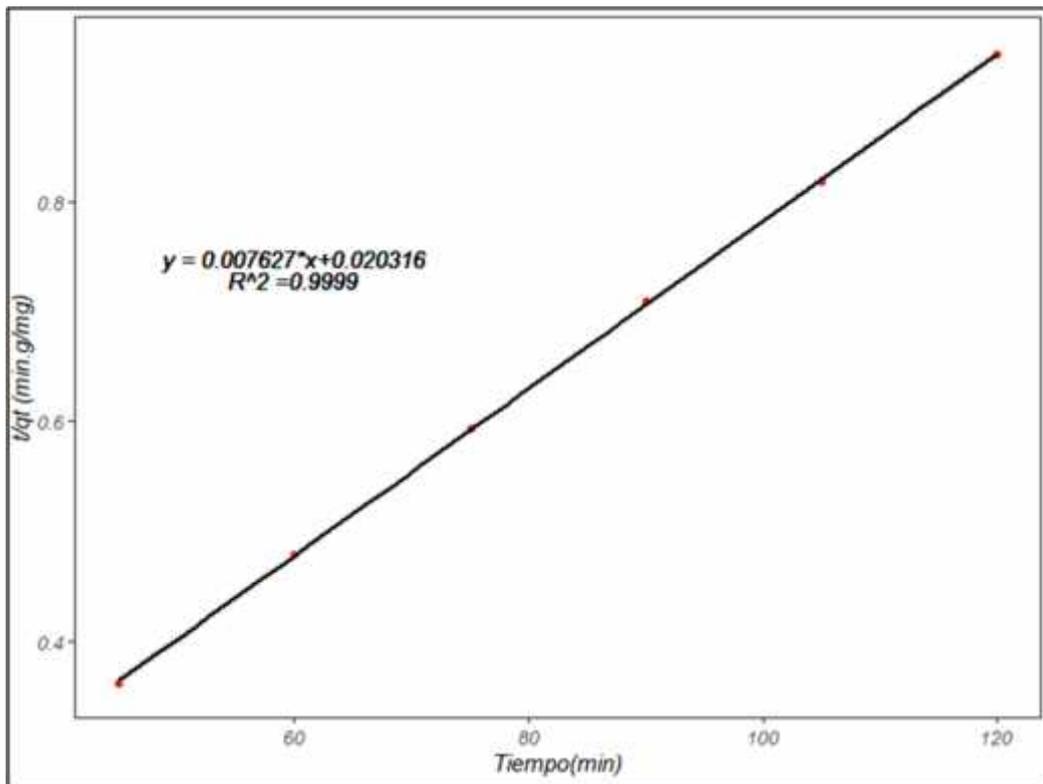
Con estos valores se realizó cálculos en el programa R y realizando la linealización de las Isotermas se obtuvo como resultados las siguientes figuras.

Figura 16. Cinética de pseudo primer orden



En la figura 16 presenta el ajuste lineal realizado para la cinética de pseudo primer orden, obteniendo una ecuación de $-0,02779X + 2,93661$ y un coeficiente de correlación de 0,93. Dado que el valor de la pendiente corresponde a $-k_1$ y la ordenada es $\ln(q_e)$, se determinó que la cantidad de DQO adsorbido en el equilibrio fue 18,851 mg/g, la constante de velocidad experimental fue $0,02779 \text{ min}^{-1}$.

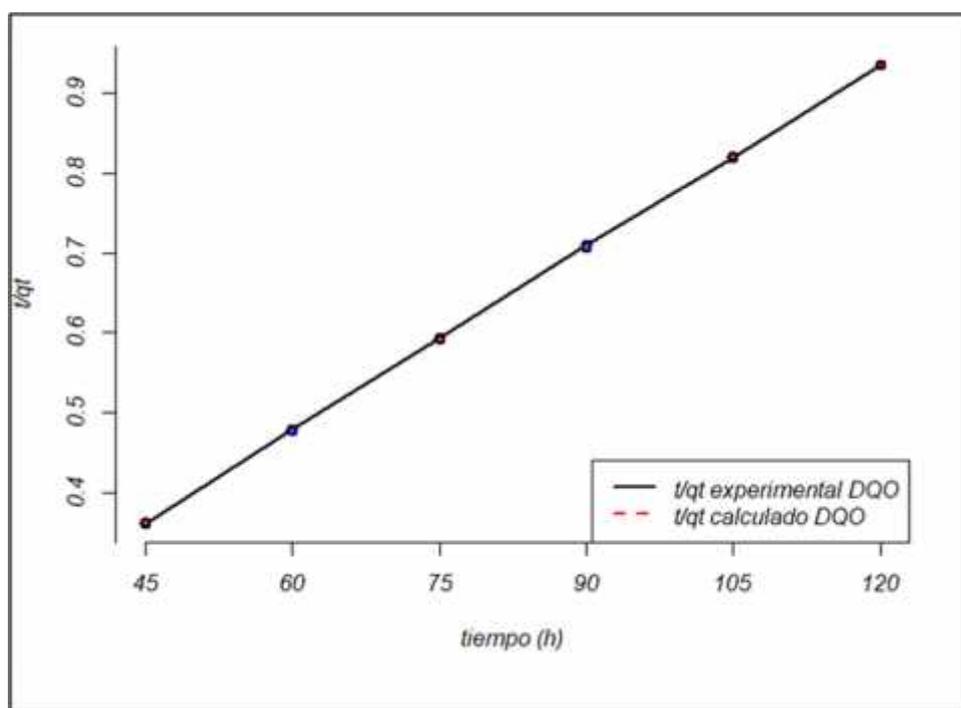
Figura 17. Cinética de pseudo segundo orden



En la figura 17 presenta el ajuste lineal realizado para la cinética de pseudo segundo orden, obteniendo una ecuación de $0,007627X + 0,020316$ y un coeficiente de correlación de 0,9999. Dado que el valor de la pendiente corresponde a $1/q_e$ y la ordenada es $\frac{1}{k_d q_e}$, se determinó que la cantidad de DQO adsorbido en el equilibrio fue 131,11 mg/g, la constante de velocidad experimental fue $0,00286 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$.

En resumen, considerando que la cinética que mejor se ajusta al estudio es aquella con un coeficiente de correlación más cercano a 1, se puede concluir que la cinética de pseudo segundo orden es la más adecuada para describir el comportamiento de las nanopartículas de ZnO en el tratamiento de aguas residuales.

Figura 18. Corroboración de la cinética de pseudo segundo orden



La figura 18 muestra la comprobación de la cinética de pseudo segundo orden para la DQO (Demanda Química de Oxígeno). En el eje y se presenta el valor de t/qt , mientras que en el eje x está el tiempo en horas. La línea negra representa los valores experimentales de t/qt de la DQO, mientras que la línea roja discontinua representa los valores calculados. Ambas líneas coinciden casi completamente, lo que indica un buen ajuste del modelo cinético de pseudo segundo orden con los datos experimentales, validando que el proceso de absorción sigue esta cinética.

4.2. Mecanismo de reacción

El mecanismo empleado por el proceso de fotocatalisis con nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) para la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y la eliminación de coliformes en aguas residuales, es la siguiente:

Cuando el ZnO se expone a la luz ultravioleta (UV), los fotones con suficiente energía excitan los electrones (e^- de la banda de valencia, promoviendo su movimiento hacia la banda de conducción (1) .Esto genera un par electrón-hueco ($e^- h^+$ donde:

- El electrón (e^-) pasa a la banda de conducción.
- El hueco (h^+) queda en la banda de valencia.



Los electrones y huecos generados son especies muy reactivas que desencadenan una serie de reacciones con el oxígeno y el agua presentes en el sistema, generando especies reactivas de oxígeno (ROS), como radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y superóxido ($\text{O} \bullet^-$) que son agentes altamente oxidantes. (1)

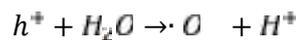
- **Formación de radicales superóxidos:**

Los electrones en la banda de conducción reaccionan con el oxígeno disuelto (O_2) formando radicales superóxidos ($\text{O} \bullet^-$):



- **Formación de radicales hidroxilos:**

Los huecos en la banda de valencia reaccionan con moléculas de agua (H_2O) o iones hidroxilo (OH^-) generando radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$):



4.2.1. Remoción de materia orgánica

La remoción de materia orgánica se da a partir de los radicales obtenidos en las reacciones anteriores como hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y superóxido ($\text{O} \bullet^-$) los cuales atacan los contaminantes orgánicos presentes en el agua, oxidándolos hasta productos menos complejos, como CO_2 y H_2O . Este proceso reduce la DQO, ya que disminuye la cantidad de materia orgánica en el agua. (1)

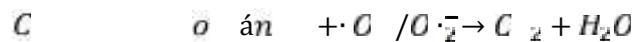
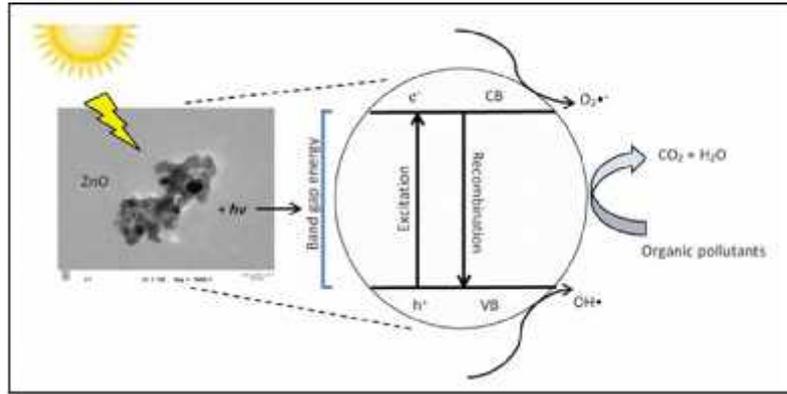


Figura 19. Mecanismo de degradación de contaminantes orgánicos



Tomado de Boon, Chin (1)

La figura 19 detalla de forma más explícita lo mencionado anteriormente del proceso de fotocatalisis en las nanopartículas de ZnO. En esta figura se observa cómo la luz UV incide sobre las nanopartículas, haciendo que los fotones con energía suficiente (igual o superior a la del "band gap" o banda prohibida) sean absorbidos por el ZnO. Esta energía absorbida excita electrones (e^- desde la banda de valencia (VB) hacia la banda de conducción (CB), dejando huecos (h^+ en la banda de valencia. (1)

Los electrones en la banda de conducción reaccionan con el oxígeno molecular (O_2 del ambiente, generando radicales superóxidos ($O_2^{\bullet -}$). A su vez, los huecos en la banda de valencia reaccionan con moléculas de agua (H_2O) o iones hidroxilo (OH^-) para producir radicales hidroxilos (OH^{\bullet}). Estas especies reactivas de oxígeno ($O_2^{\bullet -}$ y OH^{\bullet}) atacan los contaminantes orgánicos presentes en el agua, oxidándolos y transformándolos en dióxido de carbono (CO_2 y agua (H_2O), lo cual se representa en el diagrama con una flecha que señala hacia estos productos finales. (1)

4.2.2. Eliminación de microorganismos

Para la eliminación de microorganismos las especies reactivas de oxígeno ($\bullet OH$ y $O_2^{\bullet -}$ pueden dañar las estructuras celulares de los microorganismos, como las paredes y membranas celulares, proteínas y ácidos nucleicos. Este daño oxidativo provoca la inactivación o muerte de los coliformes y otros microorganismos patógenos presentes en el agua residual.(49)

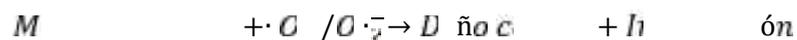
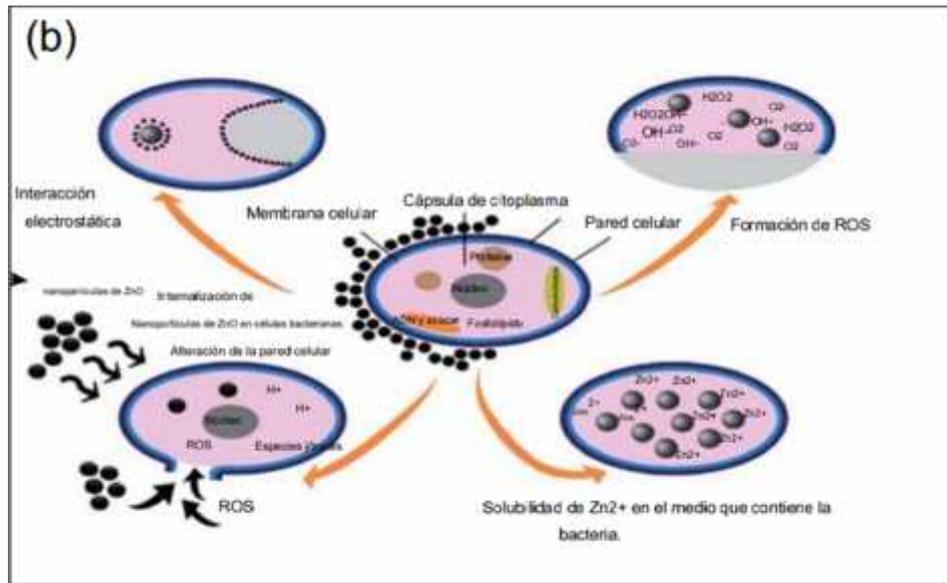


Figura 20. Mecanismos de eliminación de bacterias



Tomado de Sirelkhatim, Amna (49)

De manera más detallada la figura 20 da a conocer lo mencionado anteriormente ya que la figura muestra el mecanismo de acción de las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en la destrucción de bacterias mediante interacciones electrostáticas, generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y liberación de iones Zn^{2+} en el medio bacteriano. En primer lugar, las nanopartículas de ZnO se acercan a la superficie de las bacterias debido a una interacción electrostática, adhiriéndose a la membrana celular y, en muchos casos, penetrándola. Este contacto inicial causa una alteración de la pared celular, afectando su integridad y facilitando la entrada de las nanopartículas. (49)

Una vez dentro de la célula, las nanopartículas de ZnO generan ROS en el citoplasma, como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) el superóxido ($O_2^{\bullet-}$) y los radicales hidroxilos ($\bullet OH$). Estas especies reactivas causan daño oxidativo a componentes celulares críticos, como el ADN, las proteínas y los fosfolípidos, lo que resulta en la inactivación de proteínas, mutación del ADN y daño en la membrana citoplasmática, llevando a la muerte celular. Además, en la superficie de la pared celular, las nanopartículas de ZnO inducen la formación de ROS al interactuar con moléculas de oxígeno en el ambiente, generando daño directo en la pared celular y aumentando su permeabilidad. (49)

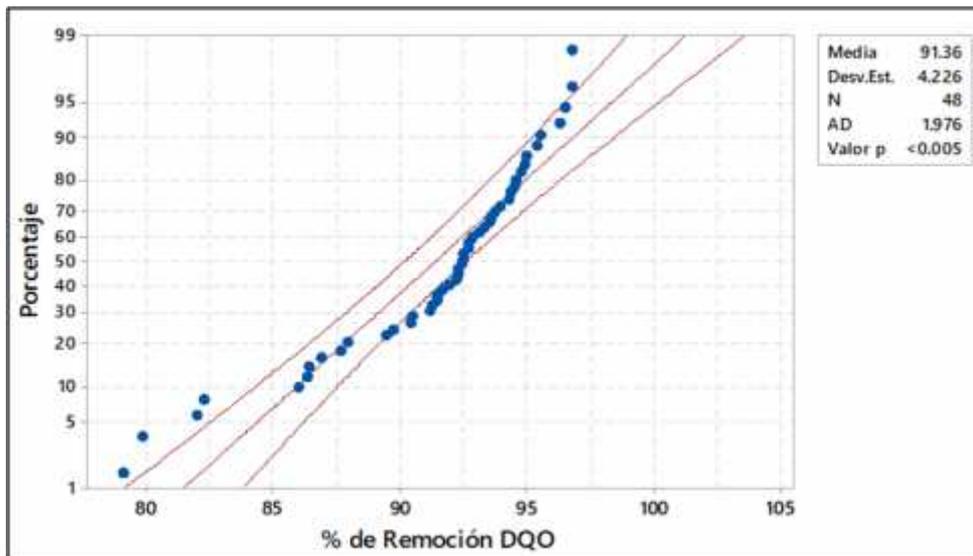
Por otro lado, las nanopartículas de ZnO pueden disolverse parcialmente en el medio, liberando iones Zn^{2+} . Estos iones penetran en la célula bacteriana, alterando procesos bioquímicos esenciales como la síntesis de proteínas y el equilibrio iónico, lo que contribuye a su toxicidad y favorece la muerte celular. En conjunto, la acción de las nanopartículas de ZnO combina efectos físicos y químicos, que dañan tanto la estructura externa como los procesos internos de las bacterias, resultando en un mecanismo eficaz para su eliminación.

4.3. Análisis estadístico para la prueba de hipótesis

4.3.1. Prueba de normalidad

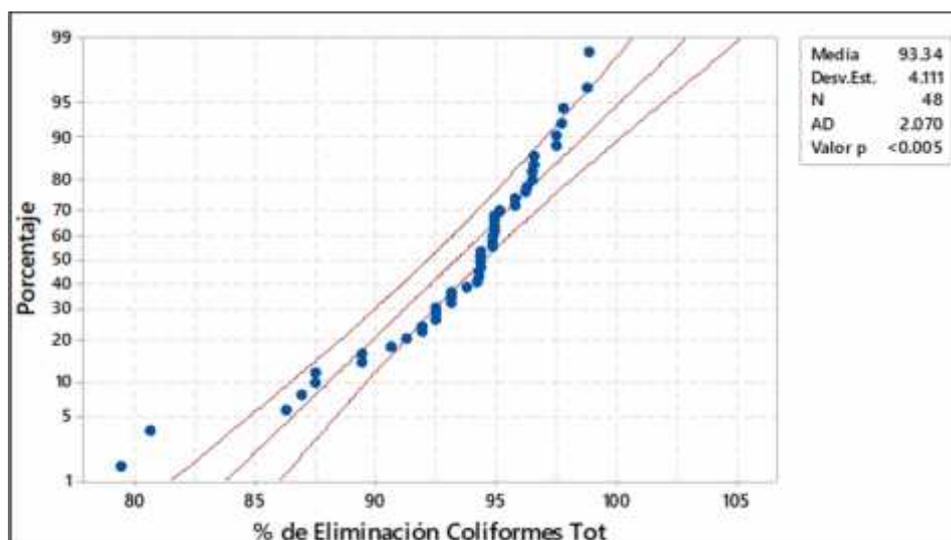
Se llevó a cabo una prueba de normalidad para evaluar si los datos presentan una distribución normal, un requisito esencial para la aplicación de muchos métodos estadísticos.

Figura 21. Prueba de normalidad de DQO



La Figura 21 muestra el análisis de probabilidad normal del porcentaje de remoción de DQO. En este gráfico, los puntos representan los datos individuales, mientras que la línea central roja indica la tendencia esperada bajo una distribución normal. A pesar de que los datos siguen una tendencia aproximada a la normalidad, el valor p (<0.005) indica que no cumplen con esta distribución con un nivel de significancia del 95%. Los parámetros calculados incluyen una media de 91.36%, una desviación estándar de 4.226, un total de 48 observaciones y un valor de Anderson-Darling (AD) de 1.976. Debido a estos resultados, se determina la necesidad de aplicar un análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

Figura 22. Prueba de normalidad de coliformes totales



La Figura 22 presenta el análisis de probabilidad normal del porcentaje de eliminación de coliformes totales. Similar al caso anterior, los puntos reflejan los datos individuales y la línea roja representa la tendencia esperada bajo una distribución normal. Aunque los datos se aproximan a la normalidad, el valor p (<0.005) confirma que no siguen esta distribución con un nivel de confianza del 95%. Los parámetros obtenidos incluyen una media de 93.34%, una desviación estándar de 4.111, un total de 48 observaciones y un valor de Anderson-Darling (AD) de 2.070. Dado que los datos no cumplen con la normalidad, se concluye que el análisis debe realizarse mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

4.3.2. Contrastación de hipótesis

4.3.2.1. Hipótesis general

H₀: El tratamiento con nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativamente en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

H_a: El tratamiento con nanopartículas de ZnO tiene un significativamente en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 9. Kruskal Wallis para DQO y coliformes interacciones de variables

	Chi-squared	p-value
MasaNP ZnO*tiempo*radiaciónUV	23,00	0,0468

La tabla 9 revela que el análisis de Kruskal-Wallis arroja un valor de p de 0,0468, que es inferior al nivel de significancia estándar de 0,05. Esto indica la existencia de diferencias significativas entre los grupos analizados, en función de la interacción de las tres variables: la masa de NP-ZnO, el tiempo y la radiación UV. Por lo tanto, se sugiere que esta interacción tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta, que en este caso se refiere a la remoción de DQO y la eliminación de coliformes. En consecuencia, las combinaciones de estos factores afectan de manera notable en los resultados obtenidos. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

4.3.2.2. Hipótesis específicas

A. Hipótesis específica 1

H0: La masa de nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 10. Kruskal Wallis para DQO y masa de nanopartículas de ZnO

	Chi-squared	p-value
Masa NP ZnO	5,7	0,01272

La Tabla 10 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre la masa de nanopartículas de ZnO y la remoción de DQO. La estadística de chi-cuadrado es 5,7, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,01272 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la remoción de DQO según la masa de las nanopartículas. Esto implica que la cantidad de masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en los resultados de remoción de DQO. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

B. Hipótesis específica 2

H0: La masa de nanopartículas de ZnO no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 11. Kruskal Wallis para coliformes totales y masa de nanopartículas de ZnO

	Chi-squared	p-value
Masa NP ZnO	6,0379	0,01098

La Tabla 11 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre la masa de nanopartículas de ZnO y la eliminación de coliformes totales. La estadística de chi-cuadrado es 6,0379, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,01098 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la eliminación de coliformes según la masa de las nanopartículas. Esto implica que la cantidad de masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en los resultados de eliminación de coliformes. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

C. Hipótesis específica 3

H0: El tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 12. Kruskal Wallis para DQO y tiempo de contacto

	Chi-squared	p-value
Tiempo de contacto	6,48	0,03916

La Tabla 12 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre el tiempo de contacto y la remoción de DQO. La estadística de chi-cuadrado es 6,48, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,03916 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la remoción de DQO según el tiempo de contacto. Esto implica que el tiempo de contacto tiene un efecto

significativo en los resultados de remoción de DQO. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

D. Hipótesis específica 4

H0: El tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 13. Kruskal Wallis para coliformes totales y tiempo de contacto

	Chi-squared	p-value
Tiempo de contacto	2,8875	0,0236

La Tabla 13 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre el tiempo de contacto y la eliminación de coliformes totales. La estadística de chi-cuadrado es 2,8875, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,0236 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la eliminación de coliformes según el tiempo de contacto. Esto implica que el tiempo de contacto tiene un efecto significativo en los resultados de eliminación de coliformes. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

E. Hipótesis específica 5

H0: La radiación UV no tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Ha: La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 14. Kruskal Wallis para DQO y radiación UV

	Chi-squared	p-value
Radiación UV	8,67	0,003235

La Tabla 14 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre la radiación UV y la remoción de DQO. La estadística de chi-cuadrado es 8,67, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,003235 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la remoción de DQO según la radiación UV. Esto implica que la cantidad de radiación UV tiene un efecto significativo en los resultados de remoción de DQO. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

F. Hipótesis específica 6

H0: La radiación UV no tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

H0: La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Tabla 15. Kruskal Wallis para coliformes totales y radiación UV

	Chi-squared	p-value
Radiación UV	12,016	0,0005276

La Tabla 15 muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis respecto a la relación entre la radiación UV y la eliminación de coliformes totales. La estadística de chi-cuadrado es 12,016, lo que indica variación notable entre los grupos analizados. El p-value de 0,0005276 es inferior al umbral de 0,05, lo que sugiere diferencias estadísticamente significativas en la eficacia de la eliminación de coliformes según la radiación UV. Esto implica que la radiación UV tiene un

efecto significativo en los resultados de eliminación de coliformes. A la luz de lo anterior, se aprueba la hipótesis alternativa.

4.4. Discusión de resultados

4.4.1. Efecto de la masa de nanopartículas de ZnO

En el estudio de la remoción de DQO y coliformes totales mediante el uso de ZnO en el tratamiento de aguas residuales municipales, se observó una clara correlación entre la cantidad de ZnO utilizada y la eficiencia del proceso. Los resultados muestran que el uso de 1,5 g de ZnO permitió una remoción de DQO del 96,73%, reduciendo la concentración inicial de 408,03 mg/L a 13,18 mg/L. Además, la eliminación de coliformes totales fue igualmente significativa, alcanzando un 98,81% de eliminación, disminuyendo su concentración de 17000 NMP/100 mL a 1900 NMP/100 mL.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Kanakaraju et al. (2019), quienes demostraron que el incremento en la concentración de ZnO mejora la eficiencia en la remoción de DQO en diferentes tipos de efluentes. En su investigación, concentraciones de hasta 3 g/L de ZnO bajo irradiación UV permitieron reducir el DQO en un 95%. Aunque nuestro estudio utilizó una menor concentración de ZnO (1,5 g), los resultados fueron igualmente efectivos, lo que puede atribuirse a la mayor exposición a la radiación UV (36 W) y el tiempo de tratamiento (120 minutos), optimizando la activación del fotocatalizador.

Comparando con otros estudios, como el de Uribe López (2018), en el que se evaluó la capacidad fotocatalítica de materiales compuestos de ZnO, se observa que una mayor masa de fotocatalizador conduce a una mayor mineralización de compuestos orgánicos como el fenol. En nuestro caso, la mayor masa de ZnO incrementó la disponibilidad de sitios activos para la reacción, lo que favoreció tanto la degradación de materia orgánica como la inactivación de microorganismos. Esta tendencia también fue corroborada por Hallak et al. (2023), quienes destacaron la eficacia antimicrobiana del ZnO, especialmente bajo condiciones de radiación UV, que mejoran la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), contribuyendo a la eliminación de bacterias.

A pesar de los resultados positivos, es importante destacar que el uso de mayores concentraciones de ZnO podría incrementar los costos del tratamiento. Por ello, investigaciones futuras deberían centrarse en optimizar la dosis de ZnO para maximizar la eficiencia del tratamiento sin comprometer la viabilidad económica del proceso.

4.4.2. Efecto del tiempo de contacto

En este estudio, los mejores resultados de tratamiento para las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas se obtuvieron con un tiempo de contacto de 120 minutos, logrando una remoción del 96,73% en la DQO y una eliminación del 98,81% de coliformes totales. La reducción significativa de ambos parámetros destaca la importancia del tiempo de exposición en los tratamientos fotocatalíticos y otros procesos avanzados. Estos resultados son consistentes con lo reportado en diversos estudios, donde el tiempo de exposición y la concentración de catalizadores juegan un papel crítico en la eficacia del proceso.

La remoción de la DQO desde 408,03 mg/L a 13,18 mg/L muestra una alta eficiencia del tratamiento, superando los límites establecidos por las normativas locales (200 mg/L, Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM). Esto es congruente con investigaciones como las de Kanakaraju et al. (2019), quienes lograron reducciones del 90%-95% en la DQO usando fotocátalisis de ZnO en tratamientos aireados y no aireados. En ambos casos, el tiempo de exposición prolongado y el uso de fotocatalizadores adecuados son factores claves para alcanzar estos niveles de degradación.

En cuanto a la eliminación de coliformes totales, la reducción de 17000 NMP/100 mL a 1900 NMP/100 mL supera el estándar normativo de 10000 NMP/100 mL, subrayando la efectividad del tratamiento. Esto se correlaciona con estudios como el de Soto López (2018), quien demostró que el uso de fotocatalizadores con plata en condiciones de radiación UV incrementó significativamente la inactivación de coliformes totales, alcanzando un 93,2% en 2 horas de tratamiento. De manera similar, Terreros Castro (2022) encontró que, con un catalizador de TiO₂ a una concentración de 0,06 g/L y un tiempo de exposición de 6 horas, se logró una reducción de coliformes totales del 98%, lo que respalda la influencia directa del tiempo de contacto prolongado.

Es relevante destacar que, en muchos casos, la eficiencia del tratamiento no solo depende del tiempo de exposición, sino también de las condiciones experimentales, como la concentración de catalizadores, el pH, y la radiación aplicada. Por ejemplo, en el estudio de Huanca Villanes (2019), la concentración de H₂O₂ y el tiempo de tratamiento fueron determinantes para la degradación de contaminantes, mientras que Kanakaraju et al. (2017) demostraron que la fotocátalisis solar de TiO₂ fue más eficaz en la remoción de DQO en condiciones óptimas de concentración y pH.

4.4.3. Efecto de la radiación UV

En el presente estudio, se evaluó el impacto de la radiación UV en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes totales en las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas. Los mejores resultados se obtuvieron utilizando una radiación UV de 36 W, que permitió una notable reducción en la concentración de DQO, pasando de 408,03 mg/L a 13,18 mg/L, lo que representa una eficiencia de remoción del 96,73%. Esta remoción es considerablemente mayor en comparación con estudios previos, como el de Kanakaraju et al. (2019), quienes lograron una reducción del 90% al 95% de la DQO utilizando una concentración de 3 g/L de ZnO en condiciones aireadas y no aireadas.

Adicionalmente, en términos de coliformes totales, se observó una remoción del 98,81%, reduciendo la concentración inicial de 17000 NMP/100 mL a 1900 NMP/100 mL. Este resultado es superior al reportado por Soto López (2018), donde la inactivación de coliformes utilizando plata alcanzó un 93,2% tras 2 horas de tratamiento bajo radiación UV-A. La elevada eficiencia de remoción en este estudio puede atribuirse a la mayor potencia de la fuente de radiación UV (36 W frente a 8 W utilizados en estudios previos).

Además, estos resultados no solo cumplen con los límites legales establecidos por el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, que fija un máximo de 10000 NMP/100 mL para coliformes totales y 200 mg/L para DQO, sino que los superan ampliamente, garantizando un agua tratada de alta calidad. Otros estudios, como el de Nguyen et al. (2020), destacan la eficacia de la fotocatalisis asistida por ZnO para la eliminación de materia orgánica disuelta, logrando una eliminación total del 95,45% en 3 horas de irradiación, lo cual respalda la viabilidad del uso de ZnO y radiación UV en el tratamiento de aguas residuales.

CONCLUSIONES

El tratamiento con nanopartículas de ZnO demostró una alta efectividad en la reducción de contaminantes de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas. Los resultados muestran que la interacción entre la masa de nanopartículas de ZnO, el tiempo de contacto y la radiación UV influye de manera significativa en la remoción de la DQO y la eliminación de coliformes totales, con reducciones del 96,73% y 98,81%, respectivamente. El análisis estadístico confirma que el tratamiento es significativamente efectivo, validando la ya mencionado.

La masa de nanopartículas de ZnO influye significativamente en la reducción de materia orgánica, representada por la DQO. Los análisis estadísticos ($p\text{-value} = 0,01272$) confirman que mayores cantidades de nanopartículas (1,5 g) son más efectivas, reduciendo la DQO en un 96,73%.

La masa de nanopartículas de ZnO también afecta significativamente la reducción de microorganismos, en particular los coliformes totales ($p\text{-value} = 0,01098$). Las nanopartículas redujeron la cantidad de coliformes en un 98,81%, mostrando una alta eficacia en la eliminación de microorganismos patógenos.

El tiempo de contacto influye de manera significativa en la reducción de materia orgánica. Un tiempo de exposición de 120 minutos contribuyó a una remoción de DQO, lo que se refleja en los resultados estadísticos con un $p\text{-value}$ de 0,03916.

El tiempo de contacto también afecta significativamente la reducción de microorganismos ($p\text{-value} = 0,0236$), con tiempos de contacto más prolongados (120 minutos) generando una eliminación más eficiente de coliformes totales.

La radiación UV tiene un impacto considerable en la reducción de materia orgánica, con un $p\text{-value}$ de 0,003235, demostrando que el uso de 36 W/m^2 de radiación UV resultó en una remoción eficiente ya que se obtuvieron concentraciones finales de DQO de 13,18 mg/L.

La radiación UV también influye significativamente en la eliminación de microorganismos. Los resultados ($p\text{-value} = 0,0005276$) muestran que la radiación UV de 36 W/m^2 redujo los coliformes totales hasta una concentración final de 1900 NMP/100 MI, confirmando su eficacia como tratamiento complementario en la eliminación de microorganismos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar más diferentes niveles de radiación para encontrar una relación costo-beneficio más favorable, reduciendo el consumo de energía sin comprometer la eficiencia de la remoción.

Se recomienda implementar pruebas adicionales que utilicen fotocatalizadores, explorando la sinergia con la radiación UV para mejorar la degradación de compuestos orgánicos y la eliminación de microorganismos patógenos.

Es recomendable realizar estudios adicionales que evalúen pH y H₂O₂, para optimizar las condiciones del proceso y maximizar la eficiencia de la fotocatálisis en la remoción de DQO y coliformes totales.

Sería conveniente realizar estudios de escalado que evalúen la viabilidad de aplicar este tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales a mayor escala. Además, se recomienda probar este método en distintos tipos de aguas residuales (industriales, agrícolas, etc.) para evaluar su aplicabilidad en diversos contextos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BOON, Chin, Law YONG a Abdul WAHAB. A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts : Synthesis , mechanisms and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **81**(March 2017), 536–551. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.08.020
- (2) LARIOS MEOÑO, Fernando, Carlos GONZALES TARANCO a Yennyfer MORALES OLIVARES. Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL*. 2015, **2**, 9–25.
- (3) LONG, Zeqing, Qiangang LI, Ting WEI, Guangming ZHANG a Zhijun REN. Historical development and prospects of photocatalysts for pollutant removal in water. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2020, **395**(March), 122599. ISSN 0304-3894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122599
- (4) SUN, Yue, Wei ZHANG, Qun LI, Huijie LIU a Xiaolei WANG. Preparations and applications of zinc oxide based photocatalytic materials. *Advanced Sensor and Energy Materials* [online]. 2023, **2**(3), 100069. ISSN 2773-045X. Dostupné z: doi:10.1016/j.asems.2023.100069
- (5) LAID, N., N. BOUANIMBA, A. BEN AHMEDE, A. TOURECHE a T. SEHILI. Characterization of ZnO and TiO₂ Nanopowders and their Application for Photocatalytic Water Treatment. *Acta Physica Polonica A* [online]. 2020, **137**(3), 305–312. Dostupné z: doi:10.12693/APhysPolA.137.305
- (6) CUYOTUPA NUÑEZ, Clous Lysen. *Diseño y construcción de un reactor biológico aerobio para la remoción de la carga orgánica a escala de laboratorio de las aguas residuales domésticas del distrito de san Agustín de cajas Huancayo*. B.m., 2017. b.n.
- (7) MUNICIPALIDAD DE SAN AGUSTIN DE CAJAS. *Elaboración del Plan de Desarrollo Urbano- Distrito de San Agustín de Cajas, Huancayo-Junín (Tercer entregable)*. 2021.
- (8) AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. *Resolución No1002-2017-ANA/TNRCH*. 2017.
- (9) FERNANDEZ HUAMAN, Tania a Jolek MUÑOZ TEJADA. *Tecnologías Fotocatalíticas para su Aplicación Práctica en la Remediación de Efluentes Generados*

- por el Molino de Aceite de Palma: Revisión Sistemática. *Universidad Cesar Vallejo* [online]. 2022, 1–118. Dostupné z: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- (10) HUANCA, Yanett. Aplicación del método de descomposición fotocatalítica utilizando nanopartículas de óxido de zinc para el tratamiento de aguas residuales. *Universidad Nacional del Centro del Perú* [online]. 2023, 1–69. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8991>
- (11) ORELLANA, Jorge. Tratamiento De Las Aguas. *Ingeniería Sanitaria- UTN - FRRO* [online]. 2015, 1–123. Dostupné z: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf
- (12) FUENTES, Rosa, José RAMOS, María JIMÉNEZ a Mario ESPARZA. Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del valle de Toluca mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica*. 2015, **31**(3), 253–264.
- (13) ANDUEZA, Félix Daniel a El AGUA. Microbiología del agua. *Universidad de los Andes Merida*. 2014.
- (14) GALINDO-GUZMÁN, Alma Patricia, Manuel FORTIS-HERNÁNDEZ, Claudia Verónica DE LA ROSA-RETA, Héctor ZERMEÑO-GONZÁLEZ a Magdalena GALINDO-GUZMÁN. Chemical synthesis of zinc oxide nanoparticles and their evaluation in *Lactuca sativa* seedlings. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [online]. 2022, **13**(28 Special Issue), 299–308. ISSN 20079230. Dostupné z: [doi:10.29312/remexca.v13i28.3284](https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284)
- (15) URIBE LÓPEZ, Melina del Carmen. *Estudio de las propiedades fotocatalíticas de nanopartículas de ZnO-ZrO₂ en la degradación de contaminantes orgánicos*. B.m., 2018. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- (16) HUANCA VILLANES, Yanett del Pilar. *Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocátalisis heterogénea*. B.m., 2019. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- (17) SOTO LÓPEZ, Luis Miguel. *Eficiencia de la Fotocatálisis con Plata (Ag) para la*

Inactivación de Coliformes Totales Presente en Agua de Pozo del AA.HH Márquez Ubicado en la Provincia Callao-2018. B.m., 2018. Universidad César Vallejo.

- (18) TERREROS CASTRO, Jessica Mary. *Análisis de la influencia de la fotocatalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales en las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja*. B.m., 2022. Universidad Continental.
- (19) KANAKARAJU, Devagi, Marvis SAKAI, Yahya SOON a Pang WONG. Removal of chemical oxygen demand from agro effluent by ZnO photocatalysis and photo Fenton. *SN Applied Sciences* [online]. 2019, **1**(7), 1–10. ISSN 2523-3971. Dostupné z: doi:10.1007/s42452-019-0782-z
- (20) ADISHKUMAR, S., S. KANMANI a J. Rajesh BANU. Solar photocatalytic treatment of phenolic wastewaters : influence of chlorides , sulphates , aeration , liquid volume and solar light intensity [online]. 2014, **3994**, 1944–3986. Dostupné z: doi:10.1080/19443994.2013.834522
- (21) KANAKARAJU, Devagi, Nurul Liyana BINTI AHMAD, Noorfaezah Binti MOHD SEDIK, Sylvester Gan HSIEN LONG, Tay MENG GUAN a Lim YING CHIN. Performance of solar photocatalysis and photo-fenton degraatation of palm oil mill effluent. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* [online]. 2017, **21**(5), 996–1007. Dostupné z: doi:10.17576/mjas-2017-2105-01
- (22) NGUYEN, Thao Thi, Seong Nam NAM, Jungryul KIM a Jeill OH. Photocatalytic degradation of dissolved organic matter under ZnO unlight irradiation system. *Scientific Reports* [online]. 2020, **10**(13090), 1–12. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-020-69115-7
- (23) BAKARSIDIK, D. A., N. H. HAYATI HAIROM, A. IKHMAL ROZMAN, M. J. SHAQILI JOHARI a A. MUHAMMAD. The Photocatalytic Activity of Green Zinc Oxide Nanoparticles in The Treament of Aerobically Palm Oil Mill Effluent. *Journal of Science and Thechnology* [online]. 2023, **15**(1), 7–15. Dostupné z: doi:10.30880/jst.2023.15.01.002
- (24) HALLAK, Mohamad Al, Thomas VERDIER, Alexandra BERTRON, Kevin CASTELLÓ, Ons El ATTI, Katia FAJERWERG, Pierre FAU, Julie HOT, Christine ROQUES, Mohamad Al HALLAK, Thomas VERDIER, Alexandra BERTRON, Kevin Castelló LUX, Ons El ATTI, Katia FAJERWERG, Pierre FAU, Julie HOT, Christine ROQUES a Jean-denis BAILLY. Comparison of Photocatalytic Biocidal Activity of

TiO₂ , ZnO and Au / ZnO on Escherichia coli and on Aspergillus niger under Light Intensity Close to Real-Life Conditions To cite this version : HAL Id : hal-04175329
Light Intensity Close to Real-Life Cond. *Hal open science* [online]. 2023, **13**(7), 1139.
Dostupné z: doi:10.3390/catal13071139

- (25) OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales. 2014, 42.
- (26) CASTELLANOS DÍEZ, Héctor. *Tratamiento De Aguas Residuales Sintéticas Mediante Fotocatálisis Y Procesos De Oxidación Avanzados*. B.m., 2019. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriale.
- (27) ANIYIKAIYE, Tolulope E., Temilola OLUSEYI, John O. ODIYO a Joshua N. EDOKPAYI. Physico-Chemical Analysis of Wastewater Discharge from Selected Paint Industries in Lagos , Nigeria. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2019, **16**(7). Dostupné z: doi:10.3390/ijerph16071235
- (28) ROBERT PULLÉS, Marlen. Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en cuba. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 2014, **45**(1), 25–36.
- (29) ARUN, Jayaseelan, S. NACHIAPPAN, Goutham RANGARAJAN, Ram ALAGAPPAN PRASATH, K.P. GOPINATH a Eric LICHTFOUSE. Synthesis and application of titanium dioxide photocatalysis for energy , decontamination and viral disinfection : a review. *Environmental Chemistry Letters* [online]. 2023, **21**(1), 339–362. ISSN 1610-3661. Dostupné z: doi:10.1007/s10311-022-01503-z
- (30) PURI, Nidhi a Anjali GUPTA. Water remediation using titanium and zinc oxide nanomaterials through disinfection and photo catalysis process : A review. *Environmental Research* [online]. 2023, **227**(March), 115786. ISSN 0013-9351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2023.115786
- (31) BELVER, Carolina, Jorge BEDIA, Almudena GÓMEZ-AVILÉS, Manuel PEÑAS-GARZÓN a Juan J. RODRIGUEZ. Semiconductor Photocatalysis for Water Purification. *In Nanoscale Materials in Water Purification* [online]. 2019, 581–651. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-813926-4.00028-8
- (32) ZANGENEH, H., A. A. L. ZINATIZADEH, M. HABIBI, M. AKIA a M. Hasnain ISA. Journal of Industrial and Engineering Chemistry Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides : A comparative review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2015,

26, 1–36. ISSN 1226-086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2014.10.043

- (33) NGUYEN, Van-huy, Shawn D LIN, Jeffrey Chi-sheng WU a Hsunling BAI. Artificial sunlight and ultraviolet light induced photo-epoxidation of propylene over V-Ti / MCM-41 photocatalyst. *Beilstein J. Nanotechnol* [online]. 2014, **5**(5), 566–576. Dostupné z: doi:10.3762/bjnano.5.67
- (34) GE, Ming, Zheng HU, Jilun WEI, Quanbao HE a Zhangxing HE. Recent advances in persulfate-assisted TiO₂-based photocatalysis for wastewater treatment_ Performances, mechanism and perspectives. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2021, **888**, 161625. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2021.161625
- (35) LÓPEZ-LÓPEZ, Juan, Armando TEJEDA-OCHOA, Ana LÓPEZ-BELTRÁN, José HERRERA-RAMÍREZ a Perla MÉNDEZ-HERRERA. Sunlight Photocatalytic Performance of ZnO Nanoparticles Synthesized by Green Chemistry Using Different Botanical Extracts and Zinc Acetate as a Precursor. *Molecules* [online]. 2022, **27**(6). Dostupné z: doi:10.3390/molecules27010006
- (36) TAIE, Moayede, Abdolmajid FADAEI, Mehraban SADEGHI, Sara HEMATI a Gashtasb MARDANI. Comparison of the Efficiency of Ultraviolet / Zinc Oxide (UV/ ZnO) and Ozone / Zinc Oxide (O₃/ZnO) Techniques as Advanced Oxidation Processes in the Removal of Trimethoprim from Aqueous Solutions. *International Journal of Chemical Engineering* [online]. 2021, 11. Dostupné z: doi:10.1155/2021/9640918
- (37) SAMADI, Morasae, Mohammad ZIRAK, Amene NASERI, Elham KHORASHADIZADE a Alireza Z MOSHFEGH. Recent progress on doped ZnO nanostructures for visible-light photocatalysis. *Thin Solid Films* [online]. 2016, **605**, 2–19. ISSN 0040-6090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2015.12.064
- (38) GOWTHAMBABU, V., A. BALAMURUGAN, R. DHIVYA, S. SATHEESHKUMAR a S. S. KANMANI. ZnO nanoparticles as efficient sunlight driven photocatalyst prepared by solution combustion method involved lime juice as biofuel. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* [online]. 2021, **258**, 119857. ISSN 1386-1425. Dostupné z: doi:10.1016/j.saa.2021.119857
- (39) SARAVANAN, R, Vinod Kumar KUMAR, V NARAYANAN a A STEPHEN. Comparative study on photocatalytic activity of ZnO prepared by different methods. *Journal of Molecular Liquids* [online]. 2013, **181**, 133–141. ISSN 0167-7322. Dostupné z: doi:10.1016/j.molliq.2013.02.023

- (40) SINGH, Th Abhishek, Joydeep DAS a Parames C. SIL. Zinc oxide nanoparticles: A comprehensive review on its synthesis, anticancer and drug delivery applications as well as health risks. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2020, **286**, 102317. ISSN 00018686. Dostupné z: doi:10.1016/j.cis.2020.102317
- (41) RAHA, Sauvik a Md. AHMARUZZAMAN. ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances* [online]. 2022, **4**(8), 1868–1925. ISSN 25160230. Dostupné z: doi:10.1039/d1na00880c
- (42) WARDHANI, Sri, Danar PURWONUGROHO, Cholidatul Widya FITRI a Yuniar Ponco PRANANTO. Effect of pH and irradiation time on TiO₂-chitosan activity for phenol photo-degradation. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2021, **050009**(2018), 1–7. Dostupné z: doi:10.1063/1.5062759
- (43) ROCK, Channah a Berenise RIVERA. La Calidad del Agua, E. coli y su Salud. *The University of Arizona - College of Agriculture and Life Sciences - Cooperative Extension*. 2014, (March), 1–5.
- (44) ALIKHANI, Mohammad Yousef, Seung Mok LEE, Jae Kyu YANG, Mehdi SHIRZAD-SIBONI, Hadi PEERI-DOGAHEH, Masoud Seyedin KHORASANI, Mohammad Ali NOOSHAK a Mohammad Reza SAMARGHANDI. Photocatalytic removal of Escherichia coli from aquatic solutions using synthesized ZnO nanoparticles: A kinetic study. *Water Science and Technology* [online]. 2013, **67**(3), 557–563. ISSN 02731223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2012.593
- (45) ÑAUPAS PAITÁN, Humberto, Marcelino Raúl VALDIVIA DUEÑAS, Jesús Josefa PALACIOS VILELA a Hugo Eusebio ROMERO DELGADO. *No Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Quinta. 2018. ISBN 9789587628760.
- (46) HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto a Christian Paulina MENDOZA TORRES. *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Primera. 2018. ISBN 9781456260965.
- (47) LIU, Hsuan-liang a Thomas C. YANG. Photocatalytic inactivation of Escherichia coli and Lactobacillus helveticus by ZnO and TiO₂ activated with ultra violet light. *Process Biochemistry* [online]. 2003, **39**(4), 475–481. Dostupné z: doi:10.1016/S0032-9592(03)00084-0

- (48) BERRUTI, Ilaria, Nuno P. F. GONÇALVES, Paola CALZA, Maria Cristina PAGANINI, Isabel OLLER a Maria Inmaculada POLO LÓPEZ. Chemosphere Natural solar activation of modified zinc oxides with rare earth elements (Ce , Yb) and Fe for the simultaneous disinfection and decontamination of urban wastewater [online]. 2022, **303**(February). Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135017
- (49) SIRELKHATIM, Amna, Shahrom MAHMUD, Azman SEENI, Noor Haida Mohamad KAUS, Ling Chuo ANN, Siti Khadijah Mohd BAKHORI, Habsah HASAN a Dasmawati MOHAMAD. Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters* [online]. 2015, **7**(3), 219–242. ISSN 21505551. Dostupné z: doi:10.1007/s40820-015-0040-x

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia

Título: Evaluación de las nanopartículas de Oxido de Zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.

Formulación del problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicadores	Metodología
<p><u>Problema General</u></p> <p>¿Cuál será el efecto del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p><u>Problemas Específicos</u></p> <p>¿Cuál será el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p>¿Cuál será el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de</p>	<p><u>Objetivo General</u></p> <p>Determinar el efecto del tratamiento con nanopartículas de ZnO en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p><u>Objetivos Específicos</u></p> <p>Determinar el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>Determinar el efecto de la masa de nanopartículas de ZnO en la reducción de</p>	<p><u>Hipótesis General</u></p> <p>El tratamiento con nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de contaminantes de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p><u>Hipótesis Específicas</u></p> <p>La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p>	<p><u>Variable Dependiente</u></p> <p>Materia orgánica</p> <p>Microorganismos</p> <p><u>Variables Independientes</u></p>	<p>Concentración de DQO</p> <p>Concentración de coliformes totales</p>	<p><u>Tipo de investigación:</u></p> <p>Aplicada, debido a que se busca una solución practica del problema específico.</p> <p><u>Nivel de investigación:</u></p> <p>Explicativo, se busca identificar y analizar la relación de causa y efecto entre variables manipuladas y la variable dependiente.</p>

<p>microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p>¿Cuál será el efecto del tiempo de contacto en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p>¿Cuál será el efecto del tiempo de contacto en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p>¿Cuál será el efecto de la radiación UV en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p> <p>¿Cuál será el efecto de la radiación UV en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas?</p>	<p>microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>Determinar el efecto del tiempo de contacto en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>Determinar el efecto del tiempo de contacto en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>Determinar el efecto de la radiación UV en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>Determinar el efecto de la radiación UV en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p>	<p>La masa de nanopartículas de ZnO tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>El tiempo de contacto tiene un efecto significativo en la reducción de microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de materia orgánica de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p>La radiación UV tiene un efecto significativo en la reducción de</p>	<p>Masa de NP-ZnO</p>	<p>Masa de NP-ZnO</p> <p>Tiempo de contacto</p> <p>Radiación UV</p>	<p><u>Diseño de investigación:</u></p> <p>Arreglo factorial de 4x3x2 con 2 repeticiones.</p> <p><u>Población de estudio:</u></p> <p>Aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p><u>Tamaño de la muestra:</u></p> <p>500 mL de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.</p> <p><u>Técnicas de recopilación de datos:</u></p> <p>Muestreo de agua residual municipal, análisis físicoquímico,</p>
---	---	--	-----------------------	---	---

		microorganismos de aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas.			<p>análisis microbiológico y fichas de registro de datos y reportes de laboratorio.</p> <p><u>Técnicas de procesamiento de datos:</u> Análisis de probabilidad normal de los datos, varianza en Minitab; gráficas y tablas.</p>
--	--	--	--	--	--

Nota. Elaboración propia, 2024.

Anexo 02. Panel fotográfico

A. Monitoreo de aguas residuales en San Agustín de Cajas

Punto de muestreo en San Agustín de Cajas



Toma de muestra



Toma de parámetros de campo



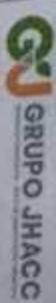
Muestra almacenada para caracterización inicial



Muestras almacenadas para corridas experimentales



B. Cadena de custodia



CADENA DE CUSTODIA

Código Número de custodia:	Solicitante: Disgo Tronco Arquitectos Plumbos		DNI:	Firma:	
Lugar de inspección:	Dirección: General Gurbora SM - Huari		Provincia: Huancayo	Dpto: San Juan	
Ciudad:	Calle: 5 de Julio N° 216		Distrito: Huancayo	Municipio: Huancayo	
Teléfono: 948 942 564	Proyecto: El estudio de las características de cada lote en lo que respecta a las medidas de altura y construcción de los muros de contención de las zonas de riesgo		Campo: General con fines de construcción		Urgencia: <input checked="" type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Alta
Ciudad: 948 942 564	N° de envases por punto de muestreo:		Coordenadas UTM		Observaciones:
Código LAB	Código de campo	Fecha de muestreo	Tipo de muestra (1)		
			P	V	E
			HC		
			H2O4		
			HNO3		
			NaOH		
			Clor		
			Ninguno		
			2500		
			Cuyamos tablas		
			T	PH	CE
			13.4	7.63	0.50
			N	E	Altitud (m/nm)
			13.4	7.63	1379
					T: 410

Entregado:

Nombre y apellidos	Firma	Institución/empresa	Nombre y apellidos	Firma	Institución/empresa	Fecha	Hora
Disgo Tronco Arquitectos Plumbos		Disgo Tronco Arquitectos Plumbos	Disgo Tronco		Disgo Tronco	05/09/24	11:30 am

Recibido:

GRUPO JHACC
SERVICIOS GENERALES SAC
RECIBIDO
 100% 12% 100% 100% 100% 100%
RECEPCIÓN DE MUESTRAS


(1) Superficial: de ríos (Amp-R), Agua superficial de Ecódices (Amp-B), Agua subterránea - Alcantarado (Amp-M), Agua superficial - de laguna (Amp-L), Agua residual - Doméstico (AR-D), Agua residual - Muestro Metalúrgico (AR-M), Agua residual - Industrial (AR-I), Agua potable - treated suministro doméstico (AR-Tra), Agua potable - reservorio e suministro doméstico (AR-Res)
 (2) P: plásticos; V: vidrio; E: etérril

C. Parte experimental

Pesado de nanopartículas de ZnO



Medición de la muestra y ajuste de pH



Tratamiento de muestras



Anexo 03. Reporte de laboratorio



INFORME DE ENSAYO N° 1-0027/24

CLIENTE	: Diego Franco Cartumasca Pumacocha Córdova Ricardo Flores Cantelón
DIRECCION	: General Cordova Av - Huari Jr. Las Islas N° 5154
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación de las nanopartículas de Oxido de zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas"
PRODUCTO	: Aguas Residual Municipal
MATRIZ	: Aguas Residual Municipal
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 1
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas
FECHA DE MUESTREO	: 25/06/24
FECHA DE RECEPCIÓN	: 26/06/24
MUESTREADO POR	: El cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	: 25/06/24
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 26/06/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	: -



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	METODOLOGIA	L.D.	L.C.	UNIDADES
Conductividad	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 2570 B, 24B-E2	-	-	µS/cm
Temperatura	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 2570 B, Temperature (Cold Water)	-	-	°C
pH	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 2540 D, 2545 C, 2017, pH/IONA, Electrode Method	-	-	Unidad pH
Turbidez	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 2130, E Turbidez Nephelometric Method	0.01	0.1	NTU
Concentración de Demanda Química (COD)	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 5210 C, 24B-E2, 2023	1.0	2.5	mg/L
Substrato Total de Oxígeno	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 5040 C, 24B-E2, 2023	0.4	0.5	mg/L
Coliformes Totales	ISMWV-APHA-AWWA-WF Part 5211 B, 24B-E2, 2023 (Group 1 and 2, Sample)	-	1.5	1000/100 mL

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Aguas Residual Municipal	
MATRIZ	Aguas Residual Municipal	
FECHA DE RECEPCIÓN	25/06/2024	
COORDENADAS UTM WGS 84	8672325 N 471948 E	
ALTITUD (metros)	3279	
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA / REFRIGERADA	
CÓDIGO DE CLIENTE	CAD-01	
CÓDIGO DE LABORATORIO	MHCA-005	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS
Coliformes totales	MPN/100mL	16x10 ³
DOO	mg/L	408.383
TDS	mg/L	418
TURBIDEZ	NTU	70.3

RESULTADOS DE CAMPO

CONDUCTIVIDAD	µS/cm	858
pH	Unidad pH	8.7
TEMPERATURA	°C	17.4

Huancayo, 2 de Julio de 2024

Wilner M. Espinoza Chasca
 SUPERVISOR DE LABORATORIO

El informe de análisis sólo es válido cuando los resultados reportados son el promedio de tres
 (tres) mediciones, a menos que se indique lo contrario. Este informe es válido sólo si el laboratorio ha sido acreditado por el organismo competente de la autoridad competente.
 La información de contacto del laboratorio se encuentra en la parte superior del informe.

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
www.grupojhacc.com

TEL USO INVERSO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

INFORME DE ENSAYO N° 1-0031/24

PÁG. 01

CLIENTE	Diego Franco Carhuamaca Plasmacahu Carlos Ricardo Flores Domtes General Coriova s/n - Huancayo
DIRECCIÓN	Jr. Las Hileras N° 5154
REFERENCIA	PROYECTO "Evaluación de las nanopartículas de Oodo de zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas"
PRODUCTO	Agua Residual Municipal Tratada
MATRIZ	Agua Residual Municipal Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS	24
PROVENIENCIA DE LAS MUESTRAS	Agua residual municipal de San Agustín de Cajas
FECHA DE MUESTREO	01/07/24
FECHA DE RECEPCIÓN	01/07/24
MUESTREADO POR	El cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	02/07/24
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	05/07/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	METODOLOGÍA	L.B.	L.C.	UNIDADES
Coliformes Totales en Sólidos Suspendidos	ISO 9222 AFNOR AFNOR 92-019 (Except for 1. Sample)	1.0	2.0	mpL
Coliformes Totales	ISO 9222 AFNOR AFNOR 92-019 (Except for 1. Sample)	-	1.0	MPY/100 mL

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO		Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ		Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN		16/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA		PRESERVADA / REFRIGERADA							
CÓDIGO DE CLIENTE		DC014	DC014	DC014	DC014	DC014	DC014	DC014	DC014
CÓDIGO DE LABORATORIO		MA24-081	MA24-081	MA24-081	MA24-081	MA24-081	MA24-081	MA24-081	MA24-081
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS							
ODG	mg/L	86.347	73.67	87.526	55.921	34.742	28.767	50.993	
Coliformes Totales	MPY/100 mL	37000	27000	26000	11000	77000	7600	14000	

PRODUCTO DECLARADO		Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ		Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN		16/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA		PRESERVADA / REFRIGERADA							
CÓDIGO DE CLIENTE		DC084	DC084	DC084	DC084	DC084	DC084	DC084	DC084
CÓDIGO DE LABORATORIO		MA24-088	MA24-088	MA24-088	MA24-088	MA24-088	MA24-088	MA24-088	MA24-088
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS							
ODG	mg/L	81.175	26.471	45.148	36.957	29.303	39.102	83.148	
Coliformes Totales	MPY/100 mL	13000	11000	12000	9100	8300	11000	3200	

PRODUCTO DECLARADO		Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ		Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN		16/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA		PRESERVADA / REFRIGERADA							
CÓDIGO DE CLIENTE		DC184	DC184	DC184	DC184	DC184	DC184	DC184	DC184
CÓDIGO DE LABORATORIO		MA24-118	MA24-118	MA24-118	MA24-118	MA24-118	MA24-118	MA24-118	MA24-118
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS							
ODG	mg/L	24.382	30.141	30.077	22.579	30.897	21.528	15.347	
Coliformes Totales	MPY/100 mL	2300	9100	8000	6000	6600	8600	4000	

PRODUCTO DECLARADO		Agua Residual Municipal Tratada		
MATRIZ		Agua Residual Municipal Tratada		
FECHA DE RECEPCIÓN		16/07/2024		
CONDICIONES DE LA MUESTRA		PRESERVADA / REFRIGERADA		
CÓDIGO DE CLIENTE		DC214	DC214	DC214
CÓDIGO DE LABORATORIO		MA24-112	MA24-112	MA24-112
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS		
ODG	mg/L	39.419	16.042	15.368
Coliformes Totales	MPY/100 mL	3000	3700	1600

Huancayo, 10 de Julio de 2024

Walter M. Espinoza Chanco
SUPERVISOR DE LABORATORIO

El informe de análisis sólo es válido para los métodos que se detallan en el presente informe. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe. Para cualquier consulta dirigirse al LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC. Este informe es un producto de trabajo del laboratorio y no constituye un diagnóstico. Los métodos de análisis y los resultados de los análisis son responsabilidad exclusiva del laboratorio. No se garantiza la exactitud de los datos.

TEL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

INFORME DE ENSAYO N° 1-0038/24

Pág. 01

CLIENTE	Diego Franco Carhuamirca Puncacahu
DIRECCIÓN	Carlos Ruzenda Flores Donato Jr. Las Islas N° 8194
REFERENCIA	PROYECTO "Evaluación de las nanopartículas de Oxido de zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajal"
PRODUCTO	Agua Residual Municipal Tratada
MATRIZ	Agua Residual Municipal Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS	25
PROVENIENCIA DE LAS MUESTRAS	Agua residuales municipales de San Agustín de Cajal
FECHA DE MUESTREO	15/07/24
MUESTREADO POR	El cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	15/07/24
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	15/07/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	...



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	METODOLOGÍA	L.D.	L.C.	UNIDADES
CONDICIONES DE LA MUESTRA	ISO 9001:2015	1.0	2.0	mg/L
Coliformes Totales	EN ISO 9222-1:2013	1	1.0	NMP/100 ml

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN	15/07/2024	15/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA / REFRIGERADA								
CÓDIGO DE CLIENTE	CA0-03	DC01-0	DC02-0	DC03-0	DC04-0	DC05-0	DC06-0	DC07-0	DC08-0
CÓDIGO DE LABORATORIO	MA24-102	MA24-103	MA24-104	MA24-105	MA24-106	MA24-107	MA24-108	MA24-109	MA24-110
ENSAYO	RESULTADOS								
DGO	mg/L	30.128	82.142	70.570	54.183	52.208	31.148	25.517	...
Coliformes Totales	NMP/100 ml	15000	3000	2300	2300	1700	900	9100	...

PRODUCTO DECLARADO	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN	15/07/2024	15/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA / REFRIGERADA								
CÓDIGO DE CLIENTE	DC07-0	DC08-0	DC09-0	DC10-0	DC11-0	DC12-0	DC13-0	DC14-0	DC15-0
CÓDIGO DE LABORATORIO	MA24-108	MA24-109	MA24-110	MA24-111	MA24-112	MA24-113	MA24-114	MA24-115	MA24-116
ENSAYO	RESULTADOS								
DGO	mg/L	48.017	30.718	25.026	42.002	34.182	20.709	28.171	...
Coliformes Totales	NMP/100 ml	15000	13000	13000	12000	8300	8000	12000	...

PRODUCTO DECLARADO	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
MATRIZ	ARB	Agua Residual Municipal Tratada							
FECHA DE RECEPCIÓN	15/07/2024	15/07/2024							
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA / REFRIGERADA								
CÓDIGO DE CLIENTE	DC16-0	DC17-0	DC18-0	DC19-0	DC20-0	DC21-0	DC22-0	DC23-0	DC24-0
CÓDIGO DE LABORATORIO	MA24-116	MA24-117	MA24-118	MA24-119	MA24-120	MA24-121	MA24-122	MA24-123	MA24-124
ENSAYO	RESULTADOS								
DGO	mg/L	30.855	23.550	26.007	28.186	20.116	29.586	20.113	...
Coliformes Totales	NMP/100 ml	9100	8100	9100	8300	8100	6800	8000	...

PRODUCTO DECLARADO	ARB	Agua Residual Municipal Tratada				
MATRIZ	ARB	Agua Residual Municipal Tratada				
FECHA DE RECEPCIÓN	15/07/2024	15/07/2024				
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA / REFRIGERADA					
CÓDIGO DE CLIENTE	DC25-0	DC26-0	DC27-0	DC28-0	DC29-0	
CÓDIGO DE LABORATORIO	MA24-125	MA24-126	MA24-127	MA24-128	MA24-129	
ENSAYO	RESULTADOS					
DGO	mg/L	14.217	21.718	17.824	12.260	...
Coliformes Totales	NMP/100 ml	4000	3600	3600	2000	...

Huancayo, 22 de Julio de 2024

Wilber M. Espinoza Chacra
SUPERVISOR DE LABORATORIO

El informe de ensayo sólo es válido para los resultados obtenidos en el presente informe.
Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, salvo autorización expresa del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC.
Los resultados de un ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o normas certificadas de sistemas de gestión.
El presente informe es propiedad de GRUPO JHACC.

LAB-01

TEL USO INDEXICO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

INFORME DE ENSAYO N° 1-0039/24

Pág. 01

CLIENTE : Diego Franco Carhuamaca Plamecanha
DIRECCIÓN : Carlos Ricardo Flores Gonten
 General Cordova s/n - Huancayo
 Jr. Las Islas N° 5104
REFERENCIA : PROYECTO "Evaluación de los riesgos de contaminación de zinc en la reducción de materia orgánica y microorganismos de las aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas"
PRODUCTO : Agua Residual Municipal Tratada
MATRIZ : Agua Residual Municipal Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS : 6
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS : Aguas residuales municipales de San Agustín de Cajas
FECHA DE MUESTREO : 17/07/24
FECHA DE RECEPCIÓN : 17/07/24
MUESTREADO POR : El cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO : 18/07/24
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 18/07/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO : 1



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	METODOLOGÍA	L.D.	L.C.	UNIDADES
DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTALES (SS)	ISO 15705-1:2016	0.0	0.0	mg/L

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO		Agua Residual Municipal Tratada					
MATRIZ		Agua Residual Municipal Tratada					
FECHA DE RECEPCIÓN		17/07/2024					
CONDICIONES DE LA MUESTRA		PRESERVADA / REFRIGERADA					
CÓDIGO DE CLIENTE	DC-01	DC-02	DC-03	DC-04	DC-05	DC-06	
CÓDIGO DE LABORATORIO	MA24-100	MA24-101	MA24-102	MA24-103	MA24-104	MA24-105	
ENSAYO	RESULTADOS						
UNIDADES							
SS	48.007	22.563	12.055	24.075	18.948	13.551	

Huancayo, 22 de Julio de 2024


 Wilmer M. Espinoza Chirca
 SUPER VISION DE LABORATORIO

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

Anexo 04. Cálculos de isoterma

Se aplicaron las siguientes formulas:

Isoterma de Langmuir

Se sabe que el modelo de la isoterma de Langmuir es:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m b C_e} \quad (1)$$

C_e , concentración de equilibrio (mg/L)

q_e : cantidad de la sustancia adsorbida en el equilibrio por la cantidad de adsorbente (mg/g)

q_m : capacidad de adsorción (mg/g),

b : constante de equilibrio de adsorción (L/mg).

La cantidad de metal adsorbida en el equilibrio:

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{w} \quad (2)$$

Dónde:

V: volumen de solución (0,05 L),

C_i, C_e son la concentración inicial y final del metal en mg/L

w es el peso del adsorbente

La forma de una ecuación lineal general es:

$$y = a + b \quad (3)$$

Donde b es la constante y a es la pendiente de la ecuación lineal, comparando la ecuación lineal general con la ecuación de Langmuir se tiene que:

$$y = \frac{1}{q_e}; x = \frac{1}{C_e}; a = \frac{1}{q_m} \text{ y } b = \frac{1}{q_m b} \quad (4)$$

Por lo tanto, la ecuación linealizada de Langmuir que se obtiene de los datos experimentales nos permitirá conocer las constantes del modelo (q_m y b).

Isoterma de Freundlich

La linealización de la isoterma de Freundlich está dada por:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

Se sabe que:

C_e : es la concentración de equilibrio (mg/L),

q_e : es la cantidad adsorbida en el equilibrio por la cantidad del adsorbente (mg/g)

K_f : constantes de Freundlich (mg/g)

n : son las constantes de Freundlich relacionadas con la capacidad de adsorción y la intensidad de adsorción.

La forma de una ecuación lineal general es:

$$y = a + b \quad (3)$$

Donde b es la constante y a es la pendiente de la ecuación lineal, comparando la ecuación lineal general con la ecuación de Freundlich se tiene que:

$$y = \ln q_e; x = \ln C_e; a = \frac{1}{n} y \quad b = \ln K_f \quad (6)$$

Con las ecuaciones mencionadas se obtuvo la siguiente tabla de datos:

Anexo 05. Cálculos de cinética

Para el cálculo de la cinética se aplicaron las siguientes fórmulas:

masa	C_e	q_e	$\log C_e$	$\log q_e$	$1/C_e$	$1/q_e$	C_e/q_e
0,10	46,027	1760,505	1,66301	0,22090	0,02173	0,00057	0,1
0,25	22,553	751,15	1,35320	0,13136	0,04434	0,00133	0,25
0,50	20,519	377,609	1,31216	0,11799	0,04874	0,00265	0,5
1,00	14,217	191,9555	1,15281	0,06176	0,07034	0,00521	1
1,25	12,005	154,4492	1,07936	0,03317	0,08330	0,00647	1,25
1,50	13,00	128,3763333	1,11391	0,04685	0,07693	0,00779	1,5

Cinética de Pseudo-primer orden

Se tiene la siguiente ecuación linealizada de pseudo primer orden:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (7)$$

Donde:

q_t : es concentración en el tiempo

q_e : Concentración en equilibrio se sabe que dicho valor es el obtenido de la concentración final menor porque representa la mayor remoción

k_1 : Constante cinética

t: tiempo

La forma de una ecuación lineal general es:

$$y = a + b \quad (3)$$

Donde “b” es la constante y “a” es la pendiente de la ecuación lineal, comparando la ecuación lineal general con la ecuación de Pseudo primer orden se tiene que:

$$y = \ln(q_e - q_t) \quad x = t; \quad a = k_1 t \quad \text{y} \quad b = \ln q_e \quad (8)$$

Cinética de Pseudo-segundo orden

Se tiene la siguiente ecuación linealizada de pseudo segundo orden:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

q_t : es concentración en el tiempo

q_e : Concentración en equilibrio se sabe que dicho valor es el obtenido de la concentración final menor porque representa la mayor remoción

k_2 : Constante cinética

La forma de una ecuación lineal general es:

$$y = a + b \quad (3)$$

Donde b es la constante y a es la pendiente de la ecuación lineal, comparando la ecuación lineal general con la ecuación de Pseudo segundo orden se tiene que:

$$y = \frac{1}{q_t} \quad x = t; \quad a = \frac{1}{q_e} \quad \text{y} \quad b = \frac{1}{k_d q_e^2} \quad (10)$$

Aplicando las ecuaciones se obtiene la siguiente tabla tomando en consideración que q_e es igual a 129 mg/g y el cálculo de q_t es el mismo que la ecuación 2

Tiempo (min)	C_e	q_t	ln (q_e- q_t)	t/q_t
45	24,975	124,384	4,616	0,362
60	21,718	125,470	3,530	0,478
75	18,946	126,394	2,606	0,593
90	17,814	126,771	2,229	0,710
105	13,551	128,192	0,808	0,819
120	12,999	128,376	0,624	0,935