



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**

Evaluación de la eficiencia de un tratamiento fotocatalítico heterogéneo con nanopartículas de TiO_2 en la depuración de aguas residuales del proceso de teñido de fibras naturales de la industria textil de Arequipa.

Tesis presentada por:

Quispe Rosas, Danitza Alexia

ORCID: 0009-0001-2572-8765

Valencia Vera, Jhandery Estefany

ORCID: 0009-0003-6740-8254

Para optar por el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Mg. Tejada Meza, Kevin

ORCID: 0000-0002-9716-7821

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Abril del 2026

Dictamen: 017637-C-EPIA-2026

Visto el borrador del expediente 017637, presentado por:

2016101462 - QUISPE ROSAS DANITZA ALEXIA

2016222172 - VALENCIA VERA JHANDERY ESTEFANY

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO HETEROGÉNEO
CON NANOPARTÍCULAS DE TIO₂ EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE
TEÑIDO DE FIBRAS NATURALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL DE AREQUIPA.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**29611452 - ARENAZAS RODRIGUEZ ARMANDO JACINTO
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO HETEROGÉNEO CON NANOPARTÍCULAS DE TIO₂ EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE TEÑIDO DE FIBRAS NATURALES DE LA INDUSTRIA TEXTI

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

apps.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

6%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

Dedicatoria

Dedico este trabajo, a Dios, por guiar cada paso de este camino y bendecir mi vida.

A mis padres, Víctor y Lourdes, por su esfuerzo constante y su apoyo incondicional. A mi papá, por su dedicación incansable, incluso trabajando lejos de la familia; y a mi mamá, por su amor infinito. Conozco de cerca lo difícil que ha sido este camino, por lo que este logro representa una pequeña muestra de mi admiración y profundo agradecimiento hacia ustedes

A mi hermano Jaffet, por ser parte de mi vida, por compartir alegrías y desafíos, y por estar siempre presente. Sigamos esforzándonos para mantener orgullosos a nuestros padres.

A William, el amor de mi vida, por ser mi refugio y fortaleza, acompañarme en cada paso de este camino. Sigamos construyendo juntos nuestros sueños y nuestro futuro.

A Sasy, mi fiel compañera, quien estuvo conmigo a lo largo de este proceso, brindándome su compañía incluso en sus últimos días; sé que celebras conmigo desde el cielo. Y a Octavia, por regalarme tantas alegrías.

A todos mis familiares y amigos que me brindaron su apoyo, y motivación a lo largo de este proceso. Y finalmente, a mí, por la persona en la que me he convertido, por querer ser mejor, por no rendirme y por trabajar cada día para alcanzar mis metas. Vamos para adelante.

Danitza Alexia Quispe Rosas

Este logro es el reflejo de un viaje lleno de esfuerzo, sacrificio y apoyo. Quiero dedicarlo especialmente a quienes me han acompañado en cada paso del camino.

A Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la claridad necesarias para superar cada desafío que se presentó.

A mi familia, por ser mi principal fuente de apoyo y por inculcarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo, la constancia y la perseverancia. A mis padres, María y Hugo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser un pilar fundamental en mi vida, acompañándome en cada etapa de este proceso. Sobre todo, a mi padre, quien ha sido mi mayor guía e inspiración, estando presente en cada momento importante y motivándome a seguir adelante con firmeza y determinación.

A mi hermana María, quien ha estado a mi lado de manera constante y ha sido mi principal soporte a lo largo de este camino, brindándome su compañía, cariño y apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Asimismo, a mi hermano Francisco, a Levi y a mis compañeros incondicionales Baekie, Nina y Chani, por su compañía y afecto, quienes han sido también una parte importante de este proceso y de la consecución de este logro.

Jhandery Estefany Valencia Vera

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a Dios por brindarnos la fuerza y claridad para superar los obstáculos de este proceso.

A nuestros padres, por su amor incondicional y por ser nuestra mayor fuente de apoyo y sabiduría a lo largo de este camino. Su confianza en nosotros ha sido la base para alcanzar este logro.

Agradecemos a la plana docente, por su orientación y por brindarnos su tiempo y conocimientos durante el desarrollo de esta investigación. Su apoyo fue esencial para culminar con éxito este trabajo.

A nuestra amistad, que ha sido un pilar esencial en este camino. Gracias por el apoyo mutuo, la comprensión y la motivación constante; por acompañarnos en los momentos difíciles y celebrar juntas cada avance. Este logro también es reflejo del compromiso, la unión y la confianza que hemos construido.

A todas las personas que nos acompañaron, desde aquellos que nos ofrecieron apoyo durante los momentos difíciles hasta aquellos que compartieron nuestra alegría en los momentos de éxito. Su presencia fue invaluable.

Danitza Alexia Quispe Rosas & Jhandery Estefany Valencia Vera.

RESUMEN

La industria textil representa una de las principales fuentes de contaminación hídrica debido a la descarga de efluentes con alta carga de colorantes, materia orgánica y compuestos recalcitrantes. En este contexto, la presente investigación evaluó la eficiencia de un tratamiento fotocatalítico heterogéneo empleando nanopartículas de TiO_2 para el tratamiento de aguas residuales generadas en el proceso de teñido de fibras naturales en la ciudad de Arequipa, desarrollándose a escala de laboratorio.

Las NPs- TiO_2 fueron sintetizadas mediante el método sol-gel y aplicadas bajo distintas condiciones de pH y tiempo de irradiación UV. Los resultados evidenciaron que, a pH 3, 1 g/L de NPs- TiO_2 y 240 minutos, se alcanzó una remoción del 98.92% en color y del 87.64% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), demostrando alta eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos. El análisis estadístico confirmó que la concentración del fotocatalizador y el tiempo de irradiación son las variables más influyentes, mientras que condiciones ácidas favorecen la actividad fotocatalítica y permiten reducir la dosis de NPs- TiO_2 sin comprometer la eficiencia.

La evaluación ecotoxicológica mediante bioensayos con *Daphnia magna* y *Lactuca sativa* L. mostró una reducción significativa de la toxicidad del efluente tratado, aunque se identificaron efectos residuales en concentraciones elevadas.

En relación con el marco normativo, el efluente tratado cumple con los límites establecidos por la normativa nacional (D.S. N°010-2019-VIVIENDA), aunque presenta limitaciones frente a estándares internacionales más exigentes como ZDHC, evidenciando brechas regulatorias y la necesidad de adoptar enfoques preventivos.

En conclusión, la fotocatálisis heterogénea con NPs- TiO_2 es un tratamiento eficiente y prometedor, con potencial de integración en sistemas de tratamiento más sostenibles.

Palabras clave: aguas residuales textiles, fotocatálisis heterogénea, nanopartículas de TiO_2 .

Abstract

The textile industry is one of the main sources of water pollution due to the discharge of effluents containing high loads of dyes, organic matter, and recalcitrant compounds. In this context, this study evaluated the efficiency of a heterogeneous photocatalytic treatment using TiO₂ nanoparticles (NPs-TiO₂) for the remediation of wastewater from the dyeing of natural fibers in Arequipa, Peru, at laboratory scale.

The NPs-TiO₂ were synthesized using the sol-gel method and evaluated under different conditions of pH and UV irradiation time. The results showed that, at pH 3, 1 g/L of NPs-TiO₂ and 240 minutes, removal efficiencies of 98.92% for color and 87.64% for Chemical Oxygen Demand (COD) were achieved, demonstrating high efficiency in the degradation of organic pollutants. Statistical analysis confirmed that NPs-TiO₂ concentration and irradiation time are the most influential variables, while acidic conditions enhance photocatalytic activity and allow reducing catalyst dosage without compromising efficiency.

Ecotoxicological evaluation using *Daphnia magna* and *Lactuca sativa* L. showed a significant reduction in effluent toxicity, although residual effects at higher concentrations were observed.

Regarding the regulatory framework, the treated effluent complies with national standards (D.S. N° 010-2019-VIVIENDA), but presents limitations compared to international standards such as ZDHC, highlighting regulatory gaps.

In conclusion, heterogeneous photocatalysis with TiO₂ is an efficient and promising technology for textile wastewater treatment, with potential for integration into more sustainable systems.

Keywords: textile wastewater, heterogeneous photocatalysis, TiO₂ nanoparticles.

Índice

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I.....	3
1. Planteamiento del Problema	4
1.1. Problemática de la Investigación.....	4
1.2. Justificación de la Investigación.....	5
1.2.1. Ambiental.....	5
1.2.2. Social.....	5
1.2.3. Económica.....	6
1.2.4. Tecnológica	6
1.3. Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Hipótesis de la investigación	7
Capítulo II	8
2. Fundamento Teórico	9
2.1. Antecedentes de la investigación.....	9
2.1.1. Internacional.....	9
2.1.2. Nacional	14
2.2. Marco Teórico	20
2.2.1. Industria Textil	20
2.2.2. Colorantes.....	21
2.2.3. Aguas Residuales	26
2.2.4. Tratamiento de Aguas Residuales	28
2.2.5. Tratamiento de Aguas Residuales Textiles	30
2.2.6. Ecotoxicología.....	47
2.3. Marco Legal.....	48
2.3.1. Marco Legal Internacional	48
2.3.2. Marco Legal Nacional	54

Capítulo III	58
3. Metodología	59
3.1. Tipo y Nivel de Investigación	59
3.1.1. Tipo de datos en Investigación.....	59
3.1.2. Nivel de Investigación.....	59
3.1.3. Enfoque de Investigación	59
3.1.4. Metodología de la Investigación	60
3.1.5. Población y Muestra.....	60
3.2. Diseño de la Investigación.....	60
3.2.1. Diseño de Experimento	61
3.3. Métodos de la Investigación	62
3.3.1. Área de Estudio	62
3.4. Materiales, Reactivos, Equipos e Instrumentos.....	62
3.4.1. Materiales	62
3.4.2. Reactivos	63
3.4.3. Equipos e Instrumentos	63
3.5. Metodología.....	64
3.5.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes provenientes	64
3.5.2. Determinación de los parámetros óptimos de operación	66
3.5.3. Ensayos de ecotoxicidad aguda del efluente resultante del tratamiento.	75
Capítulo IV	81
4. Resultados Y Discusión	82
4.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes provenientes del agua... 82	
4.1.1. Resultado de los parámetros analizados durante el monitoreo	82
4.2. Determinación de los parámetros óptimos de operación y eficiencia de remoción . 88	
4.2.1. Análisis Estadístico	88
4.2.2. Evaluación del tratamiento fotocatalítico de los parámetros más viables	107
4.3. Evaluación de la toxicidad aguda del efluente tratado mediante ensayos.....	114
4.3.1. Bioensayos de Ecotoxicidad con <i>Daphnia magna</i>	114
4.3.2. Bioensayos de Ecotoxicidad con <i>Lactuca sativa L.</i>	125
Capítulo V	137
Conclusiones y Recomendaciones	138
Referencias	141

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales grupos funcionales cromóforos	22
Tabla 2 Principales grupos funcionales Auxócromos.	23
Tabla 3 Clasificación de los colorantes según su método de aplicación.....	24
Tabla 4 Parámetros convencionales de ZDHC y aniones para aguas residuales.	49
Tabla 5 Parámetros y límites de metales pesados de aguas residuales de ZDHC.....	52
Tabla 6 VMA para descargas al sistema de alcantarillado: Anexo1.....	56
Tabla 7 VMA para descargas al sistema de alcantarillado: Anexo 2.....	57
Tabla 8 Operacionalización de Variables.....	62
Tabla 9 Valores de la variable de concentración del fotocatalizador.....	68
Tabla 10 Valores de la variable de tiempo de residencia	69
Tabla 11 Valores de la variable de pH	69
Tabla 12 Factores y niveles de estudio.....	70
Tabla 13 Codificación y valores de estudio de los niveles.	70
Tabla 14 Diseño experimental 2 ³	71
Tabla 15 Clasificación de toxicidad basada en Unidades de Toxicidad (UT)	79
Tabla 16 Parámetros fisicoquímicos del efluente generado en el proceso.....	83
Tabla 17 Metales y otros elementos totales presentes en el efluente del proceso de teñido....	86
Tabla 18 Valores de absorbancia a 647 nm después del tratamiento fotocatalítico.....	89
Tabla 19 Resultados del test de Levene para homocedasticidad por factor.....	90
Tabla 20 Análisis estadístico de la absorbancia mediante ANOVA	91
Tabla 21 Promedio del % de degradación del efluente medido por absorbancia	95
Tabla 22 Valores de DQO después del tratamiento fotocatalítico.	98
Tabla 23 Análisis estadístico de DQO mediante ANOVA	99
Tabla 24 Comparación de resultados con normativa nacional e internacional.	107
Tabla 25 Comparación de metales total con normativas nacionales e internacionales.....	111
Tabla 26 Evaluación del bioensayo con <i>Daphnia magna</i>	118
Tabla 27 Evaluación del bioensayo con <i>Lactuca sativa L.</i> ,	126
Tabla 28 ANOVA – Análisis estadístico de longitud de Radícula de <i>Lactuca Sativa L.</i>	127
Tabla 29 ANOVA – Análisis estadístico de longitud de Hipocótilo de <i>Lactuca Sativa L.</i> ...	129
Tabla 30 Descripción de variables según el número de muestras.....	174

Índice de Figuras

Figura 1 Clasificación del tratamiento de aguas residuales	30
Figura 2 Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada	31
Figura 3 Esquema del mecanismo de degradación fotocatalítica de un colorante azoico s.....	39
Figura 4 Brecha de banda de catalizadores	42
Figura 5 Muestreo de efluentes del proceso de teñido.	66
Figura 6 Preparación de síntesis de nanopartículas TiO ₂ por sol-gel.	68
Figura 7 Implementación del reactor final para el tratamiento fotocatalítico	72
Figura 8 Diluciones del efluente tratado utilizadas en el bioensayo.	77
Figura 9 Distribución de <i>Daphnia magna</i> en las placas Petri	77
Figura 10 Comparación visual del color del efluente textil	94
Figura 11 % de eficiencia promedio de degradación del color	96
Figura 12 Interacción del Tiempo vs pH.....	102
Figura 13 Análisis de comparaciones significativas mediante el test de Tukey.	103
Figura 14 Eficiencia de Degradación DQO (%) en función del Tiempo	104
Figura 15 Mortalidad de <i>Daphnia magna</i> tras 48 horas de exposición	116
Figura 16 Alteraciones en el desarrollo de la <i>Daphnia magna</i>	122
Figura 17 Evaluación del efecto tóxico del agua residual textil.	124
Figura 18 Efecto de diferentes concentraciones del efluente sobre la Radícula	127
Figura 19 Efecto de diferentes concentraciones del efluente sobre el Hipocótilo	130
Figura 20 Anomalías en la raíz de las semillas de lechugas.	132
Figura 21 Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga (100 %).	132
Figura 22 Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga (75 %).	133
Figura 23 Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga (50 %).	134
Figura 24 Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga (25 %).	135
Figura 25 Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga (5 %).	135

Índice de Anexos

Anexo 1. Informe de caracterización de agua residual textil	160
Anexo 2. Resultados del tratamiento fotocatalítico para el parámetro de DQO.	166
Anexo 3. Informe de caracterización final del tratamiento con mayor degradación.	175
Anexo 4. Análisis espectral de 647nm y muestras.....	181
Anexo 5. Análisis estadístico de Absorbancia.	183
Anexo 6. Análisis estadístico de DQO.....	185
Anexo 7. Análisis estadístico de ecotoxicidad de <i>Daphnia magna</i>	188
Anexo 8. Análisis estadístico de ecotoxicidad de <i>Lactuca Sativa L.</i>	191
Anexo 9. Materiales, Reactivos y Equipos utilizados en el experimento.	194
Anexo 10. Ficha Técnica del Isopropóxido de Titanio.	200
Anexo 11. Ficha de datos de seguridad del Isopropóxido de Titanio.	201
Anexo 12. Galería fotográfica.	202
Anexo 13. Mapa de procesos del teñido de fibra natural en la industria textil	202

Introducción

El manejo de las aguas residuales generadas por la industria textil constituye una problemática ambiental relevante, principalmente debido a la naturaleza compleja de los contaminantes que contienen. Entre estos destacan los colorantes sintéticos y diversos compuestos orgánicos de difícil degradación, los cuales presentan alta estabilidad química, lo que limita su remoción mediante métodos convencionales de tratamiento.

Diversos estudios indican que una fracción significativa de los colorantes utilizados en los procesos de teñido, cercana al 20 %, no logra adherirse a las fibras textiles, siendo posteriormente descargada en los efluentes sin un tratamiento adecuado. Esta liberación contribuye al deterioro de los ecosistemas acuáticos, generando impactos negativos en su equilibrio y calidad ambiental (Korkmaz et al., 2022). Frente a esta problemática, surge la necesidad de desarrollar e implementar tecnologías de tratamiento más eficientes, capaces de mejorar la eliminación de estos contaminantes y, al mismo tiempo, alinearse con los enfoques actuales de sostenibilidad aplicados al sector textil.

En este contexto, los métodos convencionales de tratamiento, como la adsorción, filtración por membranas o procesos biológicos, presentan limitaciones asociadas a la transferencia de contaminantes a fases secundarias, altos costos operativos o baja eficiencia frente a compuestos altamente estables. Asimismo, las aguas residuales textiles se caracterizan por su intensa coloración, baja biodegradabilidad, alta salinidad y elevada demanda química de oxígeno, lo que dificulta su tratamiento mediante tecnologías tradicionales (Wang et al., 2021).

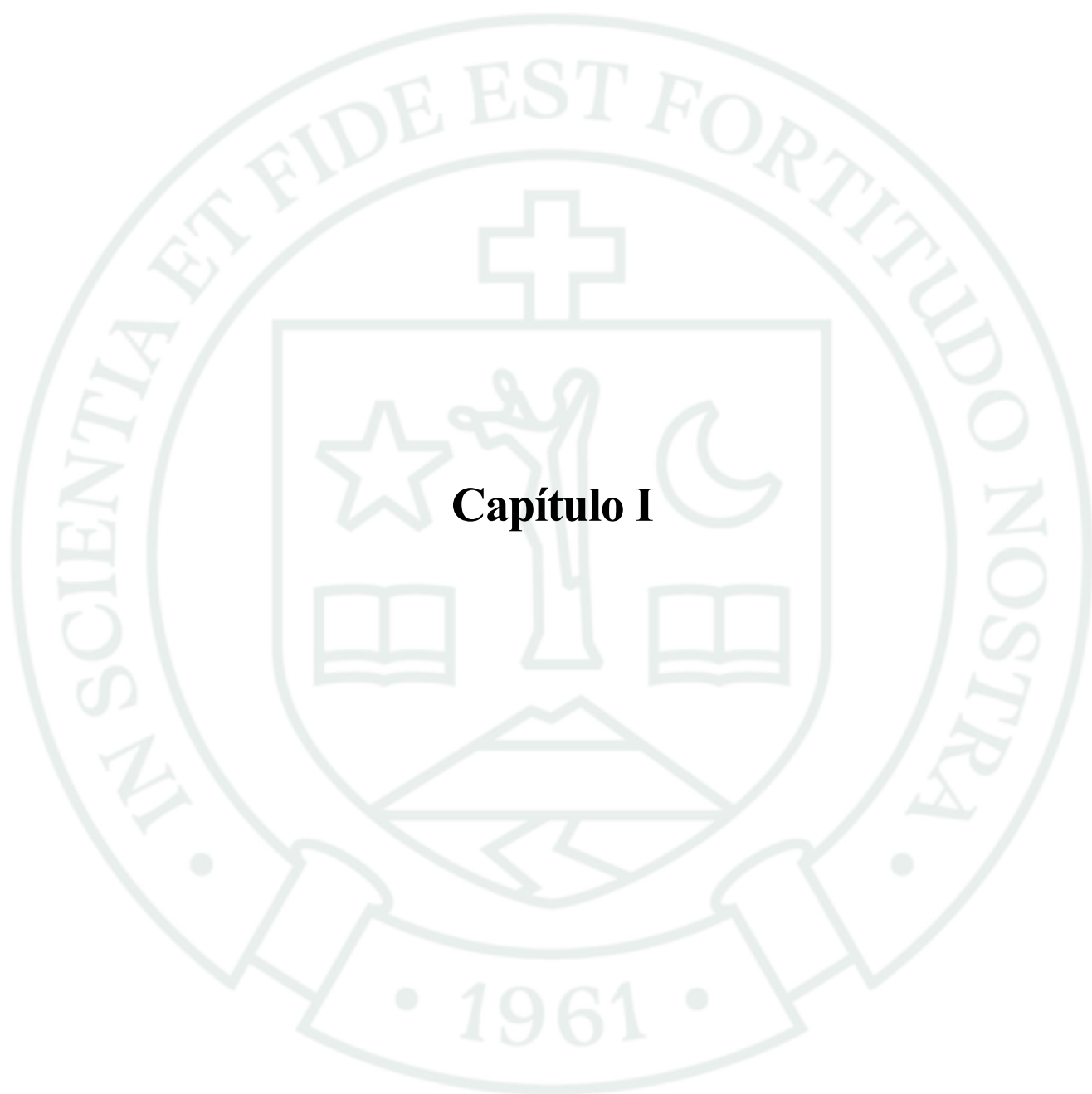
Ante estas limitaciones, la fotocatálisis heterogénea se ha posicionado como una alternativa eficiente para el tratamiento de efluentes industriales, debido a su capacidad para descomponer compuestos orgánicos persistentes mediante el empleo de materiales semiconductores, como el dióxido de titanio (TiO_2). Este proceso se basa en la formación de especies altamente reactivas que permiten la oxidación y posterior mineralización de

contaminantes complejos. En este sentido, el uso de nanopartículas de TiO_2 ha cobrado especial relevancia debido a su elevada actividad fotocatalítica, lo que favorece su aplicación en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales (Subramani et al., 2025).

Sin embargo, la evaluación de estas tecnologías no solo debe centrarse en su eficiencia fisicoquímica, sino también en su impacto sobre los organismos vivos, considerando que la reducción de parámetros convencionales no garantiza necesariamente la eliminación de efectos tóxicos. En este sentido, los bioensayos ecotoxicológicos se han consolidado como herramientas fundamentales para evaluar el riesgo ambiental asociado a los efluentes tratados (Korkmaz et al., 2022).

Asimismo, la implementación de estos procesos debe analizarse en función de su capacidad para cumplir con los marcos normativos vigentes y responder a estándares ambientales cada vez más exigentes. En el caso del Perú, la regulación ambiental se orienta principalmente al control de descargas, mientras que estándares internacionales, como los promovidos por iniciativas como ZDHC, incorporan enfoques más estrictos y preventivos en la gestión de contaminantes, evidenciando la existencia de brechas regulatorias.

Bajo este contexto, el estudio se centra en analizar la aplicación de un proceso fotocatalítico heterogéneo basado en el uso de nanopartículas de TiO_2 para el tratamiento de aguas residuales provenientes del sector textil. La evaluación considera la eficiencia del proceso fisicoquímico como sus efectos a nivel ecotoxicológico, integrando además su correspondencia con los criterios establecidos en la normativa vigente, tanto a nivel nacional como internacional. De este modo, se busca contribuir al planteamiento de alternativas más sostenibles para el manejo de efluentes industriales.



Capítulo I

1. Planteamiento del problema

1.1. Problemática de la Investigación

El agua constituye uno de los recursos naturales más importantes para la existencia de los seres vivos y para el desarrollo de cualquier actividad humana (Gouda et al., 2022). No obstante, el incremento poblacional y la expansión de diversas actividades productivas en los últimos años han generado presiones significativas sobre su calidad. A escala global, la industria del teñido se reconoce como una de las principales generadoras de descargas que contienen tintes, sales y compuestos químicos, produciendo aguas residuales que representan un riesgo tanto para el ambiente como para la salud de las personas (Katheresan et al., 2018).

Por ello, el Perú siendo un país caracterizado por su diversidad natural y cultural se ha convertido en un espacio atractivo para la instalación y crecimiento del sector textil, actividad que demanda grandes volúmenes de agua. En los procesos de teñido, se requieren cerca de 100 litros de agua por cada kilogramo de fibra tratada (Guillen et al., 2020). Los efluentes generados presentan concentraciones elevadas de colorantes y diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas, además de compuestos tóxicos. Estas descargas suelen mostrar un color intenso, baja biodegradabilidad, altos niveles de salinidad y una elevada demanda química de oxígeno. Parte de estos contaminantes, especialmente los colorantes azoicos, poseen características mutagénicas y un notable potencial carcinogénico, afectando tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos (Wang et al., 2021).

En la región Arequipa, cuyo clima y localización han favorecido la presencia de establecimientos dedicados al teñido de fibras vegetales y animales, la actividad textil continúa en expansión, al igual que los impactos asociados a la contaminación de los recursos hídricos. Algunas empresas no cuentan con sistemas de tratamiento adecuados para sus aguas residuales, y otras aplican métodos poco eficientes basados en el uso excesivo de sustancias químicas, lo que genera grandes volúmenes de lodos con alta toxicidad (García & Herrera, 2022).

Si la demanda del sector sigue incrementándose y no se implementan mecanismos efectivos de regulación, fiscalización y adopción de tecnologías de tratamiento más sostenibles, la calidad del ambiente y de los cuerpos de agua de Arequipa seguirá deteriorándose. En este sentido, el presente estudio aborda el tratamiento del efluente textil procedente del proceso de teñido mediante fotocátalisis heterogénea, con el fin de evaluar su eficiencia y determinar el grado de degradación alcanzado en los contaminantes presentes.

1.2. Justificación de la Investigación

1.2.1. Ambiental.

La descarga de efluentes generados durante los procesos de teñido textil constituye una fuente significativa de alteración en los cuerpos de agua, ya que interfiere en su equilibrio natural y en el funcionamiento de los sistemas biológicos que los conforman. La presencia de estos vertimientos limita la penetración de la radiación solar en la columna de agua, lo que favorece la aparición de procesos como la eutrofización y otras alteraciones ecológicas (Islam et al., 2024). Ante esta problemática, el estudio se orienta a aportar soluciones que permitan reducir o evitar la descarga directa de aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes químicos. En este sentido, se plantea la aplicación de alternativas de tratamiento que contribuyan a disminuir los efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos. De igual manera, se busca promover la mejora de la calidad del agua y prevenir la degradación del suelo mediante la eliminación eficiente de compuestos de difícil degradación previo a su disposición final.

1.2.2. Social

El desarrollo de esta investigación impulsará prácticas de gestión ambiental más responsables, involucrando a los actores claves para fortalecer la cultura de sostenibilidad. Asimismo, la implementación de procesos sostenibles contribuye a mejorar la imagen corporativa de las empresas del sector.

Del mismo modo, contribuirá a reducir riesgos sanitarios y a evitar la degradación visual del entorno, gracias al cumplimiento de las normas ambientales vigentes.

1.2.3.Económica

El Perú destaca como el principal productor y exportador mundial de fibra de natural y, dentro del país, Arequipa ocupa el tercer lugar en producción (Azabache et al., 2021). Sin embargo, el elevado consumo de agua y el uso intensivo de insumos químicos asociado al proceso de teñido representa un costo operativo considerable que limita la competitividad del sector. En este contexto, la presente investigación propone el tratamiento de efluentes del teñido mediante alternativas de bajo costo de operación y mantenimiento, lo que permitiría mejorar la rentabilidad de las empresas textiles. Y ayuda a prevenir sanciones o multas derivadas del incumplimiento de las obligaciones ambientales.

1.2.4.Tecnológica

Este estudio busca incentivar la adopción de tecnologías de tratamiento de aguas residuales que puedan ser implementadas por empresas de distintos tamaños, desde pequeñas hasta grandes industrias. La aplicación de procesos de oxidación avanzada constituye una alternativa innovadora, con beneficios superiores a los métodos tradicionalmente empleados, los cuales presentan limitaciones importantes (Priyadarshini et al., 2022).

1.3. *Objetivos de la investigación*

1.3.1.Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un tratamiento fotocatalítico heterogéneo con nanopartículas de TiO_2 en la depuración de aguas residuales provenientes del proceso de teñido de fibras naturales de la industria textil de Arequipa

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los parámetros fisicoquímicos de los efluentes provenientes del agua residual industrial obtenidos del proceso de teñido.
- Determinar los parámetros óptimos de operación y eficiencia de decoloración y remoción de contaminantes mediante fotocátalisis heterogénea con nanopartículas de TiO_2 aplicada a efluentes de teñido textil
- Evaluar la toxicidad aguda del efluente tratado mediante ensayos con organismos modelo *Daphnia magna* y *Lactuca sativa L.*

1.4. Hipótesis de la investigación

La aplicación de la fotocátalisis heterogénea con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) constituye una de las alternativas más eficientes para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en efluentes industriales provenientes del proceso de teñido de fibras naturales, mediante la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), la decoloración del efluente y la disminución de su toxicidad.



Capítulo II

2. Fundamento teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacional

Borges et al. (2016), evaluaron el empleo de TiO_2 como catalizador dentro de un sistema de fotocatálisis heterogénea destinado a la eliminación de contaminantes en medios líquidos y gaseosos, demostrando una alta eficiencia de operación. En su estudio, la irradiación solar se utilizó como fuente energética, lo que permitió plantear el proceso como una alternativa de bajo costo y con ventajas ambientales. El trabajo se centró en la degradación de compuestos presentes en aguas residuales utilizando TiO_2 nanoestructurado depositado sobre un material mineral natural, específicamente un sustrato volcánico de lava negra. Los resultados mostraron que el material actúa como un fotocatalizador eficiente bajo luz visible, logrando una degradación del 95% de los contaminantes tras 2 horas de irradiación solar. Asimismo, sus características permiten incorporarlo en fotorreactores de gran capacidad y en sistemas de flujo continuo, superando las limitaciones asociadas al uso de fotocatalizadores en polvo dentro de procesos fotocatalíticos convencionales.

Dehghani et al. (2016), realizaron una evaluación ecotoxicológica para analizar la toxicidad de colorantes ácidos en efluentes textiles mediante un proceso fotocatalítico UV/ ZnO , utilizando *Daphnia magna* como organismo bioindicador. Observaron que, si bien el sistema permitió la remoción del tinte, la toxicidad del efluente se incrementó progresivamente durante el tratamiento, alcanzando valores de LC_{50} de 120,5 mg/L y 118,6 mg/L en periodos de 72 y 96 horas, respectivamente, con TU de 0,82 y 0,84. Este aumento se atribuyó a la formación de compuestos intermedios con propiedades tóxicas, a la acumulación de peróxido de hidrógeno y, en algunos casos, a la propia toxicidad del ZnO en concentraciones elevadas, lo que provocó mayor mortalidad en *Daphnia magna*, mientras que en los controles no se registraron muertes.

Estos resultados ponen de relieve que la fotocatálisis con ZnO, aunque efectiva en la degradación del colorante inicial, puede intensificar la toxicidad del efluente tratado, destacando la importancia de evaluar no solo la eliminación del contaminante, sino también los posibles efectos ecotoxicológicos de los subproductos generados durante el proceso.

Al-Mamun et al. (2019), realizaron una revisión centrada en la modificación de nanopartículas de TiO_2 , consideradas uno de los fotocatalizadores más prometedores para el tratamiento de aguas residuales textiles bajo irradiación UV. El estudio abarcó diversas estrategias de modificación, como el dopaje con metales, no metales, y combinaciones de ambos (co-dopaje), con el objetivo de minimizar las pérdidas por recombinación electrón-hueco. Asimismo, se evaluó el impacto de distintos dopantes sobre el rendimiento fotocatalítico del TiO_2 , destacando una alta eficacia en la degradación de colorantes azoicos cuando se emplearon dopantes como metales nobles, tierras raras y metales de transición. El uso de TiO_2 modificado no solo ofrece una elevada actividad fotocatalítica, sino que también presenta ventajas como su estabilidad fotoquímica, naturaleza no tóxica y bajo coste, lo que lo convierte en una opción aplicable a nivel industrial. Este tipo de modificaciones ha demostrado una elevada capacidad para remover completamente colorantes orgánicos y compuestos fenólicos presentes en aguas residuales, contribuyendo de manera importante a disminuir los niveles de contaminación hídrica.

Carbuloni et al. (2020), investigaron el desempeño fotocatalítico de los catalizadores TiO_2 y $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$, los cuales fueron previamente sintetizados y caracterizados para evaluar su eficacia en la degradación de metformina. Se determinó que la concentración óptima de TiO_2 era de 1.0 g/L, ya que esta dosis mostró un mejor rendimiento que 0.5 g/L, mientras que un aumento a 1.5 g/L no produjo mejoras significativas tras 180 minutos de reacción. El TiO_2 se encontró en fase anatasa, la forma más fotoactiva, lo cual favorece la generación de pares electrón-hueco durante la fotocatálisis. Por su parte, el ZrO_2 presentó fases cristalinas tetragonal

y monoclinica. Las reacciones de fotodegradación bajo radiación UV siguieron una cinética de pseudo-primer orden. Posteriormente, se efectuaron ensayos de toxicidad en el efluente tratado, cuyo residuo de metformina alcanzó 4 mg/L tras su degradación con TiO_2 . Los resultados indicaron que el tratamiento no afectó la germinación de semillas de lechuga ni el desarrollo de sus raíces. Para esta evaluación, se utilizaron muestras tratadas con TiO_2 a una concentración de 1,0 g/L y pH 8, en las cuales se obtuvo una germinación relativa del 100 %, a diferencia del 94 % observado en la muestra sin tratar, lo que indica que el proceso fotocatalítico no generó toxicidad en el efluente tratado.

HoiBui et al. (2022), analizaron el desempeño de un sistema fotocatalítico conformado por TiO_2 inmovilizado en un soporte cerámico para la degradación del sulfametoxazol (SMX) en agua. Para ello, consideraron distintos factores operativos, entre ellos la concentración inicial del contaminante, el pH de trabajo y la naturaleza del fotocatalizador. Los resultados mostraron que, cuando la solución contenía 5 mg/L de SMX y se sometía a siete horas de irradiación, se lograba una remoción cercana al 84.7 %. El mejor rendimiento se registró a pH entre 5 y 6, rango en el cual el SMX se mantuvo principalmente en su forma neutra y el TiO_2 alcanzó su punto de carga cero (PZC), condición que favoreció la interacción contaminante–catalizador. Los autores concluyeron que los procesos de oxidación avanzada que utilizan TiO_2 poseen un alto potencial para la eliminación de compuestos farmacéuticos, debido a las características propias del material: estabilidad química y biológica, comportamiento semiconductor, baja toxicidad y disponibilidad económica.

Sirisha et al. (2022), en su estudio llevaron a cabo la degradación fotocatalítica del colorante sintético Acid Orange (A.O), utilizando nanopartículas de TiO_2 sintetizadas mediante el método sol-gel. Estas fueron caracterizadas mediante SEM, XRD y FTIR, con el propósito de identificar su tamaño, cristalinidad y los grupos funcionales presentes. Bajo condiciones óptimas un tiempo de contacto de 45 minutos, dosis de fotocatalizador de 1.5 g/L, pH 8 y

temperatura de 333 K, se alcanzó una degradación del 99.75 %, logrando eliminar completamente el color del colorante a bajas concentraciones iniciales. La reducción del tamaño de las nanopartículas a escala nanométrica permitió incrementar su área superficial, lo que favoreció notablemente la eficiencia del proceso. Además, los resultados revelaron que la reacción fue de tipo endotérmica, ya que la eficiencia de degradación aumentó con la temperatura.

Abdu et al. (2025) desarrollaron una investigación orientada a evaluar la fotocatalisis como una alternativa sostenible y eficaz para el tratamiento de efluentes textiles, enfocándose en la degradación del colorante Basic Blue 41 mediante un compuesto de TiO_2 -biochar (TiO_2 -BC) bajo irradiación UV. Gracias a este proceso, se alcanzaron resultados muy alentadores, pues en condiciones óptimas se logró eliminar hasta un 99.6 % del colorante. Asimismo, cuando el material se aplicó en aguas residuales reales, también se registraron mejoras importantes, con disminuciones notables en parámetros como color (94,8 %), turbidez (89,3 %) y demanda química de oxígeno (66,6 %). Estas evidencias confirman no solo la elevada capacidad del TiO_2 -BC para remover contaminantes, sino que además confirman que la fotocatalisis es una herramienta prometedora, capaz de responder a un problema ambiental urgente. A ello se suma que el material mantuvo un buen desempeño tras varios ciclos de reutilización, lo que refuerza su viabilidad para futuras aplicaciones a mayor escala en el tratamiento de aguas residuales teñidas y en la degradación de compuestos basados en colorantes.

Tan et al. (2025) realizaron una revisión en la que se resalta que la fotocatalisis es una técnica avanzada con claras ventajas para el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes, debido a que genera productos finales seguros y ambientalmente amigables. En su análisis se resalta que variables ambientales y operativas como el pH, la presencia de agentes oxidantes o reductores, la concentración inicial de los colorantes y la intensidad de la radiación tienen un papel determinante en la generación de especies reactivas de oxígeno, las cuales

controlan la eficiencia global del proceso. Asimismo, se identificaron las principales etapas de degradación de los colorantes, entre las que destacan la desmetilación o des-etilación, el acortamiento del anillo, la apertura del anillo aromático y la mineralización final, todas ellas originadas por la acción oxidativa de dichas especies. Asimismo, los autores resaltan la relevancia de identificar los compuestos intermedios que se forman durante la reacción, utilizando herramientas analíticas como FTIR, espectroscopía UV-Vis, cromatografía y espectrometría de masas, ya que este seguimiento permite confirmar que la degradación alcanza realmente la mineralización completa y no solo la decoloración. Finalmente, se plantea que futuras investigaciones deben orientarse al estudio de mezclas de colorantes y aguas residuales reales, así como al desarrollo de procesos de escalamiento, con el fin de asegurar la eficiencia, la costo-efectividad y la aplicabilidad ambiental de la fotocatalisis en condiciones reales.

Salehzadeh et al. (2025) desarrollaron una investigación centrada en la obtención de nanopartículas de TiO_2 mediante el método sol-gel, utilizando tetraisopropóxido de titanio (TTIP) como precursor. Este procedimiento, conocido por su simplicidad y buen rendimiento a bajo costo, permitió generar partículas en fase anatasa, con tamaños cristalinos que oscilaron entre 25 y 50 nm, verificados mediante difracción de rayos X. En su investigación también se evaluó la capacidad fotocatalítica del material en la degradación del colorante verde malaquita bajo irradiación ultravioleta, alcanzándose en condiciones óptimas una decoloración total en 180 minutos. Este resultado se relacionó con la producción de radicales hidroxilo y superóxido generados por la separación de cargas electrón-hueco; en contraste, sin presencia de luz la remoción apenas llegó al 60 %, lo que evidenció la importancia de la activación lumínica para desencadenar el proceso fotocatalítico. Entre los resultados más relevantes, los análisis de carbono orgánico total (TOC) y demanda química de oxígeno (DQO) evidenciaron una mineralización del 72 % y una reducción de la DQO desde 874 mg/L hasta 134 mg/L, lo que confirma que el proceso no solo implica la eliminación del color, sino también la degradación

de la materia orgánica presente. Adicionalmente, se observó que concentraciones elevadas tanto de catalizador como de contaminante pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso, debido a fenómenos como la disminución de la penetración de la luz y la saturación de los sitios activos. En conjunto, estos resultados demuestran el alto potencial del TiO_2 sintetizado por el método sol-gel para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

Fujiwara et al. (2025), realizaron una evaluación ecotoxicológica integral con el propósito de determinar la eficacia de un contactor rotatorio de oxidación avanzada (RAOC), equipado con láminas de TiO_2 -zeolita, en la reducción de la toxicidad del antibiótico sulfametazina (SMT). Utilizando *Scenedesmus obliquus* como organismo bioindicador, observaron una notable disminución en la inhibición del crecimiento celular, que se redujo del 53,3 % a casi 0 % tras 96 horas de tratamiento bajo irradiación UV. Este hallazgo demuestra la alta efectividad del sistema RAOC en la eliminación de la toxicidad del SMT. Sin embargo, se detectó un intermediario de degradación con mayor toxicidad que el compuesto original, lo que resalta la importancia de evaluar también los subproductos generados durante el proceso. Además, las mediciones de DBO_5 y carbono orgánico total evidenciaron una mejora progresiva en la biodegradabilidad del efluente tratado. Esto indica que la fotocátalisis asistida con TiO_2 -zeolita no solo favorece la eliminación del contaminante principal, sino que además transforma los compuestos presentes en especies menos persistentes, menos tóxicas y más susceptibles de degradación biológica.

2.1.2. Nacional

Delgado y Santander (2017) analizaron la capacidad de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) para eliminar compuestos orgánicos presentes en efluentes textiles, empleando TiO_2 como fotocatalizador. Para ello, aplicaron diversas combinaciones de POA, como $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{O}_3$, $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ y $\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, controlando parámetros como el pH y la temperatura. Entre los procesos evaluados, el sistema

TiO₂/Fe²⁺/H₂O₂/UV destacó por su alta eficiencia, logrando una reducción de la DQO de hasta un 75.68 % a pH 6.8 y 12 °C. Asimismo, este proceso mostró una elevada capacidad de decoloración del tinte Azul Blue (R-19), alcanzando una remoción del 95.44% en soluciones preparadas en laboratorio y del 89.06 % en muestras reales provenientes de la industria textil. Estos resultados evidencian el potencial de los POA basados en TiO₂ para el tratamiento de efluentes coloreados.

Aquino (2017), desarrolló una investigación sobre el tratamiento de efluentes textiles de origen artesanal mediante fotocátalisis tanto homogénea como heterogénea, analizando el efecto del tiempo de exposición (120 y 240 minutos), las condiciones de radiación solar (cielo despejado y parcialmente nublado) y el tipo de proceso fotocatalítico empleado. En el caso de la fotocátalisis homogénea, utilizando 0,02 mg/L de sulfato ferroso heptahidratado junto con 2 g/L de peróxido de hidrógeno, se logró una degradación del 86.20% de DQO y 93.02% de color en 4 horas, cumpliendo con los límites permisibles de efluentes. Por otro lado, la fotocátalisis heterogénea, utilizando 0.25 mg/L de TiO₂ y 1 g/L de H₂O₂, alcanzó un 57.14% de degradación de DQO y 66.62% de color en el mismo tiempo, mostrando una menor eficiencia. Estos resultados destacan que una mayor duración del tratamiento mejora significativamente la degradación de contaminantes, especialmente en la fotocátalisis heterogénea, que requiere tiempos más prolongados para alcanzar niveles óptimos de remoción. Así, el tiempo de tratamiento se posiciona como un parámetro clave para la efectividad del proceso.

Huanca (2019), orientó su estudio al tratamiento de aguas residuales mediante la aplicación de fotocátalisis heterogénea, resaltando su factibilidad en función de las propiedades del efluente y su eficacia para remover contaminantes. El experimento se llevó a cabo utilizando un fotorreactor instalado horizontalmente en una zona libre de sombras, donde se trataron 24 L de efluente con TiO₂ a una concentración de 1.0 g/L y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en dos concentraciones: 1.0 y 1.5 g/L, ajustando el pH a 4. Bajo condiciones de nubosidad, con una

irradiancia solar entre 150 y 400 W/m² y un tiempo de exposición de 4 horas, se logró una degradación del 62.75 %. El análisis estadístico demostró que el tiempo de tratamiento y la cantidad de H₂O₂ añadida fueron factores determinantes en la eficiencia de remoción, mientras que el pH no tuvo un efecto significativo, aunque trabajar con un valor de pH igual a 4 mejoró la degradación en un 6.07 %.

Muñoz y Palomino (2019), evaluaron el efecto de la concentración de TiO₂ y el tiempo de tratamiento, en la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en efluentes provenientes de camales, mediante la aplicación de un proceso de fotocátalisis heterogénea. Para la experimentación, se empleó un sistema conformado por dos módulos fotocatalíticos, con los cuales se trataron 24 l de una solución sintética elaborada a base de biftalato de potasio (0,76 g/L), utilizado como compuesto modelo. Las condiciones de operación fueron establecidas variando el tiempo de exposición (3, 4 y 5 horas) y la dosificación de TiO₂ (1; 1,5 y 2 mg/L). Adicionalmente, se incorporó peróxido de hidrógeno (3 mL/L) como agente oxidante, se controló el pH mediante la adición de ácido clorhídrico y se utilizó radiación solar como fuente energética del proceso. Los resultados obtenidos evidenciaron que el mayor rendimiento se alcanzó bajo condiciones de pH 6, un tiempo de tratamiento de 4 horas y una concentración de TiO₂ de 1,52 mg/L, logrando una remoción de DQO de 86,75 % en la solución sintética. Sin embargo, al trabajar con agua residual real, la eficiencia del proceso disminuyó considerablemente, registrándose una reducción de 36,31 % tras 5 horas de tratamiento. Asimismo, se determinó que el tiempo de exposición constituye un factor determinante en la eficiencia del proceso, mientras que la concentración de TiO₂ no presenta una relación lineal con el rendimiento, debido a que incrementos elevados pueden generar efectos adversos, como la disminución de la penetración de la radiación solar.

Requejo (2020), diseñó y evaluó un sistema fotocatalítico con el objetivo de mejorar la calidad del efluente proveniente del teñido textil, empleando dióxido de titanio (TiO_2) activado mediante radiación UV. La investigación, de tipo preexperimental y basada en un enfoque cuantitativo descriptivo, consideró un total de 16 pruebas en las que se modificaron tanto las concentraciones del catalizador (100, 300, 500 y 1000 mg/L) como los tiempos de exposición (1, 2, 3 y 4 horas). Las condiciones que produjeron los mejores resultados correspondieron al uso de 1000 mg/L de TiO_2 y una irradiación de 4 horas. En este escenario se registró un descenso del pH de 8.40 a 7.44, una disminución de la conductividad eléctrica desde 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 1281 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una reducción de la DQO de 1100 mg/L a 478 mg/L. Estos cambios permitieron que los valores finales cumplieran con lo exigido por la normativa ambiental vigente.

Toribio (2021), analizó la aplicación de la fotocatálisis heterogénea para la eliminación del color en efluentes generados por el teñido de jeans reutilizados, utilizando un reactor tubular expuesto a radiación solar. Se probaron distintas concentraciones de TiO_2 (0,25–0,50 g/L), H_2O_2 (0,24–0,48 g/L) y valores de pH (3–8). Los resultados mostraron que la concentración de H_2O_2 y sus interacciones con TiO_2 y pH tuvieron un efecto significativo en la eficiencia del proceso. Las mejores condiciones fueron 0,48 g/L de TiO_2 , 0,24 g/L de H_2O_2 y pH 8, alcanzando una remoción máxima de color del 92,9 %. Sin embargo, al aumentar H_2O_2 a 0,48 g/L, la eficiencia disminuyó, probablemente por sobredosificación, ya que el exceso de peróxido puede neutralizar radicales libres. También se observó que la remoción de color variaba con la concentración de TiO_2 según los niveles de H_2O_2 y pH, siendo más marcadas las diferencias a pH 8 y mínimas a pH 3.

Ticona y Tola (2021), evaluaron la aplicación de la fotocatalisis heterogénea para la degradación de azul de metileno en efluentes textiles de Arequipa, mediante un diseño experimental factorial 2K. Se evaluaron principalmente la concentración de TiO_2 (0,015–0,025 g/L), la concentración de H_2O_2 (0–0,5 mL/L) y el tiempo de reacción (2–3 h). Los resultados mostraron una remoción máxima del 95,25 % del colorante al emplear 0,025 g/L de TiO_2 , 0,5 mL/L de H_2O_2 y 3 horas de exposición. El análisis evidenció que las variables más determinantes fueron la concentración de TiO_2 y el tiempo de reacción, mientras que el tipo de medio tuvo menor impacto. La optimización se logró utilizando bajas concentraciones de TiO_2 (0,025 g/L) y considerando la calidad del catalizador (TiO_2 Degussa P25, 80 % anatasa, 20 % rutilo). Se concluyó que el tiempo de reacción y la cantidad de TiO_2 están inversamente relacionados, y que el uso de H_2O_2 solo es recomendable para lograr depuraciones superiores al 90 %, debido a su costo adicional.

Camarena (2021), aplicó la fotocatalisis heterogénea para estudiar la degradación de bencilpenicilina en solución acuosa, centrándose en cómo el pH y la cantidad de TiO_2 influyen en el rendimiento del proceso. Durante los ensayos realizados en un fotorreactor, se utilizaron diferentes condiciones experimentales para evaluar la influencia de estos factores y su interacción en la degradación del antibiótico. Los resultados indicaron que la mayor eficiencia del sistema se alcanzó bajo condiciones ácidas, específicamente a pH 3, utilizando 0,2 g/L de TiO_2 . Estas condiciones óptimas, determinadas mediante criterios de optimización matemática, evidencian que no es necesario emplear grandes cantidades de fotocatalizador, ya que su alta área superficial facilita la generación de especies oxidantes. Este rendimiento está condicionado por un entorno ácido, coincidiendo con antecedentes que reportan que valores bajos de pH resultan más favorables para la degradación de fármacos mediante fotocatalisis.

Tejada (2022), llevó a cabo una serie de bioensayos utilizando organismos acuáticos entre ellos *Lemna minor*, *Daphnia magna*, *Physa venustula* y *Xenopus laevis* con el fin de determinar la ecotoxicidad aguda y el riesgo ambiental asociado a las aguas residuales generadas durante el proceso de curtido de pieles. Para los experimentos, el efluente se diluyó con agua de grifo declorinada, obteniendo tratamientos con concentraciones de 1,5 %, 3,0 % y 4,5 % (v/v), además de un control con solo agua inocua. Los bioensayos se realizaron bajo condiciones controladas para evaluar adecuadamente el impacto del efluente. Los resultados evidenciaron impactos negativos sobre la biota, reflejados en la reducción del número de frondas en *Lemna minor* y en un incremento de la mortalidad de *Daphnia magna*, con CL50 de 2,52 % a las 24 horas y 1,13 % a las 48 horas. El efluente fue clasificado como muy tóxico, reflejando un considerable riesgo ambiental debido a la alta concentración de contaminantes. Los ensayos de toxicidad, afectados por factores físicos, químicos, tiempo de exposición y disponibilidad del agente químico, permiten establecer parámetros que sirven como indicadores del impacto del efluente en los ecosistemas acuáticos.

García y Ayala (2024), en su estudio evaluaron variables como el pH, la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y TiO_2 . Los resultados mostraron que una combinación de 0.768 ml/100 ml de TiO_2 , 7.5 ml/L de H_2O_2 y un pH de 4.3 alcanzó una eficiencia de remoción de DQO de hasta un 90.17 %. Se destacó la importancia de utilizar nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en el tratamiento de aguas residuales debido a su alta eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante la generación de radicales libres bajo luz ultravioleta. Este proceso permite una remoción más efectiva de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) sin generar subproductos nocivos.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Industria Textil

El sector textil se caracteriza por estar incluido entre los ámbitos productivos con mayor presencia y más importantes en el ámbito mundial; no obstante, enfrenta un desafío importante relacionado con la producción descontrolada de efluentes industriales. Durante las fases húmedas del proceso de manufactura textil, que comprenden la impresión, el teñido y el acabado, se demanda una cantidad elevada de agua, con un consumo aproximado que oscila entre 120 y 280 litros por cada kilogramo de tela procesada, además del uso de una extensa gama de colorantes y sustancias químicas (Khan et al., 2024).

Este alto consumo resalta el significativo impacto ambiental de la industria. Como consecuencia, se generan grandes volúmenes de aguas residuales, cuya composición varía según los procesos de manufactura empleados, las clases de fibras utilizadas y las sustancias químicas aplicadas a lo largo de la producción (Jegatheesan et al., 2016).

El manejo de los efluentes producidas por el sector textil presenta una notable complejidad, ya que cada etapa del proceso productivo requiere agua de alta pureza, usualmente de baja dureza y sin contaminantes. Sin embargo, este tipo de aguas suele estar altamente contaminada con colorantes difíciles de eliminar, sustancias tóxicas como fenoles, y metales pesados. Además, presentan niveles elevados de pH, materia orgánica y sólidos disueltos. Todo esto hace que los métodos tradicionales de tratamiento no siempre sean suficientes. Por ello, se hace imprescindible desarrollar alternativas más eficaces, sostenibles y económicamente viables, capaces no solo de facilitar la reutilización del recurso hídrico, sino también de garantizar la salud pública y la protección ambiental (Kishor et al., 2021).

Por lo general, los efluentes generados son sometidos a tratamientos convencionales (físicos, químicos y biológicos), estos suelen presentar limitaciones en la eliminación del color y la materia orgánica. Además, estos procesos resultan poco eficientes y producen grandes

volúmenes de residuos secundarios, como lodos con alto grado de toxicidad (Holkar et al., 2016).

2.2.1.1. Industria textil en el Perú

En territorio peruano, el sector textil ha registrado un notable incremento significativo durante los años recientes, abarcando actividades que van a partir del procesamiento de fibras de origen natural y sintéticas hasta la confección de prendas y diversos artículos textiles. Este avance se ha sostenido gracias a la calidad reconocida de las fibras peruanas y a una cadena productiva bien integrada. Un ejemplo clave es la fibra de alpaca, que da sustento a más de 82 mil pequeños criadores, especialmente en regiones como Puno, Cusco y Arequipa (Vargas & Morillos, 2022). Para seguir creciendo, muchas pequeñas y medianas empresas del sector textil han incorporado maquinaria y tecnología, lo que ha fortalecido su producción y presencia en mercados internacionales. Sin embargo, esta modernización ha traído consigo un aumento en el consumo hídrico y en la producción de aguas residuales contaminadas, particularmente en procesos como el teñido y el lavado (Díaz, 2021). En el **Anexo 13** se presenta el mapa de procesos del teñido de fibra natural en la industria textil.

2.2.2. Colorantes

Se trata de compuestos que se caracterizan debido a su capacidad de absorber y emitir luz en el rango del espectro visible (Cabo, 2015). Se trata de compuestos solubles tanto en agua como en diferentes disolventes orgánicos, y se consideran agentes que permiten otorgar color a diversos tipos de fibras (Hernández et al., 2018). Es decir, cuentan con la facultad de teñir de manera estable células, tejidos o materiales, ya que suelen presentar una elevada resistencia frente a factores ambientales como la luz, el agua, los agentes oxidantes o los cambios de temperatura (Castillo, 2019).

2.2.2.1. Origen de los Colorantes

De acuerdo con lo señalado por Corrales y Caycedo (2020), los colorantes pueden clasificarse según su origen de la siguiente manera:

- **Colorantes Naturales**

Son colorantes que se obtienen de manera directa a partir de organismos vivos, ya sean plantas, animales u otras fuentes biológicas.

- **Colorantes Artificiales**

Provenientes de minerales, estos colorantes son elaborados mediante procesos químicos en laboratorio.

2.2.2.2. Estructura química de los colorantes

Por lo general, las moléculas de los colorantes incluyen dos tipos clave de grupos funcionales: los cromóforos y los auxocromos.

- **Grupo Funcional Cromóforo.**

Las estructuras cromóforas son las unidades químicas responsables de la absorción lumínica, y por ello determinan la aparición del color en las sustancias que los poseen. Cuantos más cromóforos se encuentren presentes en una molécula, mayor será la intensidad del color generado. Generalmente, se requiere la presencia de más de un cromóforo para que una fibra adquiriera una coloración perceptible (Pereira, 2014).

Corrales y Caycedo (2020), señalan que estos compuestos pueden organizarse según su estructura molecular, la cual puede incluir la presencia de dobles o triples enlaces entre átomos de carbono, así como grupos funcionales característicos como nitroso, azo, nitro y carbonilo, entre otros. La clasificación correspondiente se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Principales grupos funcionales cromóforos

Grupo funcional cromóforo	
Azo	$R-N=N-R'$
Carbonilo	$R-C(=O)-R'$
Nitroso	$R-N=O$
Nitro	$R-NO_2$

Nota: Tomado de Corrales y Caycedo (2020).

- Grupo Funcional Auxócromo.

Los auxocromos son grupos funcionales que, al poseer carga positiva o capacidad donadora/aceptora de electrones, Potencian la acción de los cromóforos dentro de una molécula, reforzando así la saturación del color y contribuyendo a la adherencia del colorante al sustrato (Cabo, 2015).

Asimismo, estos grupos incrementan la solubilidad del colorante en medios acuosos y favorecen su afinidad con la fibra, además de aportar cierta estabilidad frente a la acción de la luz (Pereira, 2014).

De acuerdo con Corrales y Caycedo (2020), los auxocromos pueden agruparse en distintas categorías, entre las que se incluyen los grupos metilo, halógenos, hidroxilo, carboxilo y amino. La clasificación respectiva se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2
Principales grupos funcionales Auxócromos.

Grupo funcional Auxócromo	
Hidroxilo	–OH
Amino	–NH ₂
Carboxilo	–COOH

Nota: Tomado de Corrales y Caycedo (2020).

2.2.2.3. Clasificación por su Método de Aplicación

La selección del método de aplicación está determinada por el tipo de fibra como la lana, algodón, nylon o poliéster, ya que cada material requiere técnicas de teñido específicas que fluctúan según la afinidad y el grado de fijación que pueden lograr los colorantes (Hernández et al., 2018).

En el ámbito textil, los colorantes se categorizan de acuerdo con el modo en que se aplican y de la afinidad que presentan frente a diversos tipos de fibras. Cada categoría posee propiedades específicas relacionadas con su solubilidad, capacidad de fijación, resistencia al lavado y estabilidad frente a la luz. En la siguiente tabla se resumen las características principales de cada categoría y los materiales en los que se emplean.

Tabla 3*Clasificación de los colorantes según su método de aplicación*

Tipo de Colorante	Características Principales	Grupos cromóforos principales	Fibras Aplicables	Referencias
Directos	Solubles en agua, requieren alta temperatura y sal para su fijación, demuestran alta resistencia a la luz, pero baja resistencia al lavado. Ofrecen colores brillantes, aunque los tonos oscuros pueden desvanecerse con el lavado doméstico.	Azo	Lana, nylon, papel, tintas, piel, seda.	(Estacio, 2020)
Ácidos	Colorantes aniónicos aplicados en baños neutros o ácidos. La adición de sal reduce la velocidad de fijación, logrando un teñido más uniforme.	Azo, Antraquinona, Trifelnilmetano y Nitro	Nylon, lana, seda, papel, tintas, piel, poliamida.	(Botero et al., 2010)
Reactivos	Alta solidez al lavado y humedad, tienen gran influencia a la temperatura y pH. Presentan una amplia gama de colores, pero originan efluentes complicados debido a la débil fijación en la fibra, lo que genera un efluente difícil de tratar y de reusar.	Azo y Antraquinona	Algodón, seda, lana, nylon.	(Caballero et al., 2020)
Básicos	Colorantes catiónicos con carga positiva, afinidad por los ácidos nucleicos (ejemplo: azul de metileno). Se utilizan en aplicaciones biológicas y textiles.	Azo, Antraquinona y Trimetilmetano	Aplicaciones en biología, teñido de papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda.	(Llanes et al., 2021)
Dispersos	Baja solubilidad en agua, diseñados para disolverse en ciertas fibras sintéticas. Su importancia aumentó con la aparición de tejidos como el poliéster.	Azo, Antraquinona y Nitro	Poliéster, acrílico, poliamida, acetato, plásticos.	(Chaires et al., 2018)
Mordaz	Requieren sales metálicas (como aluminio o cromo) para fijarse en la fibra, lo que mejora la resistencia del teñido al paso del tiempo, la luz y el agua.	Azo y Antraquinona	Lana, rayón, algodón.	(Papa, 2018)
Sulfurosos	Contienen azufre en su estructura química, generan colores intensos y económicos. Son resistentes al lavado, pero su aplicación es más compleja y la gama de matices es limitada.	Estructuras aromáticas con azufre	Lana, piel, algodón	(Huang, 2016)
Tina	Presentan excelente resistencia a la luz y el agua, pero su aplicación es costosa y más compleja. Se aplican en forma soluble y luego se transforman en insolubles dentro de la fibra.	Índigos y Antraquinona	Lana, rayón, algodón.	(Guamanquispe, 2011)

Nota. Elaboración propia

2.2.2.4. Colorantes en la Industria Textil

Son compuestos que pueden disolverse en agua o en diversos solventes orgánicos y cuya función principal es adherirse a diversos materiales para proporcionarles una coloración duradera. Estos materiales pueden ser fibras naturales de origen animal o vegetal, así como fibras sintéticas, incluyendo lana, seda, algodón, lino y rayón. La fijación del colorante puede producirse a través de una reacción química con la fibra o mediante una unión física entre ambos (Ponce de León & Valdivia, 2014).

El vertido de colorantes sintéticos en los cuerpos hídricos puede degradar significativamente su calidad, alterando sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, lo cual las convierte en un peligro tanto para el consumo humano como para los organismos acuáticos. La elevada concentración de pigmentos limita el paso de la luz solar, limitando los procesos de fotosíntesis y reduciendo el oxígeno presente en el agua, alterando así el equilibrio ecológico. Algunos compuestos, como los colorantes azoicos, resultan tóxicos para diversas especies acuáticas y pueden interferir en los ciclos naturales del agua. Además, su persistencia en la ambiente prolonga sus efectos negativos sobre los ecosistemas (Khan et al., 2024).

Dentro de los grupos de colorantes más utilizados se encuentran aquellos que contienen estructuras del tipo azo, antraquinona, oxazina, tiazina o estilbeno, siendo los colorantes azoicos y antraquinónicos los de mayor relevancia industrial.

- **Colorantes Azo**

Los colorantes azoicos constituyen el grupo de mayor uso en la industria textil, concentrando cerca del 70 % de los colorantes orgánicos disponibles en el mercado (Hernández et al., 2018). Su popularidad se atribuye a su bajo costo, simplicidad de aplicación a nivel industrial, y a la amplia gama de tonalidades que ofrecen, además de una buena solidez del color.

Desde el punto de vista estructural, estos colorantes se distinguen por contener uno o varios grupos azo, los cuales enlazan dos anillos aromáticos. La molécula suele incorporar también grupos hidroxilo o amino que actúan como auxocromos. Dentro de este grupo, los colorantes directos ácidos son especialmente relevantes, ya que abarcan prácticamente todo el espectro de colores, desde amarillos hasta negros (Marcano, 2018).

A pesar de su utilidad, los colorantes azoicos como ocurre con muchos colorantes sintéticos presentan una baja biodegradabilidad; sin embargo, ya se han desarrollado tratamientos específicos para facilitar su degradación (Hernández et al., 2018).

- **Colorantes Antraquinona**

De acuerdo con lo indicado por Vélez y Villa (2012), las antraquinonas representan la base estructural de una gran variedad de colorantes presentes tanto en la industria como en la naturaleza. En primer lugar, las agliconas antraquinónicas se caracterizan por ser compuestos sólidos con tonalidades que van desde un amarillo tenue hasta un pardo rojizo. Estas moléculas funcionan como auxocromos, ya que modifican la longitud de onda en la que la luz es absorbida, generando colores cálidos como el rojo o el púrpura. Además, presentan una solubilidad notable en disolventes orgánicos como éter, cloroformo, alcohol caliente y benceno. En contraste, los glucósidos antraquinónicos derivados de las agliconas suelen ser cristalinos, de coloraciones más suaves y solubles tanto en agua caliente como en mezclas hidroalcohólicas. Cabe resaltar que las antraquinonas se hallan distribuidas en gran medida en la naturaleza, en grupos tan diversos como plantas, microorganismos, equinodermos e insectos, lo que refleja su importancia biológica y química.

2.2.3. Aguas Residuales

Se denomina aguas residuales a aquellas cuyo estado ha sido transformado por la intervención humana, lo que exige su tratamiento antes de ser reutilizadas, vertidas en cuerpos de agua o liberadas en redes de alcantarillado.

Según la OEFA (2014), estas aguas se agrupan en tres categorías principales domésticas, municipales e industriales en función de su procedencia y de las particularidades que presentan. A continuación, se detalla cada una de estas clasificaciones.

2.2.3.1. Clasificación de Aguas Residuales

- **Aguas Residuales Domésticas**

Son las que se generan en viviendas y establecimientos comerciales, ya que contienen residuos orgánicos y otras sustancias generadas por la actividad cotidiana de las personas. Su adecuado tratamiento es fundamental para prevenir impactos negativos en la salud pública y el entorno ambiental.

- **Aguas Residuales Municipales**

Se originan por actividades domésticas, pero pueden encontrarse combinadas con aguas pluviales o con vertidos industriales que hayan sido objeto de un tratamiento previo. Una gestión adecuada dentro de los sistemas de alcantarillado contribuye a reducir sus efectos ambientales y asegura una disposición final segura.

- **Aguas Residuales Industriales**

Estas aguas se generan a causa de actividades productivas y pueden contener diversos contaminantes químicos y materiales específicos según la industria de origen, como la extracción minera, la agricultura, la manufactura y la agroindustria. Debido a su composición, requieren tratamientos especializados previo a su vertido o reutilización, con el fin de mitigar su impacto sobre el medio ambiente.

Los efluentes industriales pueden originarse en distintas etapas de producción, transformación o manipulación en las que se emplea agua como insumo. Su caudal y composición son altamente variables, no solo entre diferentes industrias, sino también dentro de un mismo sector productivo. Además, la emisión de estos vertidos no siempre es continua, ya que algunas industrias generan aguas residuales en horarios específicos o solo en

determinadas épocas del año, dependiendo del proceso industrial. Asimismo, la carga contaminante y el volumen de descarga pueden fluctuar a lo largo del día, lo que dificulta su tratamiento y hace necesario un estudio específico para cada caso con el objetivo de aplicar soluciones eficaces (Garcia & Giraldo, 2011).

a) Agua residual textil

Los efluentes derivados por el sector textil suelen contener una amplia variedad de colorantes junto con distintos compuestos orgánicos e inorgánicos, lo cual supone una amenaza para el equilibrio de los ecosistemas y la salud humana. El vertido de estas sustancias en cuerpos de agua ha despertado creciente preocupación debido a los efectos negativos que producen sobre la biota acuática. Según el Índice de Color, en la actualidad se producen más de 10 000 variedades de tintes a nivel mundial, con una fabricación anual cercana a las 700 000 toneladas (Samsami et al., 2020).

2.2.4. Tratamiento de Aguas Residuales

La gestión de aguas residuales abarca la aplicación de diferentes operaciones y procesos de naturaleza física, química y biológica que permiten remover o disminuir los compuestos contaminantes disponibles en el agua. Su finalidad es lograr una depuración adecuada que reduzca al mínimo las repercusiones ambientales generadas por su descarga.

2.2.4.1. Clasificación de Tratamiento de Aguas Residuales

Actualmente, se encuentran diferentes procesos orientados al tratamiento de aguas residuales industriales, que abarcan métodos físicos, químicos y biológicos. La elección depende de su composición y normativas ambientales. La **Figura 1** desglosa los principales tratamientos utilizados.

- **Tratamiento Preliminar**

El tratamiento inicial o previo constituye la etapa inicial en la purificación de aguas residuales. Su objetivo es retirar los sólidos de gran tamaño y los granos de arena que puedan

estar presentes en el efluente. Debido a que en esta fase se remueven materiales que podrían obstruir o deteriorar los equipos, también se le conoce como un proceso de separación o exclusión de sólidos, ya que evita que estos materiales, que podrían afectar el rendimiento de los equipos, interfieran en las distintas fases del tratamiento del agua (Aguilar & Rey, 2021).

- **Tratamiento Primario**

La etapa primaria del tratamiento de aguas residuales está orientada a la eliminación de sólidos suspendidos y a la disminución parcial de la carga orgánica mediante la aplicación de operaciones físicas. Para ello, se emplean procesos de separación que permiten retirar materiales presentes en el efluente, contribuyendo no solo a la reducción de contaminantes, sino también a la recuperación de ciertos subproductos con potencial de aprovechamiento posterior (Aguirre, 2019).

- **Tratamiento Secundario**

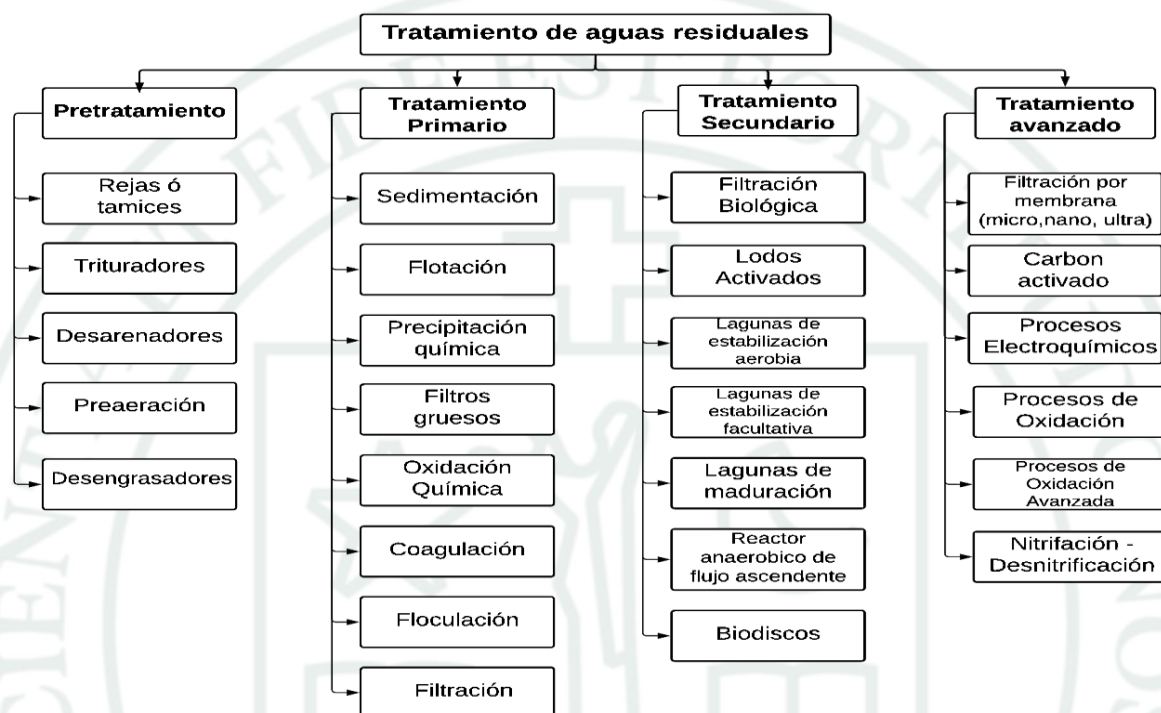
En la fase secundaria, el tratamiento se basa en mecanismos de tipo biológico, donde microorganismos degradan la materia orgánica presente a través de procesos bioquímicos. Esta etapa permite alcanzar reducciones significativas de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), con eficiencias que pueden oscilar entre el 50 % y el 95 %. Como resultado, se obtiene una mejora sustancial en la calidad del agua residual, facilitando su descarga controlada o su posible reutilización (SINIA, 2016).

- **Tratamiento Avanzado o Terciario**

Su objetivo es mejorar los procesos anteriores al eliminar los contaminantes remanentes, reduciendo su concentración para facilitar su reutilización en otros procesos o actividades. Estos tratamientos suelen tener un costo más elevado que los previos, debido a que están enfocados en eliminar compuestos más específicos y de difícil tratamiento (Aguirre, 2019).

La clasificación del tratamiento de aguas residuales se presenta en la **Figura 1**, organizada de manera que resulta más fácil entender cómo se distribuye este proceso y cómo se relacionan sus diferentes partes.

Figura 1
Clasificación del tratamiento de aguas residuales



Nota Elaboración propia

2.2.5. Tratamiento de Aguas Residuales Textiles

Los colorantes caracterizados por estructuras aromáticas complejas que se encuentran en los efluentes textiles suelen mostrar una elevada resistencia a los métodos de tratamiento convencionales. Esto se debe a su capacidad oxidante, su habilidad para quelar metales y su limitada solubilidad en agua. Por ello, es común recurrir a los procesos de oxidación avanzada, los cuales han evidenciado ser particularmente eficaces para la remoción de estos compuestos (Ramadan et al., 2022).

2.2.5.1. Procesos de Oxidación Avanzada (POAs)

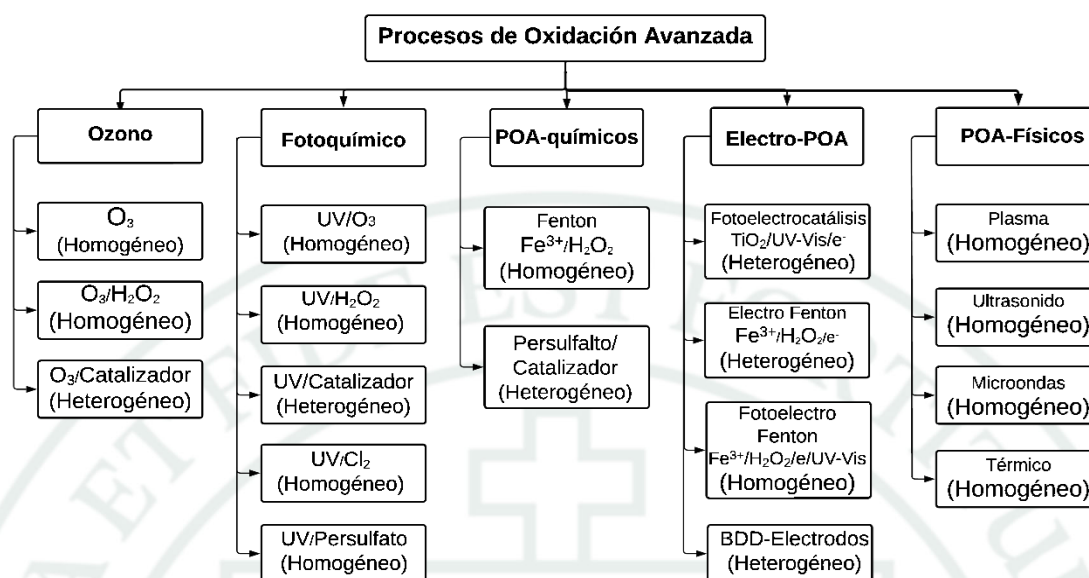
Los procesos de oxidación avanzada abarcan un conjunto de técnicas fisicoquímicas capaces de generar cambios significativos en la composición de los contaminantes. Su funcionamiento se basa en la producción de especies reactivas de vida corta, entre las que el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) destaca por su elevada capacidad oxidante (Rincon, 2020).

A diferencia de los tratamientos convencionales, los POA producen de manera directa agentes oxidantes altamente reactivos, como radicales hidroxilos, especies reactivas de oxígeno, radicales derivados del agua y peróxidos, que pueden atacar y descomponer la materia orgánica hasta convertirla en compuestos menos dañinos o inocuos. La cantidad y el tipo de oxidantes formados dependen tanto del proceso seleccionado como de las características propias del efluente que se va a tratar (Ramadan et al., 2022).

Los procesos oxidativos avanzada se agrupan en dos categorías: homogéneos y heterogéneos, de acuerdo con la fase donde ocurren las reacciones químicas. En los sistemas heterogéneos, la activación del proceso se logra mediante el uso de materiales semiconductores entre ellos TiO_2 y ZnO que actúan como catalizadores y facilitan la formación de especies oxidantes.

La **Figura 2** muestra de forma clara los distintos tipos de Procesos de Oxidación Avanzada (POA); en ese sentido, se observa que estos métodos han demostrado ser bastante eficaces en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Además, permiten degradar compuestos complejos, como los colorantes, que no se eliminan fácilmente con tratamientos convencionales, por lo que representan una alternativa útil para mejorar la calidad del agua tratada.

Figura 2
Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada



Nota: Adaptado de Ramadan et al. (2022)

2.2.5.2. Tratamiento Fotocatalítico

El tratamiento fotocatalítico se considera uno de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) más analizados en la remediación ambiental, en virtud de su capacidad para producir especies oxidantes a partir de un semiconductor activado por luz. Este mecanismo se basa en la fotoactivación de un material catalítico que no se consume durante la reacción el cual, al absorber radiación, promueve la formación de radicales altamente reactivos en presencia de oxígeno. Se trata de una tecnología considerada “verde”, ya que puede operar utilizando únicamente la energía solar junto con el oxígeno disponible de manera natural. Además, presenta la ventaja de funcionar a temperatura y presión ambiente, lo que implica menores costos de operación y permite alcanzar la mineralización casi completa de diversos colorantes y contaminantes orgánicos (Ramadan et al., 2022).

Desde una perspectiva más técnica, la fotocatalisis se define como el aumento de una reacción fotoquímica que tiene lugar en la superficie de un catalizador semiconductor. Cuando este material es irradiado con luz UV ya sea solar o artificial se generan pares electrón–hueco, capaces de iniciar procesos oxidativos y reductores. Estos pares de carga producen radicales

libres de alta reactividad, los cuales desencadenan en un conjunto de reacciones secundarias responsables de la eliminación de los contaminantes presentes en el agua. La eficacia del tratamiento está estrechamente ligada a la capacidad del catalizador para generar, separar y transportar dichos portadores de carga antes de que se recombinen (Cantero, 2015).

Según Cantero (2015), señala que el tratamiento fotocatalítico puede resumirse en los siguientes aspectos, los cuales permiten comprender su funcionamiento y aplicaciones más relevantes:

- Generación de portadores de carga: la absorción de energía induce la generación de pares electrón–hueco.
- Separación y movilidad de dichos pares: la eficiencia del proceso requiere que electrones y huecos permanezcan separados el tiempo suficiente para reaccionar.
- Reacciones superficiales inducidas: los portadores de carga intervienen en reacciones de redox con las especies capturadas en la superficie del catalizador, dando lugar a productos finales menos tóxicos o completamente mineralizados.

- **Fotocatálisis Homogénea**

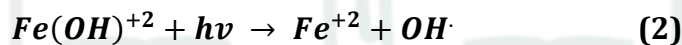
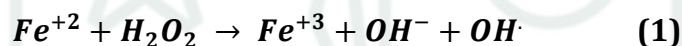
La fotocatalisis homogénea, comúnmente vinculada al proceso Foto-Fenton, se basa en la descomposición de compuestos orgánicos mediante la acción de especies oxidantes altamente reactivas, en particular el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$). En este tipo de sistema, tanto el catalizador y los reactivos pertenecen a la misma fase, usualmente disueltos en el medio acuoso. Entre los agentes más empleados destacan el ozono y los sistemas basados en hierro, como la reacción $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$, ampliamente utilizada por su capacidad para generar radicales oxidantes en condiciones controladas.

Este procedimiento, clasificado dentro de los Procesos de Oxidación Avanzada, requiere de radiación UV para activar las reacciones catalíticas, promoviendo así la formación de

radicales libres capaces de atacar y descomponer compuestos orgánicos de difícil eliminación (Cantero, 2015).

a) Mecanismo de la Fotocatálisis Homogénea:

La radiación solar mejora significativamente el rendimiento del proceso Foto-Fenton, ya que favorece la fotólisis de los complejos hidroxilados de Fe^{3+} , originando Fe^{2+} . Este ion ferroso genera, a su vez, cantidades adicionales de radicales hidroxilos ($\bullet OH$), los cuales potencian la eliminación de los contaminantes presentes en el medio. El procedimiento se considera catalítico porque durante la reacción de Fenton el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} , pero posteriormente este Fe^{3+} es reducido nuevamente a Fe^{2+} por efecto de la radiación tanto solar como artificial permitiendo que el ciclo catalítico continúe. En ambas etapas se produce la formación de radicales $\bullet OH$, responsables del elevado poder oxidante característico del sistema (Aquino, 2017).



Nota. (Aquino, 2017)

- Fotocatálisis Heterogénea

Se caracteriza por desarrollarse en sistemas donde el fotocatalizador y los reactantes se encuentran en fases distintas. Habitualmente, el fotocatalizador corresponde a un sólido como dióxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO) u otros óxidos metálicos mientras que los compuestos a tratar se encuentran en fase líquida o gaseosa. Cuando el material catalítico es irradiado, este absorbe la energía luminosa y genera pares electrón-hueco, los cuales intervienen en reacciones de oxidación y reducción con las especies adsorbidas sobre su superficie (Khan et al., 2024).

En el ámbito del tratamiento de aguas, la fotocatálisis heterogénea ha cobrado gran relevancia debido a su eficacia para depurar mezclas complejas de contaminantes. Uno

de sus beneficios más destacados es la oportunidad de usar la radiación solar como origen de activación, lo que la convierte en una tecnología energéticamente favorable y con un impacto ambiental reducido. Asimismo, este método ha demostrado ser capaz de eliminar eficazmente una amplia gama de sustancias nocivas que se hallan en el agua, el aire y el suelo. Entre ellas se incluyen óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), iones metálicos, contaminantes orgánicos persistentes (COP), residuos plásticos, microorganismos patógenos y compuestos derivados de combustibles fósiles con contenido de azufre (Wang et al., 2022).

a) Mecanismo de la Fotocatálisis Heterogénea:

En estos procesos, el catalizador funciona como un material semiconductor que, al recibir radiación, capta fotones con la energía necesaria para superar su banda prohibida. Este aporte energético provoca el salto de electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, generándose simultáneamente huecos en la banda de valencia y conformando pares electrón-huecos activos. Estos portadores de carga migran hacia la superficie del semiconductor, donde reaccionan con las especies redox previamente adsorbidas. La irradiación tanto solar como artificial activa de forma simultánea reacciones de oxidación y reducción: Los huecos promueven procesos foto-oxidativos, mientras que los electrones en la banda de conducción favorecen las reacciones foto-reductoras (Aquino, 2017).

La fotocatálisis heterogénea resulta especialmente adecuada para el presente estudio, puesto que representa una opción factible, sustentable y altamente eficiente para el tratamiento de aguas residuales textiles. Su activación utilizando radiación solar o mediante lámparas UV de baja potencia permite disminuir el empleo de energía, y su funcionamiento bajo condiciones ambientales evita la necesidad de equipos complejos. Además, permite la eliminación simultánea de diversos contaminantes, incluidos compuestos difíciles de degradar y microorganismos, usando únicamente semiconductores como el TiO₂ (Terreros, 2022).

- **Parámetros que influyen en la fotocatalisis Heterogénea**

a) Catalizador

Para que ocurra la reacción fotocatalítica, es fundamental utilizar un fotocatalizador, es decir, un material que acelera las reacciones de oxidación. Usualmente, estos son compuestos semiconductores que, al ser activados, generan pares de carga llamados "electrón-hueco", los cuales poseen un alto poder oxidante. Esta propiedad les permite descomponer y neutralizar contaminantes de forma eficiente (Bermejo, 2018).

En el contexto de la fotocatalisis heterogénea aplicada al tratamiento de aguas residuales se utilizan distintos semiconductores en fase sólida, entre ellos dióxido de titanio (TiO_2), dióxido de cerio (CeO_2), óxido de zinc (ZnO), dióxido de circonio (ZrO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de tungsteno (WO_3), pentóxido de vanadio (V_2O_5), sulfuro de zinc (ZnS) y sulfuro de cadmio (CdS). No obstante, varios de estos compuestos requieren elevados niveles de energía para ser activados, debido a que presentan una banda prohibida amplia que dificulta el inicio de las reacciones fotocatalíticas.

Aunque los catalizadores basados en metales nobles suelen mostrar una actividad superior, los óxidos metálicos resultan más apropiados para aplicaciones fotocatalíticas, ya que ofrecen una mayor resistencia frente a la desactivación y a la contaminación superficial del catalizador, lo que permite extender su vida útil (Al-Mamun et al., 2019).

Existen diversos fotocatalizadores con la capacidad de neutralizar contaminantes, siendo el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO) los más usados a causa de su alta eficiencia en los procesos de fotocatalisis.

i. Dióxido de Titanio

El dióxido de titanio es considerado uno de los semiconductores más utilizados en procesos fotocatalíticos, debido a su alta estabilidad química, su resistencia a la corrosión y su carácter no tóxico, ya que no presenta toxicidad. A ello se suma que es un material de bajo costo y disponible en abundancia. Su estructura cristalina le permite absorber radiación ultravioleta con longitudes de onda inferiores a 387 nm, lo que posibilita su activación por medio de la luz solar y, en consecuencia, la degradación eficiente de diversos contaminantes (Churata, 2017).

En la fotocatálisis heterogénea, un aumento excesivo del fotocatalizador puede disminuir la velocidad de reacción debido al bloqueo y dispersión de la radiación. Por ello, la concentración óptima es la mínima requerida para alcanzar el estado estacionario. En el caso del TiO_2 , este rango se encuentra entre 0,5 y 3,0 g/L (Fernández, 2012).

Mecanismo de oxidación fotocatalítica UV- TiO_2 : El proceso UV- TiO_2 es un sistema de fotocatálisis heterogénea que emplea radiación ultravioleta para promover la degradación de diversas sustancias orgánicas e inorgánicas encontrado en aguas residuales. El mecanismo global puede describirse mediante una serie de etapas sucesivas:

- Difusión de los contaminantes desde la fase líquida hasta la capa superficial del fotocatalizador.
- Adsorción de las moléculas orgánicas sobre el TiO_2 activado tras recibir radiación.
- Reacciones fotoinducidas en la superficie del semiconductor, donde los pares electrón-hueco desencadenan procesos redox.
- Liberación de los productos de degradación, ya sean intermediarios o compuestos mineralizados, desde la superficie del catalizador.
- Transferencia de estos productos hacia la fase líquida, completando el ciclo de depuración.

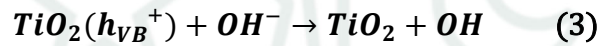
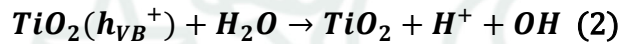
Este mecanismo se basa en la generación de especies oxidantes altamente reactivas con la capacidad de atacar contaminantes persistentes adsorbidos en el TiO₂. Entre todas ellas, el radical hidroxilo (•OH) se considera el agente oxidante más potente y el principal responsable de la degradación (Wang et al., 2022).

Generación de pares electrón - hueco

Al irradiar partículas de TiO₂ con luz cuya energía supera la banda prohibida, se producen pares electrón–hueco según la Ecuación (1):



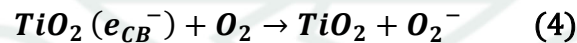
Los huecos producidos en la banda de valencia pueden oxidar agua o iones hidroxilo, originando radicales hidroxilos (2) (3):



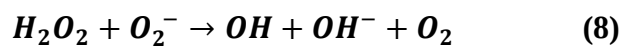
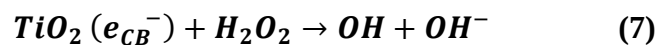
Estos radicales constituyen el agente oxidante predominante responsable de la ruptura de moléculas orgánicas.

Participación del oxígeno en la reducción

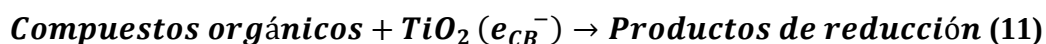
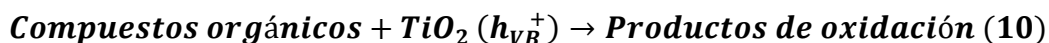
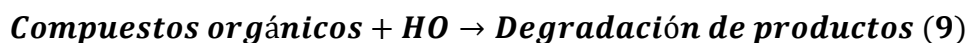
Los electrones de la banda de conducción reaccionan con el oxígeno disuelto, generando especies reductoras adicionales (4)



A partir de este anión superóxido se generan otras especies reactivas, que también contribuyen al proceso



La degradación global puede representarse de forma simplificada mediante:



*hueco de la banda de valencia ($h_{\nu B}^+$)

*electrón de la banda de conducción (e_{CB}^-)

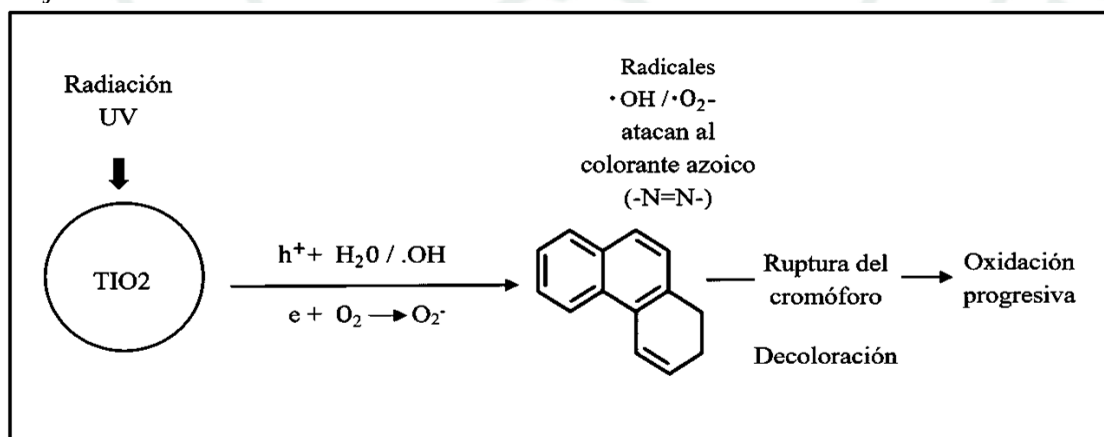
Nota. (Wang et al., 2022)

Cuando la concentración de oxígeno es baja, aumenta la recombinación de electrones y huecos, lo que reduce la eficiencia global del proceso fotocatalítico (Wang et al., 2022).

En la siguiente figura se ilustra el funcionamiento del proceso UV-TiO₂ aplicado a efluentes textiles que contienen colorantes azoicos. Este mecanismo utiliza dióxido de titanio (TiO₂) como semiconductor, que al ser irradiado con luz UV genera especies reactivas capaces de romper el grupo cromóforo (-N=N-), provocando la pérdida de color y una posterior degradación hacia compuestos más simples, tal como señala Clavijo (2013) en su revisión sobre la fotocatálisis TiO₂/UV.

Figura 3

Esquema del mecanismo de degradación fotocatalítica de un colorante azoico sobre TiO₂ bajo radiación UV.



Nota Elaboración propia

El óxido de zinc se emplea comúnmente como fotocatalizador por su capacidad para degradar diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, especialmente en medios líquidos. Generalmente, este material se aplica en forma de polvo o nanopartículas; sin embargo, también

puede encontrarse depositado como una película delgada sobre distintos tipos de sustratos (Ahumada, 2014).

Por todo lo expuesto, entre los materiales estudiados para procesos avanzados de tratamiento de aguas, el dióxido de titanio (TiO_2) destaca como el fotocatalizador más eficiente, particularmente cuando se encuentra en su forma nanoestructurada. Su alta pureza, estabilidad química, baja toxicidad y capacidad para generar eficientemente pares electrón-hueco bajo radiación permiten la generación de radicales altamente oxidantes, como el hidroxilo ($\bullet\text{OH}$).

Gracias a sus características, el TiO_2 destaca como una herramienta eficiente para la eliminación de múltiples contaminantes en efluentes. Por ello, su elección en esta investigación es adecuada, puesto que ofrece un alto rendimiento en procesos fotocatalíticos destinados al tratamiento de aguas residuales.

a) Oxidante

Durante la fotocatálisis heterogénea, los huecos generados en el semiconductor favorecen la producción de radicales hidroxilos. Para que estas especies puedan actuar eficazmente, es necesario contar con aceptores de electrones que permitan continuar el ciclo de reacciones. En este contexto, los agentes oxidantes cumplen un rol esencial al funcionar como receptores de dichas cargas. Entre ellos, el oxígeno es uno de los más empleados, ya que se encuentra de manera natural en el ambiente en fase gaseosa y puede incorporarse fácilmente al sistema (Bermejo, 2018).

b) Suministro de Electrones

El suministro de electrones al sistema tiene lugar gracias a la acción de los radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), los cuales favorecen la oxidación de los contaminantes adsorbidos en el efluente. (Bermejo, 2018).

c) Radiación

El funcionamiento del proceso fotocatalítico depende de que el catalizador reciba luz de longitud de onda apropiada para activar el material semiconductor. Cuando un fotón con energía suficiente incide sobre el semiconductor, ocasiona la excitación de un electrón desde la banda de valencia hacia la banda de conducción. Esta separación de cargas da lugar a especies altamente reactivas, como los iones hidroxilo, que actúan directamente en la degradación de los compuestos presentes en el efluente (Ticona & Tola, 2021).

En este contexto, la radiación puede ser suministrada mediante lámparas UV o radiación solar, dependiendo de la escala del tratamiento, lo que facilita la activación del fotocatalizador y optimiza el proceso de degradación de contaminantes (Terreros, 2022).

d) Temperatura

En los procesos fotocatalíticos, la temperatura tiene poca incidencia en la velocidad de reacción. Esto se explica porque la energía térmica disponible en el sistema ($kT = 0.026$ eV) es considerablemente inferior a la requerida para activar el fotocatalizador, como ocurre con el TiO_2 , cuya energía de activación es de 3.2 eV. Debido a esta diferencia, el aporte de calor al sistema no es necesario para que la reacción fotocatalítica se desarrolle de manera eficiente (Marin et al., 2005).

e) pH

La fotocatálisis suele alcanzar una mayor eficiencia cuando se realiza en condiciones ácidas, generalmente dentro de un rango de pH entre 3 y 5. Este parámetro influye tanto en las características superficiales del fotocatalizador como en la especiación química del contaminante, lo cual puede modificar la velocidad de degradación y también favorecer o impedir fenómenos como la floculación del catalizador (Bandala et al., 2017).

f) Contaminante

La naturaleza del contaminante incide de manera importante en la efectividad del proceso fotocatalítico, ya que su estructura química y propiedades afectan la adsorción en el catalizador y la velocidad de degradación. La existencia de distintos grupos funcionales puede modificar la cinética de reacción, favoreciendo o dificultando su descomposición.

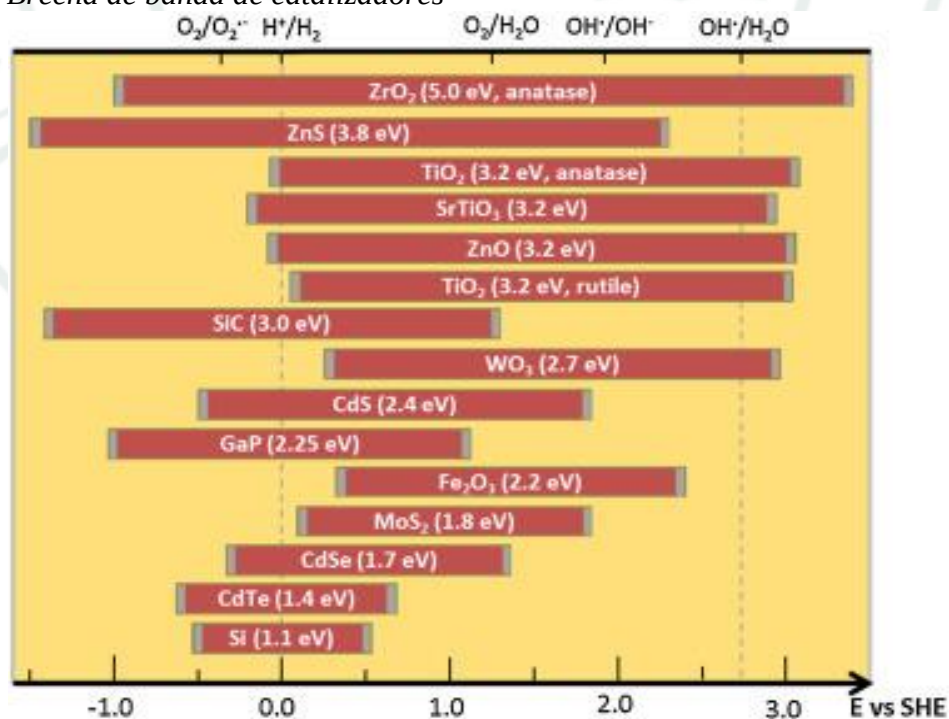
Además, la interacción con otros compuestos en el medio puede alterar la ruta de degradación, por lo que identificar los intermediarios es clave para asegurar la remoción completa del contaminante y evitar la formación de subproductos no deseados (Marin et al., 2005).

g) Longitud de onda e intensidad de radiación

El dióxido de titanio (TiO_2) posee una banda prohibida de aproximadamente 3,2 eV. Debido a ello, el material puede ser fotoactivado cuando se expone a radiación ultravioleta con longitudes de onda iguales o menores a 380 nm, lo que permite iniciar el proceso de excitación electrónica del semiconductor. Este principio se ilustra en la **Figura 4**

Figura 4

Brecha de banda de catalizadores



Nota: Adaptado de Ahmad et al. (2016)

La activación del TiO_2 ocurre cuando el material es irradiado con longitudes de onda menores a 400 nm, dentro del rango ultravioleta. A medida que esta longitud de onda se reduce, los fotones penetran menos en las partículas del material, pero su absorción por parte del semiconductor es más eficiente, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía incidente (Terreros, 2022).

De igual modo, para evaluar la eficiencia del proceso fotocatalítico es indispensable examinar cómo fluctúa la concentración del contaminante a través del tiempo, así como la cantidad disponible de radiación que entra al reactor y el número de fotones que realmente son absorbidos por el catalizador. Estos parámetros determinan de manera directa la velocidad y el grado de degradación del compuesto tratado (Aquino, 2017).

- Condiciones para realizar el Proceso de Fotocatálisis

Según Alegre y Rosales (2017), con el propósito de lograr una mineralización efectiva de los contaminantes presentes en el efluente, la fotocatálisis debe desarrollarse bajo condiciones óptimas que aseguren su eficiencia. Bajo estos parámetros, los compuestos nocivos pueden transformarse completamente en sustancias inocuas para el ambiente, lo que permite una descontaminación verdaderamente eficaz.

Los autores identifican las siguientes condiciones como determinantes en la eficacia del proceso:

a) Concentración orgánica máxima de varios cientos de mg/L:

La degradación mediada por radiación luminosa presenta un desempeño óptimo cuando los contaminantes se encuentran en concentraciones bajas o medias. Sin embargo, si la cantidad del compuesto supera 1 g/L, la fotocatálisis pierde eficacia, a menos que se lleve a cabo una dilución previa para mejorar su rendimiento.

b) Contaminantes no Biodegradables:

La fotocatálisis se presenta como una alternativa eficaz en los casos en que los contaminantes no pueden ser eliminados mediante tratamientos biológicos, los cuales suelen ser más accesibles en términos económicos.

c) Contaminantes peligrosos que están presentes en mezclas de compuestos orgánicos complejos:

Alguna de las características más destacables de la fotocatálisis es su baja afinidad selectiva, lo que permite tratar compuestos que no son biodegradables aun cuando forman parte de mezclas con otros contaminantes orgánicos.

Su eficacia se incrementa especialmente en la degradación de mezclas complejas, donde otros métodos resultan menos eficientes.

d) Contaminantes cuyo tratamiento convencional es muy difícil de realizar:

La fotocatálisis se ha consolidado como una alternativa innovadora y de alta eficacia para la eliminación de contaminantes cuya remoción resulta complicada o poco viable mediante técnicas tradicionales.

2.2.5.3. Reactores Fotocatalíticos

La configuración de un reactor fotocatalítico tiene que cumplir ciertos criterios esenciales, como minimizar la pérdida de carga, optimizar la transferencia de materia, maximizar la superficie catalítica en un espacio reducido y garantizar una absorción eficiente de la irradiación para activar la reacción deseada. Para un diseño óptimo, es fundamental considerar tres aspectos clave: la configuración del fotocatalizador, que puede presentarse en forma pulverizada o inmovilizada sobre una superficie; la fuente de iluminación ya sea solar o artificial; y la selección del tipo de reactor más apropiado según su aplicación específica (Cantero, 2015).

- **Tipos de Foto-reactores**

El diseño de un fotorreactor debe tener en cuenta su finalidad y escala para establecer la configuración y operación más adecuadas. Es fundamental determinar si tratará agua o aire, si será a nivel de laboratorio o piloto, y si operará con recirculación, de forma continua o discontinua. También se debe elegir la fuente de luz (solar o artificial), el tipo de lecho (fijo, empaquetado o fluidizado) y su compatibilidad con otras tecnologías (Cantero, 2015).

Los materiales empleados en la construcción de un fotorreactor deben tener una alta capacidad de transmisión de radiación UV y resistencia a la degradación, lo que limita sus opciones. Entre los más adecuados se encuentran los fluoropolímeros, materiales acrílicos, diversos tipos de vidrio y plásticos como el politetrafluoroetileno, etileno-tetrafluoroetileno y etilpropileno fluorado. Estos materiales, al poder extruirse en forma tubular, garantizan una óptima transmisión de luz y resistencia térmica, lo que los hace ideales para este tipo de aplicaciones (Benigno et al., 2015).

Coronel (2014), plantea una clasificación general de los reactores basada en su forma de operación, identificando tres categorías principales: el reactor por lotes o discontinuo (batch), el reactor de mezcla completa (CSTR) y el reactor de flujo pistón (PFR). La selección del tipo de reactor está determinada por las particularidades del proceso y de los objetivos del tratamiento, lo que permite elegir el diseño más apropiado para optimizar la eficiencia del sistema.

- Esta clasificación se explica a continuación:

- a) Reactor continuo de mezcla completa (CSTR)**

El reactor continuo de mezcla completa (CSTR) es extensamente utilizado en procesos industriales en fase líquida debido a su eficacia y simplicidad operativa. Este funciona de manera continua, manteniendo un flujo constante tanto de reactivos entrantes como de productos salientes, lo que favorece un estado estacionario. Su principio básico se fundamenta

en la suposición de una mezcla perfecta: se asume que los reactivos que ingresan se distribuyen de forma instantánea y homogénea con el contenido del reactor. Como resultado, la concentración de los productos en la salida es equivalente a la concentración dentro del tanque. La conversión de los reactivos en productos depende de factores como el volumen del reactor, el tiempo de residencia, la velocidad de reacción, y el caudal y concentración del reactivo alimentado. Estos parámetros se interrelacionan a través de la ecuación de diseño del CSTR (Bulmaro, 2020).

b) Reactor tipo PFR (flujo pistón)

El reactor de flujo pistón (PFR) es un equipo que opera en régimen estacionario, en el cual la constitución del fluido se modifica conforme avanza en la dirección del flujo. Este comportamiento responde al modelo ideal de flujo pistón, donde no hay mezcla axial, por lo que la conversión de los reactivos depende exclusivamente de su posición dentro del reactor. Este tipo de reactor suele tener forma de tubo hueco, aunque también puede contener material catalítico para influir en la velocidad de reacción. A medida que los reactivos avanzan por el interior del reactor, son transformados de manera continua, lo que genera un aumento progresivo en la conversión. Los perfiles de concentración y temperatura varían en función de la ubicación del fluido a lo largo del recorrido (IQR, 2020).

c) Reactor intermitente (batch)

Un reactor intermitente o batch se emplea comúnmente en operaciones a pequeña escala, especialmente para la prueba de procesos, la producción de productos de alto costo y la gestión de reacciones complejas. Su mayor ventaja se encuentra en la capacidad de lograr altas tasas de conversión, ya que los reactivos permanecen más tiempo en el reactor. Durante el desarrollo de la reacción, no se produce un flujo continuo de entrada o salida de sustancias, lo que facilita un control más preciso del proceso (Ticona & Tola, 2021).

2.2.6. Ecotoxicología

La ecotoxicología analiza el impacto de los contaminantes físicos, químicos o biológicos introducidos por la actividad humana en los ecosistemas, afectando su equilibrio y funcionalidad. A diferencia de la toxicología ambiental, que también estudia las repercusiones en la salud humana, esta disciplina se enfoca en comprender y mitigar los daños ambientales. Integrando conocimientos de diversas ciencias, examina los efectos de los contaminantes abordando el desafío de relacionar los impactos iniciales con sus consecuencias a largo plazo. Para evaluar estos efectos, se utilizan bioensayos de toxicidad, que permiten cuantificar el vínculo entre la exposición a una sustancia y su efecto en organismos o poblaciones. Estos ensayos, realizados en entornos controlados, analizan la respuesta de pequeños grupos de organismos para extrapolar sus resultados a poblaciones más grandes, proporcionando información clave sobre los mecanismos de acción tóxica y sus repercusiones ecológicas (Carriquiriborde, 2021).

2.2.6.1. Organismo modelo en ecotoxicología

La evaluación ecotoxicológica se basa en el uso de organismos modelo adecuados para analizar el impacto de la contaminación mediante pruebas estandarizadas en distintos niveles tróficos, lo que permite extrapolar los resultados a otras especies y al ecosistema en su conjunto. Estos organismos deben estar bien caracterizados, ser fáciles de criar en laboratorio y permitir su manipulación experimental. Entre los más utilizados se encuentran bacterias como *Escherichia coli*, hongos como *Saccharomyces cerevisiae*, algas verdes como *Raphidocelis subcapitata*, así como diversas especies de plantas, invertebrados, anfibios, peces y aves. Dentro de los invertebrados, *Daphnia spp.* destaca por su sensibilidad a contaminantes y su relevancia en la cadena trófica acuática, lo que lo convierte en un modelo clave para estos estudios. Dado que muchos mecanismos de toxicidad y rutas de respuesta frente a compuestos químicos se mantienen conservados evolutivamente, las alteraciones observadas en estos

organismos suelen ser indicativas de efectos que pueden manifestarse también en otras especies del mismo grupo (Brendonck et al., 2021).

2.3. Marco Legal

2.3.1. Marco Legal Internacional

2.3.1.1. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible constituyen una iniciativa impulsada por las Naciones Unidas que establece una hoja de ruta a nivel global para promover un desarrollo equilibrado. Esta propuesta integra dimensiones económicas, sociales y ambientales, planteando metas a largo plazo con horizonte al año 2030, orientadas a mejorar las condiciones de vida y garantizar la sostenibilidad de los recursos (PNUD, 2015).

2.3.1.2. Zero Discharge of Hazardous Chemicals Program - ZDHC Wastewater Guidelines V. 2.2

El programa ZDHC establece lineamientos internacionales orientados a la gestión adecuada de sustancias químicas peligrosas en la industria textil y del cuero. En particular, las ZDHC Wastewater Guidelines V. 2.2 tienen como finalidad unificar criterios a nivel global para el muestreo, análisis y reporte de aguas residuales industriales y lodos generados en los procesos húmedos, contribuyendo a mejorar el control y la reducción de contaminantes en dichos sectores.

La **Tabla 4** y la **Tabla 5** presentan los límites establecidos específicamente para la industria textil; en ese sentido, permiten identificar los valores de referencia que deben cumplirse para asegurar una adecuada calidad del efluente. Además, estos límites sirven como una guía práctica para evaluar el desempeño de los tratamientos aplicados, ya que permiten comparar los resultados obtenidos con los estándares exigidos y verificar si el efluente cumple con las condiciones necesarias antes de su descarga.

Tabla 4*Parámetros convencionales de ZDHC y aniones para aguas residuales.*

Parámetro	Unidad	Valores límite de los parámetros – TEXTIL			Métodos estándar para el análisis y las pruebas. Se pueden utilizar métodos equivalentes, pero deben ser comunicados previamente y aprobados por ZDHC.			
		Aguas residuales Nivel fundamental	Aguas residuales Nivel progresivo	Aguas residuales Nivel aspiracional	Internacional/ Europa	USA	China	India
pH	pH		6-9		ISO 10523	USEPA 150.1 SM 4500-H+	HJ 1147	IS 3025 (Part 11) Solo método electrométrico
Diferencia de temperatura	°C	Δ+15	Δ+10	Δ+5	DIN 38 404-4 o equivalente	USEPA 170.1 SM 2550 SM 9221B Presuntivo, confirmar positivo con SM9221F o G	GB/T 13195	IS 3025 (Part 9)
E.coli	MPN/ 100-ml		126 MPN/100-ml					
Color (4.36 nm; 525 nm; 620 nm)	m-1	7; 5; 3	5; 3; 2	2; 1; 1		ISO 7887-B		
Espuma persistente	Ausente/ Presente	Ninguna indicación de espuma persistente en el agua receptora.				N/A		
Caudal de aguas residuales	m ³ per dia		15m ³ per dia					
Amonio-Nitrógeno	mg/L	10	1	0.5	ISO 11732 ISO 7150	USEPA 350.1 USEPA 350.3 SM 4500 NH3 - D, E, F, G, or H	HJ 535	IS 3025 (Part 34) Solo método fenato o electrodo selectivo de amonio

Parámetro	Unidad	Valores límite de los parámetros			Métodos estándar para el análisis y las pruebas			
		Aguas residuales Nivel fundamental	Aguas residuales Nivel progresivo	Aguas residuales Nivel aspiracional	Internacional/ Europa	USA	China	India
AOX	mg/L	3	0.5	0.1	ISO 9562	US EPA 1650	HJ/T 83-2001	
Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO ₅)	mg/L	30	15	8	ISO 5815-1	US EPA 405.1 SM 5210-B	HJ 505	IS 3035 (Part 44) Agua de dilución inoculada (DBO ₅)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	150	80	40	ISO 6060 ISO 15705	US EPA 410.4 SM 5220-D	HJ 828 GB/T 11914 e	IS 3025 (Part 58) e
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L		≥4		ISO 5814	EPA 360.1 SM 4500-O- G	HJ 506	
Aceites y Grasas	mg/L	10	2	0.5	ISO 9377-2	SM 5520- B/C USEPA 1664 revision B	HJ 637 (total oil and grease)	IS 3025 (Part 39) Partición gravimétrica o partición infrarroja
Fenoles Totales / Índice de Fenoles	mg/L	0.5	0.01	0.001	ISO 6439	SM 5530- B/C	HJ 503 Debe cumplir con el límite de reporte requerido	IS 3025 (Part 43)
Cloro Total	mg/L		1		ISO 7393-2	EPA 330.5 SM4500-Cl- G	HJ 586	
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L		Muestrear y reportar			SM 2540-C USEPA 160.1	GB/T 5750.4-2013 180oC (180 Grado centígrado)	IS 3025 (Part 16) 179°C to 181°C

Parámetro	Unidad	Valores límite de los parámetros			Métodos estándar para el análisis y las pruebas			
		Aguas residuales Nivel fundamental	Aguas residuales Nivel progresivo	Aguas residuales Nivel aspiracional	Internacional/ Europa	USA	China	India
Nitrógeno Total	mg/L	20	10	5	ISO 11905 - Part 1 ISO 29441	USEPA 351.2 SM 4500P-J SM 4500N-B SM 4500N-C	HJ 636	IS 3025 (Part 34) Medir y reportar todas las formas de nitrógeno (amoníaco, nitrato, nitrito y orgánico)
Fósforo Total	mg/L	3	0.5	0.1	ISO 17294 ISO 11885 ISO 6878	USEPA 365.4 SM 4500P-J USEPA 200.7 USEPA 200.8 USEPA 6010C USEPA 6020A	GB/T 11893	IS 3025 (Part 31) IS 3025 (Part 65)
Sólidos Suspendidos Totales (SST) Aniones	mg/L	50	15	5	ISO 11923	USEPA 160.2 SM 2540D	GB/T 11901	IS 3025 (Part 17) 103°C to 105°C
Cloruro	mg/L	Solo muestrear y reportar			ISO 10304-1 ISO 15923-1	SM 4110-B SM 4110-C SM 4500-Cl D or E USEPA 300	HJ 84- 2016	IS 3025 (Part 32) Solo potenciométrico o ferricianuro automatizado
Cianuro Total	mg/L	0.2	0.1	0.05	ISO 6703-1,- 2,-3, ISO 14403-1,-2	USEPA 335.2 APHA 4500-CN	HJ 484	
Sulfato	mg/L	Solo muestrear y reportar			ISO 10304-1 ISO 15923-1	SM 4500 SO4, E, F, G SM 4110 B, C USEPA 300 USEPA 9038	HJ 84- 2016	IS 3025 (Part 24)
Sulfuro	mg/L	0.5	0.05	0.01	ISO 10530	SM 4500-S2-D, E,G, or I	HJ 1226- 2021	IS 3025 (Part 29) Solo azul de metileno
Sulfito	mg/L	2	0.5	0.2	ISO 10304-3	SM 4500-SO32-C	HJ 84- 2016	

Nota. Adaptado de ZDHC (2024).

Tabla 5*Parámetros y límites de metales pesados de aguas residuales de ZDHC.*

Parámetro	Unidad	Valores límite de los parámetros – TEXTIL			Métodos estándar para el análisis y las pruebas			
		Aguas residuales/Nivel fundamental	Aguas residuales Nivel progresivo	Aguas residuales Nivel aspiracional	Internacional/ Europa	USA	China	India
Antimonio	mg/L	0.1	0.05	0.01	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	IS 3025 (Part 65)
Cromo (VI)	mg/L	0.05	0.005	0.001	ISO 18412	USEPA 218.6	GB 7467	IS 3025 (Part 52) Debe cumplir con el límite de reporte.
Bario	mg/L	Solo muestrear y reportar				USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	
Selenio	mg/L	Solo muestrear y reportar				USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	
Estaño	mg/L	Solo muestrear y reportar				USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	
Arsénico	mg/L	0.05	0.01	0.005	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	IS 3025 (Part 65)
Cromo Total	mg/L	0.2	0.1	0.05	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	HJ 700	IS 3025 (Part 65)
Cobalto	mg/L	0.05	0.02	0.01	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 7475 HJ 700	IS 3025 (Part 65)

Parámetro	Unidad	Valores límite de los parámetros – TEXTIL			Métodos estándar para el análisis y las pruebas			
		Aguas residuales/Nivel fundamental	Aguas residuales Nivel progresivo	Aguas residuales Nivel aspiracional	Internacional/ Europa	USA	China	India
Cadmio	mg/L	0.1	0.05	0.01	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 7475 HJ 700	IS 3025 (Part 65) IS 3025 (Part 41) AAS Método instrumental
Cobre	mg/L	1	0.5	0.25	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 7475 HJ 700	IS 3025 (Part 65) IS 3025 (Part 42) AAS Método instrumental
Plomo	mg/L	0.1	0.05	0.01	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 7475 HJ 700	IS 3025 (Part 65) IS 3025 (Part 47) AAS Método instrumental
Níquel	mg/L	0.2	0.1	0.05	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 11912 HJ 700	IS 3025 (Part 65) IS 3025 (Part 54) AAS Método instrumental
Plata	mg/L	0.1	0.05	0.005	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 11907 HJ 700	IS 3025 (Part 65)
Zinc	mg/L	5	1	0.5	ISO 17294	USEPA 200.8 USEPA 6010 C USEPA 6020 A	GB 7472 GB 7475 HJ 700	IS 3025 (Part 65) IS 3025 (Part 49) AAS Método instrumental
Mercurio	mg/L	0.01	0.005	0.001	ISO 17294 ISO 11885	USEPA 200.8-SIM EPA 6020A-SIM EPA 245.1 EPA 245.7	HJ 597 HJ 694	IS 3025 (Part 48) Solo AAS por vapor frío IS 3025 (Part 65) SIM

Nota. Adaptado de ZDHC (2024).

2.3.2.Marco Legal Nacional

2.3.2.1. Constitución Política del Perú, Art. 2° Inc. 22, Art.67° y Art. 68°.

El Congreso constituyente Democrático (1993) reconoce, en su artículo 2°, inciso 22, el derecho de toda persona a desarrollarse en un entorno adecuado, garantizando condiciones de bienestar como la tranquilidad, el descanso y, especialmente, el acceso a un ambiente equilibrado que permita una adecuada calidad de vida. Asimismo, en su artículo 67° establece que el Estado es responsable de definir la política ambiental a nivel nacional, promoviendo el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. En esa misma línea, el artículo 68° dispone la obligación estatal de fomentar la conservación de la diversidad biológica y la protección de las áreas naturales.

2.3.2.2. Ley N°28611, Ley General del Ambiente, Art. VI, Art.74°.

El Congreso de la Republica del Perú (2005) establece, mediante la ley General del Ambiente el principio de prevención, contemplado en el artículo VI de la Ley General del Ambiente (Ley N° 28611, 2005), orienta la gestión ambiental hacia la anticipación y control de los impactos negativos, priorizando evitar la degradación antes que corregirla. En situaciones donde no sea posible eliminar las causas del daño, se deben aplicar medidas de mitigación, recuperación, restauración o compensación, según corresponda (El Congreso de la República del Perú, 2005).

Por otro lado, el artículo 74° de la ley N° 28611 (2005) establece que toda persona o entidad que desarrolla actividades productivas es responsable de los impactos ambientales que estas generen, incluyendo emisiones, vertimientos y cualquier afectación al entorno, la salud o los recursos naturales. Esta responsabilidad abarca tanto los daños como los riesgos derivados de sus acciones u omisiones.

2.3.2.3. Ley N°17752, Ley General de Aguas, Título II, De la Conservación y Preservación del Agua.

Artículo 22°.- Está prohibido verter o emitir cualquier residuo, sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar las aguas, causando daños o poniendo en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna o comprometiendo su empleo para otros usos (El Gobierno del Perú, 1969).

2.3.2.4. Ley N°29338, Ley de Recursos Hídricos, Título I, Disposiciones Generales.

Artículo 22°.- Declaratoria de interés nacional y necesidad pública

La Ley de Recursos Hídricos reconoce como de interés nacional la gestión integral del agua, considerándola una prioridad para el desarrollo sostenible. Este enfoque promueve el uso eficiente y responsable del recurso en cuencas hidrográficas y acuíferos, orientado tanto a su conservación como a la mejora de su disponibilidad y calidad. Asimismo, la normativa enfatiza la importancia de fortalecer una cultura de uso adecuado del agua, con el objetivo de asegurar su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras, garantizando así la sostenibilidad del recurso en el tiempo (El Congreso de la República del Perú, 2009).

2.3.2.5. D.L. N° 613, Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, Cap. IV, Art. 14°.

Establece restricciones a la descarga de sustancias contaminantes que puedan generar deterioro o afectar la calidad ambiental. Se enfatiza la necesidad de aplicar medidas de tratamiento o depuración antes de realizar cualquier vertimiento. Asimismo, asigna a la autoridad competente la responsabilidad de supervisar el cumplimiento de estas disposiciones, mediante la implementación de acciones de control y monitoreo orientadas a prevenir impactos ambientales negativos (Poder Ejecutivo del Perú, 1990).

2.3.2.6. D. S. N°004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.

Establece los límites de concentración de elementos, sustancias y parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, considerada como cuerpo receptor y componente esencial de los ecosistemas acuáticos, de modo que no generen riesgos significativos para la salud humana ni para el ambiente (Ministerio del Ambiente MINAM, 2017).

2.3.2.7. D.S. N°010-2019-VIVIENDA, Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Establece los Valores Máximos Admisibles (VMA) aplicables a las descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario a nivel. Estos parámetros son de cumplimiento obligatorio para todos los usuarios que vierten efluentes en dichos sistemas, siendo supervisados por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento. El propósito de esta normativa es garantizar condiciones adecuadas de salubridad y asegurar el correcto funcionamiento de la infraestructura de alcantarillado, evitando impactos negativos derivados de descargas contaminantes (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento MVCS, 2019).

Asimismo, las actividades industriales que superen los límites establecidos en los Anexos I y II del mencionado decreto, indicados en la **Tabla 6 y 7**, El incumplimiento de los límites de concentración establecidos dará lugar a la aplicación de las sanciones correspondientes.

Tabla 6
VMA para descargas al sistema de alcantarillado: Anexo1

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	100

Nota. Adaptado de Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA

Tabla 7*VMA para descargas al sistema de alcantarillado: Anexo 2*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	Cr ⁺⁸	0.5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Niquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ⁻²	1000
Sulfuros	mg/l	S ⁻²	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH ⁺⁴	80
Potencial Hidrógeno	unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables	ml/l/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

Nota. Adaptado de Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA.



3. Metodología

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

3.1.1. Tipo de datos en Investigación

El estudio se clasifica como aplicado, ya que se orienta a la implementación y evaluación práctica de un tratamiento fotocatalítico heterogéneo con TiO_2 para tratar aguas residuales textiles. Los datos se obtuvieron mediante equipos de laboratorio, lo que permite realizar comparaciones, mediciones continuas y evaluar la variación de los resultados bajo condiciones controladas. La recolección de datos proviene tanto del trabajo de campo, donde se tomarán muestras de efluentes del proceso de teñido utilizando un muestreo compuesto, como del laboratorio, donde se realizarán los ensayos para evaluar la eficiencia del tratamiento. Este enfoque tiene como objetivo proporcionar soluciones prácticas y aplicables a la industria textil, asegurando la precisión, confiabilidad y viabilidad del proceso fotocatalítico en un entorno real.

3.1.2. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es explicativo, ya que está orientado a analizar y fundamentar las características, propiedades y condiciones determinantes del proceso de fotocátalisis heterogénea.

3.1.3. Enfoque de Investigación

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, dado que se trabajó con muestras representativas de aguas residuales provenientes de la industria textil en Arequipa. Estas muestras fueron sometidas a análisis mediante procedimientos estadísticos con el propósito de determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes lograda mediante el tratamiento fotocatalítico heterogéneo empleando TiO_2 .

3.1.4. Metodología de la Investigación

El estudio se abordó mediante un enfoque cuantitativo, orientado al análisis de información numérica obtenida a partir de muestras representativas, empleando instrumentos de medición validados. En función de variables definidas, se evaluó el desempeño del tratamiento fotocatalítico heterogéneo con NPs-TiO₂ a escala de laboratorio, aplicado a aguas residuales provenientes de la industria textil.

3.1.5. Población y Muestra

3.1.5.1. Población

La población de estudio estuvo conformada por los efluentes generados en las operaciones de teñido de una empresa del sector textil ubicada en la provincia y departamento de Arequipa.

3.1.5.2. Muestra

Para el desarrollo experimental, se recolectó un volumen total de 80 litros de aguas residuales provenientes del proceso de teñido textil. Estas aguas contenían predominantemente colorantes azoicos, caracterizados por su elevada estabilidad química y baja biodegradabilidad, lo que dificulta su tratamiento mediante métodos convencionales. Esta muestra se utilizó para la caracterización fisicoquímica, los procesos de tratamiento y la evaluación de toxicidad en organismos modelo. El monitoreo se realizó durante un día de producción, con muestreos efectuados cada hora.

3.2. Diseño de la Investigación

El estudio se desarrolla bajo un diseño experimental, ya que se manipulan variables específicas con el fin de observar sus efectos sobre el proceso fotocatalítico.

3.2.1. Diseño de Experimento

3.2.1.1. Variables de investigación

En el **Capítulo II**, correspondiente al Fundamento Teórico, se describieron las variables y parámetros que influyen en el proceso de fotocátalisis heterogénea, tales como el tipo y concentración del fotocatalizador, la presencia de agentes oxidantes, la radiación aplicada, entre otros factores. En base a la revisión de literatura especializada y antecedentes experimentales, se seleccionaron aquellas variables que presentan un impacto significativo en el desempeño del proceso fotocatalítico.

3.2.1.2. Descripción de variables

a) Variables independientes

Tratamiento Fotocatalítico Heterogéneo con nanopartículas de Dióxido de Titanio (TiO_2)

El tratamiento fotocatalítico heterogéneo con nanopartículas de TiO_2 en fase anatasa constituye la variable independiente fundamental en este estudio. Este proceso avanzado de oxidación emplea las propiedades semiconductoras del TiO_2 bajo radiación UV para promover la degradación de contaminantes orgánicos presentes en efluentes textiles (Khan et al., 2024). Los parámetros operativos clave son concentración de catalizador, tiempo de exposición y pH del medio, donde mediante su manipulación controlada se busca optimizar la degradación de los contaminantes característicos de efluentes textiles.

b) Variables dependientes

Aguas residuales obtenidas del proceso de teñido de fibra natural de la industria textil

Los efluentes residuales generados durante el proceso de teñido de fibra natural en la industria textil constituyen la variable dependiente del estudio. Estos residuos líquidos reflejan el grado de contaminación presente en el agua utilizada en el proceso productivo.

La **Tabla 8** muestra la operacionalización de las variables consideradas en la investigación.

Tabla 8
Operacionalización de Variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente: Tratamiento Fotocatalítico Heterogéneo con nanopartículas de Dióxido de Titanio (TiO ₂)	Concentración NPs-TiO ₂ Tiempo pH	Dosis de 0.5 y 1.0 120 y 240 3 y 5	g/L Min Unidad de pH
Variable dependiente: Aguas residuales obtenidas del proceso de teñido de fibra natural de la industria textil	Calidad de las aguas residuales	Remoción de la DQO y color	%

Nota. Elaboración propia.

3.3. Métodos de la Investigación

3.3.1. Área de Estudio

El área de estudio se centró en empresas textiles dedicadas al procesamiento de fibras naturales y la elaboración de hilos. Para llevar a cabo la investigación, se seleccionó una empresa textil ubicada en Arequipa, especializada en el teñido industrial de fibras naturales, cuyo proceso se orienta a otorgar una tonalidad específica a la fibra.

3.4. Materiales, Reactivos, Equipos e Instrumentos

3.4.1. Materiales

3.4.1.1. Materiales de laboratorio

- Vasos de precipitado de 250 mL y 1000 mL
- Tubos Falcon
- Espátula
- Mortero
- Crisol
- Propipeta y pipetas de hasta 25 mL
- Pipetas Pasteur

- Placas Petri
- Papel Filtro
- Papel Milimetrado
- Papel aluminio
- Pinzas para calor, utilizadas en la estufa
- Botella de vidrio oscura esterilizada de 100 mL
- Botellas de plástico esterilizadas de 250 mL

3.4.1.2. Materiales biológicos

- Semillas de lechuga (*Lactuca sativa*)
- Daphnias (*Daphnia magna*.)

3.4.2. Reactivos

- Isopropóxido de titanio (precursor para la síntesis de nanopartículas de TiO_2)
- Ácido acético glacial
- Agua ultrapura
- Agua destilada
- Ácido clorhídrico (HCl), solución 1N
- Hidróxido de sodio (NaOH), solución 1N
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4), solución 1:1

3.4.3. Equipos e Instrumentos

- Fotorreactor con lámpara UV de 16 W
- Espectrofotómetro UV-Vis
- pH-metro digital
- Termómetro digital
- Estufa
- Mufla

- Estereoscopio
- Agitador magnético con control de temperatura
- Balanza analítica
- Bomba de pecera de 2.5 W
- Refrigeradora
- Centrifugadora
- Campana extractora de gases

3.5. Metodología

3.5.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes provenientes del agua residual obtenida del proceso de teñido.

3.5.1.1. Parámetros analizados durante el monitoreo

Para la caracterización fisicoquímica de los efluentes generados en el proceso de teñido de fibras naturales, se realizó un muestreo compuesto a lo largo de todo el proceso. Se recolectaron 80 L de efluente generado durante el proceso de teñido de fibras naturales, comenzando a las 9:00 a.m. y culminando a las 4:00 p.m., con una muestra tomada cada 2 horas, con el fin de obtener una representación precisa de las variaciones en la composición del efluente. Las muestras fueron obtenidas en un punto representativo de descarga, utilizando una cubeta previamente desinfectada para evitar la contaminación cruzada. Además, se evitó la formación de burbujas de aire que pudieran alterar los resultados de los análisis posteriores. Una vez finalizada la recolección, las muestras fueron homogenizadas cuidadosamente, asegurando que los contaminantes estuvieran distribuidos de manera uniforme antes de realizar los análisis (ANA, 2016).

Luego de la recolección, parte de la muestra compuesta se transfirió a recipientes estériles y específicos para cada análisis de los parámetros establecidos, siguiendo los protocolos adecuados de conservación. Para preservar las características originales del efluente,

las muestras fueron almacenadas a baja temperatura y transportadas en recipientes isotérmicos, asegurando su llegada en condiciones óptimas al laboratorio.

El laboratorio evaluó diversos parámetros, entre los cuales se incluyeron pH, temperatura, turbidez, color, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto (OD), sulfuros y metales totales. Para garantizar la estabilidad de ciertos parámetros, se utilizaron preservantes específicos: ácido sulfúrico (H_2SO_4) en solución 1:1 para la DQO, acetato de zinc [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$] en solución 2N e hidróxido de sodio (NaOH) en solución 6N para los sulfuros, y ácido nítrico (HNO_3) en solución 1:1 para los metales totales. Los recipientes utilizados para la caracterización inicial fueron acondicionados mediante cierre hermético y debidamente rotulados, consignando información relevante como fecha, hora y ubicación de muestreo, con el fin de garantizar la trazabilidad de las muestras. Sobre todo, se realizó la medición de la DQO debido a que autores como Salehzadeh et al. (2025) y Garcia y Ayala (2024) consideran que es un indicador clave para evaluar la efectividad del tratamiento, al igual que el color, ya que ambos permiten confirmar si el proceso logró los resultados esperados.

La correcta ejecución del muestreo compuesto y su adecuada conservación, permitieron asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos, constituyendo una base sólida para la evaluación del tratamiento fotocatalítico propuesto.

En la **figura 5** se presenta el procedimiento de muestreo de los efluentes del proceso de teñido, etapa esencial para obtener muestras representativas y asegurar la confiabilidad del análisis de las características del vertimiento

Figura 5

Muestreo de efluentes del proceso de teñido.



Nota. Elaboración propia.

3.5.2. Determinación de los parámetros óptimos de operación y eficiencia de remoción de contaminantes mediante fotocátalisis heterogénea con nanopartículas de TiO_2 aplicada a efluentes de teñido textil.

3.5.2.1. Recolección de muestras representativas de agua residuales.

En el marco del muestreo compuesto, se obtuvo un volumen total de 80 litros de aguas residuales provenientes del proceso de teñido de fibras naturales. Destinándose a la evaluación del tratamiento fotocatalítico heterogéneo utilizando NPs- TiO_2 . Por otro lado, una porción del efluente fue reservada para la caracterización inicial sin tratamiento, la cual fue llevada a cabo por un laboratorio acreditado por INACAL.

Previamente a la aplicación del tratamiento, la muestra fue homogeneizada a fin de asegurar una distribución uniforme de los contaminantes y, en consecuencia, garantizar su representatividad. Posteriormente, se mantuvo en refrigeración a $4 \pm 0,5$ °C, con el propósito de preservar sus características hasta su utilización en los ensayos a escala de laboratorio.

3.5.2.2. Método de síntesis de nanopartículas de TiO_2 (NPs- TiO_2)

La obtención de nanopartículas de dióxido de titanio (NPs- TiO_2) en fase anatasa, con un tamaño inferior a 7 nm, se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Salas (2024). Para ello, se aplicó un método sol-gel asistido con ácido acético, empleando como precursor principal el Isopropóxido de titanio (IV) (TTIP). Asimismo, se utilizaron agua ultrapura y ácido acético glacial al 99 % de pureza como reactivos complementarios durante la síntesis.

Para garantizar una hidrólisis completa del TTIP, se utilizó una proporción estequiométrica de agua a titanio de 10:1. En un vaso de precipitados, se vertieron 40 mL de agua ultrapura, a los cuales se añadieron 4 mL de TTIP. Durante esta adición, el recipiente se mantuvo tapado para minimizar la evaporación de compuestos volátiles. La solución fue sometida a agitación continua durante 30 minutos para favorecer la mezcla homogénea de los componentes.

Posteriormente, se añadieron 9 mL de ácido acético, procurando que el reactivo se distribuyera homogéneamente dentro de la solución. La mezcla se mantuvo bajo agitación continua durante 3 horas a una temperatura de 55 °C, condiciones que favorecieron la estabilización del sol y permitieron la formación controlada de las nanopartículas.

Una vez finalizada la síntesis, las partículas obtenidas fueron lavadas con agua ultrapura hasta alcanzar un pH de 4.0, con el fin de eliminar impurezas y residuos orgánicos. Luego, se permitió la sedimentación del material y se retiró el exceso de agua.

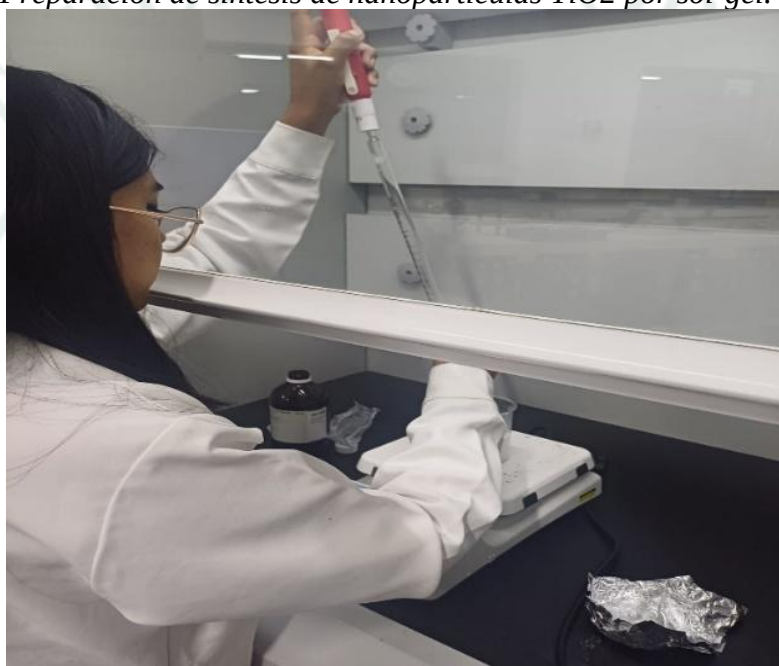
El material sólido resultante fue secado en una estufa a 80°C durante 11 horas, lo que permitió eliminar la humedad residual sin afectar la estructura del TiO_2 . Posteriormente, el polvo seco se trituro y homogeneizó utilizando un mortero, con el objetivo de obtener un tamaño de partícula uniforme.

Finalmente, las muestras fueron sometidas a un proceso de calcinación a 250°C durante 40 minutos. Este tratamiento térmico contribuyó a mejorar la cristalinidad del material y a eliminar cualquier residuo orgánico remanente, asegurando la pureza del TiO₂ sintetizado.

En la **Figura 6** se muestra el proceso de síntesis de nanopartículas de dióxido de titanio (NPs-TiO₂) a través del método sol-gel, el cual permite obtener partículas uniformes

Figura 6

Preparación de síntesis de nanopartículas TiO₂ por sol-gel.



Nota. Elaboración propia.

3.5.2.3. Determinación del escenario más adecuado para la degradación de contaminantes presentes en el proceso de teñido aguas residuales textiles.

a) Concentración del Fotocatalizador

Se emplearon concentraciones de NPs-TiO₂ de 0.5 mg/L y 1 g/L, siguiendo las recomendaciones establecidas por Carbuloni et al. (2020), tal como se presenta a continuación:

Tabla 9

Valores de la variable de concentración del fotocatalizador

Variable	Nivel (-)	Nivel (+)
Concentración NPs-TiO ₂ (mg/L)	0.5	1.0

Nota. Elaboración propia.

- **Tiempo de Residencia**

La **Tabla 10** presenta los tiempos establecidos en investigaciones previas realizadas por Huanca (2019) y Aquino (2017), varían en un periodo de 120 min y 240 min, tomando en cuenta ello se estableció un mínimo y un máximo nivel el cual se empleó para el diseño experimental.

Tabla 10

Valores de la variable de tiempo de residencia

Variable	Nivel (-)	Nivel (+)
Tiempo (min)	120	240

Nota. Elaboración propia.

- **pH**

Diversas investigaciones, como la realizada por Camarena (2021), señalan que un ajuste adecuado del pH puede incrementar notablemente la eficiencia del proceso fotocatalítico en la eliminación de colorantes en aguas residuales. Considerando este aspecto, en el presente estudio se seleccionaron valores de pH de 3 y 5, ya que en este intervalo se ha observado un equilibrio favorable entre la adsorción de los contaminantes y su posterior degradación fotocatalítica.

La **Tabla 11** muestra los niveles de pH seleccionados para este estudio, definidos a partir de lo señalado por Camarena (2021), quien destaca que el ajuste adecuado del pH mejora significativamente la eficiencia de la fotocatalisis en la degradación de colorantes en aguas residuales. Considerando estos factores, en este estudio se trabajó con un pH de 3 y 5, donde se ha reportado un equilibrio óptimo entre adsorción y degradación fotocatalítica.

Tabla 11

Valores de la variable de pH

Variable	Nivel (-)	Nivel (+)
pH	3	5

Nota. Elaboración propia.

3.5.2.4. *Elaboración de Diseño experimental*

Con el fin de identificar las condiciones más favorables para el proceso, se empleó un diseño experimental factorial 2^k . Este enfoque permitió generar réplicas para cada tratamiento o combinación de factores, lo que facilitó la comparación entre los distintos niveles evaluados y entre resultados obtenidos bajo una misma configuración experimental.

A continuación, se detallan los factores seleccionados y los niveles establecidos para el diseño factorial.

En la **Tabla 12** se describen los factores de estudio junto con sus niveles codificados, lo que permite identificar las variables consideradas y su representación numérica dentro del diseño.

Tabla 12
Factores y niveles de estudio

Factor	Niveles	
A: Tiempo	-1	1
B: Concentración de NPs-TiO ₂	-1	1
C: Ph	-1	1

Nota. Elaboración propia.

En la **Tabla 13** se detallan los valores reales asignados a cada nivel codificado, facilitando la comprensión de las condiciones experimentales aplicadas.

Tabla 13
Codificación y valores de estudio de los niveles.

Código	pH	Concentración de NPs-TiO ₂ (mg/l)	Tiempo (min)
-1	3	0.5	120
1	5	1	240

Nota. Elaboración propia.

El número de tratamientos se determinó mediante la ecuación:

$$N = 2^k$$

Donde:

N = número de tratamientos experimentales

k = número de factores evaluados

Para el presente estudio se consideraron tres factores y se realizaron dos repeticiones por tratamiento, obteniéndose un total de:

$$N = 2^3 \times 2 = 16 \text{ ensayos experimentales}$$

Finalmente, la Tabla 14 presenta el diseño experimental 2^k , donde se combinan los factores y niveles previamente definidos para estructurar las pruebas correspondientes.

Tabla 14
Diseño experimental 2^3

Repetición	Tiempo	Concentración de TiO ₂	pH	Tiempo	Concentración de TiO ₂	pH
R1	-1	-1	-1	3	0.5	120
	-1	-1	1	3	0.5	240
	-1	1	-1	3	1	120
	-1	1	1	3	1	240
	1	-1	-1	5	0.5	120
	1	-1	1	5	0.5	240
	1	1	-1	5	1	120
	1	1	1	5	1	240
R2	-1	-1	-1	3	0.5	120
	-1	-1	1	3	0.5	240
	-1	1	-1	3	1	120
	-1	1	1	3	1	240
	1	-1	-1	5	0.5	120
	1	-1	1	5	0.5	240
	1	1	-1	5	1	120
	1	1	1	5	1	240

Nota. Elaboración propia.

3.5.2.5. Configuración del Fotorreactor

El experimento se desarrolló en un fotorreactor batch semicontinuo, ya que permite una operación flexible, facilitando el ajuste del tiempo y la concentración de nanopartículas de TiO₂ (Díaz, 2023). Además, su sistema de recirculación mejora la interacción entre los contaminantes con las nanopartículas de TiO₂ por la lámpara UV de 16W, cuya emisión se encuentra dentro del rango efectivo para la activación del fotocatalizador. El reactor cuenta con una bomba sumergible que permite la circulación del agua a través de dos mangueras conectadas, asegurando un flujo eficiente de los 2 litros de agua residual. Asimismo, dispone de un agitador

magnético, que optimiza la mezcla del medio de reacción para mejorar el contacto entre el catalizador y la radiación UV.

El diseño experimental propuesto favorece la interacción entre la radiación UV y las nanopartículas de TiO_2 , incrementando la eficiencia en la degradación de los contaminantes presentes en el efluente textil.

La **Figura 7** presenta una vista general del reactor final implementado para el tratamiento fotocatalítico del efluente. En ella se aprecia la disposición de los principales componentes del sistema, preparados para su funcionamiento bajo condiciones controladas.

Figura 7
Implementación del reactor final para el tratamiento fotocatalítico



Nota. Elaboración propia.

3.5.2.6. Realización de ensayos

El experimento constó de 16 ensayos, divididos en dos repeticiones (R1 y R2) de 8 tratamientos cada una. En estos se analizaron los efectos de la concentración de TiO_2 , el pH y el tiempo de tratamiento sobre la remoción de contaminantes en el agua residual.

Se empleó un diseño factorial 2^3 , donde cada factor presentó valores altos (+1) y bajos (-1), permitiendo analizar su influencia en el proceso.

Para determinar la eficiencia de remoción del color se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\%D = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

Donde:

A_0 = absorbancia inicial del efluente

A_f = absorbancia final después del tratamiento

Asimismo, la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se determinó mediante:

$$\%Remoción = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} \times 100$$

Donde:

DQO_0 = concentración inicial de DQO

DQO_f = concentración final de DQO después del tratamiento

Para cada tratamiento, se le añadió dos litros de agua residual sin tratar al fotorreactor. Posteriormente, se incorporó la suspensión de nanopartículas de TiO_2 , previamente preparada en agua ultrapura, con el fin de asegurar su correcta disolución y evitar la formación de agregados que pudieran afectar la homogeneidad de la mezcla.

La adición de TiO_2 se realizó siguiendo las proporciones establecidas en el diseño experimental, y posteriormente, la solución fue sometida a un proceso de agitación constante mediante un agitador magnético, asegurando una distribución uniforme del catalizador en el medio. El pH se ajustó utilizando hidróxido de sodio (1N) y ácido clorhídrico (1N) hasta alcanzar el valor requerido, el cual fue confirmado mediante un pH-metro.

Una vez alcanzada la homogeneización y las condiciones establecidas, el vaso precipitado fue cubierto con papel aluminio para evitar la interacción con contaminantes

externos y minimizar la exposición a la luz ambiental, que pudiera interferir en la reacción fotocatalítica.

Previo a la ejecución de los experimentos, se llevó a cabo el montaje del fotorreactor, verificando la alineación de la lámpara UV, la hermeticidad del sistema y el estado de los componentes estructurales. Además, se controló la temperatura, asegurando que en ningún ensayo excediera los 22°C. A esta temperatura, el TiO₂ mantiene su actividad fotocatalítica, evitando problemas como la evaporación del agua o cambios en la estructura del catalizador. Como parte del control de calidad, se realizaron pruebas preliminares con agua sin aditivos, lo que permitió identificar y corregir posibles fugas en las conexiones de las mangueras, garantizando la fiabilidad del proceso.

3.5.2.7. *Determinación de remoción de parámetro y comparación con el programa ZDHC Wastewater guidelines V. 2.2. y el D.S. N°010-2019-VIVIENDA, Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.*

Tras la ejecución de cada tratamiento, se analizaron los valores de absorbancia y DQO para evaluar la degradación del color y de la carga orgánica presente en el efluente textil. Luego, se seleccionó la muestra con el mayor porcentaje de degradación, la cual fue empleada para la caracterización final del agua tratada.

Posteriormente, los resultados obtenidos se compararon con los valores iniciales del efluente. Finalmente, los valores obtenidos fueron contrastados con normativas nacionales e internacionales, como las ZDHC Wastewater Guidelines V.2.2 y el D.S. N°010-2019-VIVIENDA Valores Máximos Admisibles (VMA), con el propósito de determinar si los parámetros alcanzados cumplen con lo establecido para la disposición o reutilización del agua tratada.

La comparación con estándares internacionales se realizó utilizando la guía ZDHC, considerando el nivel básico (Foundational), el cual define criterios mínimos para el control de efluentes en la industria textil. Asimismo, se reconoce que dicha guía contempla niveles más exigentes, como el nivel intermedio (Progressive) y el nivel avanzado (Aspirational), los cuales no fueron considerados en el presente estudio.

3.5.3. Ensayos de ecotoxicidad aguda del efluente resultante del tratamiento fotocatalítico heterogéneo mediante organismos modelo.

Se realizaron ensayos de toxicidad para evaluar los efectos del efluente tratado bajo las condiciones óptimas del proceso fotocatalítico heterogéneo, seleccionando el tratamiento con la mejor respuesta en términos de degradación. Para ello, se utilizaron *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa L.* (lechuga) como organismos modelo. *Lactuca sativa L.* fue seleccionada por su alta sensibilidad en las primeras etapas de desarrollo por lo que permite detectar posibles efectos derivados del contacto con compuestos o sustancias tóxicas. Por su parte, *Daphnia magna*, su selección se fundamentó en su sencillo mantenimiento en laboratorio, su ciclo de vida corto con alta tasa reproductiva y su marcada sensibilidad frente a cambios ambientales. Previamente a los bioensayos, el efluente del tratamiento con mejor eficiencia de degradación fue sometido a centrifugación y posterior neutralización del pH, con el propósito de remover los residuos del catalizador y asegurar condiciones óptimas para la exposición biológica. Posteriormente, se realizaron los ensayos de toxicidad aguda y bioensayos, en los cuales los organismos fueron expuestos al efluente ya acondicionado. En *Lactuca sativa L.* se evaluaron parámetros como el porcentaje de germinación y la elongación de la radícula e hipocótilo, mientras que en *Daphnia magna* se determinó la mortalidad de neonatos como indicador del nivel de toxicidad del efluente tratado.

3.5.3.1. *Ensayo de Ecotoxicidad con Daphnia magna*

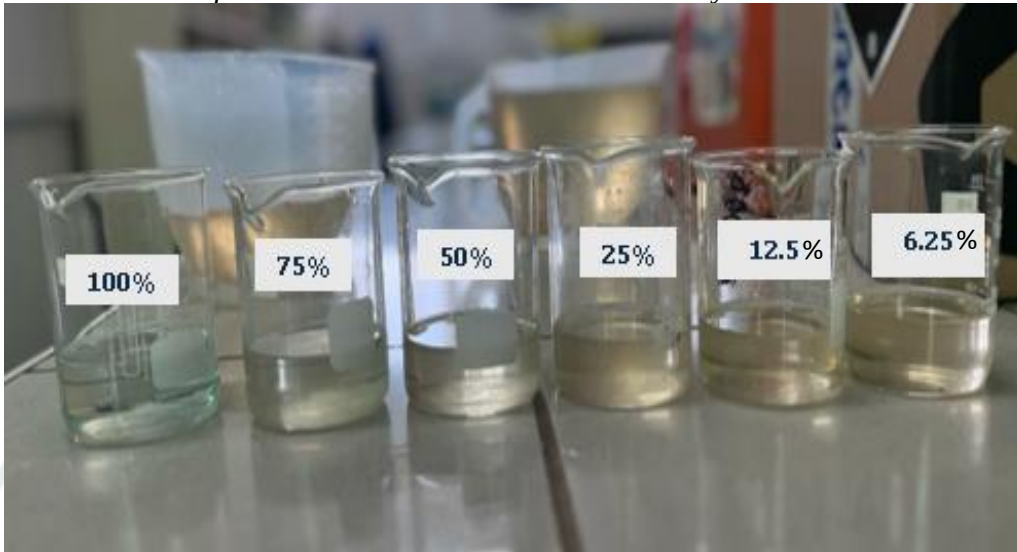
El estudio se realizó con neonatos de *Daphnia magna* de menos de 24 horas de edad, previamente criados y alimentados con microalgas en condiciones controladas. Los organismos fueron expuestos a seis concentraciones del efluente tratado (100%, 75%, 50%, 25%, 12.5% y 6.25%) y comparados con un control negativo (efluente sin tratar) y un control positivo (agua declorada). Cada condición, incluyendo los controles, fue evaluada con cinco réplicas. Para cada dilución, se utilizaron 20 mL, distribuidos en placas Petri de 90 × 15 mm de poliestireno, donde se colocaron 10 individuos por placa. El experimento se llevó a cabo siguiendo las indicaciones de la OECD (2004).

La exposición de los organismos se mantuvo durante un periodo de 48 horas, sin aireación en los recipientes y sin alimentación de los organismos durante el ensayo. La temperatura se controló entre 18°C y 22°C con una variabilidad máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$, y se aplicó un ciclo de luz de 16 horas y oscuridad de 8 horas. La medición de la mortalidad y la movilidad de los individuos se realizó a las 24 horas y 48 horas para evaluar la toxicidad de las diferentes concentraciones del efluente

La **Figura 8** corresponde a la etapa inicial del bioensayo con *Daphnia magna*, en la cual se prepararon las diferentes diluciones del efluente tratado que posteriormente fueron utilizadas para la exposición de los organismos. Esta preparación permitió obtener las concentraciones necesarias para evaluar los posibles efectos tóxicos del efluente bajo condiciones controladas.

Figura 8

Diluciones del efluente tratado utilizadas en el bioensayo.



Nota. Elaboración propia

La **Figura 9** se muestra la distribución de *Daphnia magna* en las placas Petri. En esta fase, los organismos fueron expuestos a las diluciones durante lapsos de 24 y 48 horas, registrándose cuidadosamente la mortalidad en cada caso.

Figura 9

*Distribución de *Daphnia magna* en las placas Petri*



Nota. Elaboración propia.

Las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas (18 - 22 °C y pH 7), conforme a la (OECD, 2004)

Se registró la mortalidad en intervalos establecidos, considerando inmovilizados a los organismos sin movimiento durante 15 segundos. La confirmación se realizó mediante un estereoscópio y estimulación con pipeta Pasteur.

Los índices de toxicidad determinados en el análisis fueron los siguientes:

- **CL₅₀ / CE₅₀ (Concentración Letal/Efectiva 50%):** Representa la concentración a la que se observa un 50% de mortalidad.
- **LOEC (Lowest Observed Effect Concentration):** Representa la concentración mínima a partir de la cual se detectan efectos significativamente diferentes respecto al grupo control ($p < 0.05$).
- **NOEC (No Observed Effect Concentration):** Se define como la concentración más alta en la que no se registran efectos significativamente diferentes frente al control ($p \geq 0.05$).

Además, se realizó un análisis estadístico para evaluar las concentraciones en las que se observaron diferencias significativas y determinar en qué condiciones se produjeron los mayores cambios.

El análisis de los datos se realizó a través de Python, donde se calcularon los índices de toxicidad, se aplicaron pruebas estadísticas y se generaron gráficos correspondientes a los periodos de 24 y 48 horas, siguiendo los criterios establecidos en estudios de ecotoxicidad (OECD, 2004).

Posteriormente, para determinar las unidades de toxicidad (UT) según la siguiente ecuación según:

$$UT = \left(\frac{1}{CL_{50}} \right) \times 100$$

Según CONCYTEP (2021), basándose en la clasificación propuesta por Persoone et al. (2003), el grado de toxicidad se organiza en distintos niveles. Esta información se presenta en la **Tabla 15**.

Tabla 15*Clasificación de toxicidad basada en Unidades de Toxicidad (UT)*

Toxicidad (UT)	Clasificación	CE(L) ₅₀
>4	Muy tóxico	>25
2 – 4	Tóxico	50 - 25
1.33 - 1.99	Moderadamente tóxico	75 - 50
< 1.33	Ligeramente tóxico	<75

Nota. Adaptado de Persoone et al. (2003)**3.5.3.2. Ensayo de Ecotoxicidad con *Lactuca sativa* L**

Se emplearon semillas de *Lactuca sativa* L., las cuales fueron almacenadas en condiciones secas a 4°C hasta su uso en el experimento. Antes de iniciar el ensayo, se seleccionaron según su tamaño y morfología predominante. Luego, se distribuyeron 20 semillas en cada placa Petri de 90 mm x 15 mm, equipada con papel filtro de la misma dimensión, garantizando el espacio adecuado para su óptimo desarrollo.

Se analizaron siete condiciones experimentales, incluyendo dos controles: un control positivo con agua destilada y un control negativo con agua residual textil sin tratar. Además, se evaluaron cinco niveles de concentración del agua tratada (5, 25, 50, 75 y 100 %), cada uno con tres repeticiones.

A cada placa se le añadieron 3 mL de la solución correspondiente, manteniéndolas en oscuridad a una temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 120 horas.

Para evaluar la fitotoxicidad, se determinaron los índices de inhibición, los cuales permiten cuantificar la reducción en la germinación, el crecimiento de la radícula y la elongación del hipocótilo. En este estudio, se consideró como germinación la aparición visible de la radícula, de acuerdo con la metodología propuesta por González et al. (2020).

Para evaluar los parámetros de crecimiento, se determinó la inhibición de la elongación de la raíz e hipocótilo (Elr o Elh) mediante la siguiente fórmula:

$$El = \frac{\text{Muestra} - \text{Control}}{\text{Muestra}} \times 100$$

Donde:

- Muestra corresponde al promedio de la longitud de la raíz o hipocótilo en cada concentración donde se observe crecimiento ($n = 20$)
- Control representa el promedio de la misma variable en el grupo control ($n = 20$), ambos expresados en milímetros.
- Los valores obtenidos permitieron clasificar la inhibición (EI) según su efecto: cuando (EI) es menor a 0, indica toxicidad debido a la inhibición del crecimiento; si es mayor a 0, se considera estimulación del desarrollo; y cuando es igual a 0, no se detecta un efecto tóxico (González et al., 2020).
- El procesamiento estadístico se llevó a cabo utilizando Microsoft Excel.



Capítulo IV

4. Resultados y discusión

4.1. *Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes provenientes del agua residual obtenida del proceso de teñido.*

4.1.1. Resultado de los parámetros analizados durante el monitoreo

4.1.1.1. *Parámetros fisicoquímicos*

Los valores obtenidos de los parámetros fisicoquímicos evaluados se muestran en la **Tabla 16**, los cuales permiten caracterizar las condiciones del efluente generado durante el proceso de teñido de fibras naturales. Para esta evaluación se consideraron variables como pH, temperatura, turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto (OD), así como la presencia de sulfuros y metales totales. Estos indicadores proporcionan información clave para el análisis de la calidad del agua residual y su posible influencia sobre el entorno. Los ensayos fueron realizados en un laboratorio acreditado por INACAL, lo que respalda la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

El parámetro color fue determinado mediante espectrofotometría UV-Vis. Se efectuó un barrido espectral con el fin de identificar la longitud de onda de máxima absorbancia, encontrándose un pico a 647 nm, valor que se utilizó para las mediciones posteriores. Los detalles completos del análisis espectral se presentan en el **Anexo 4**.

Asimismo, el **Anexo 1** contiene los resultados específicos obtenidos para cada parámetro, así como las condiciones experimentales bajo las cuales se efectuaron los ensayos correspondientes, lo que permite una comprensión más detallada del procedimiento aplicado y garantiza la trazabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 16

Parámetros fisicoquímicos del efluente generado en el proceso de teñido de fibras naturales.

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	-	3,32
Temperatura	(°C)	21°
Turbidez	NTU	40,60
Color (Absorbancia UV-Vis)	Abs	0,557
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	43,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	547,3
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1333,9
Oxígeno Disuelto (OD)	Mg DO/L	4,82
Sulfuro	mg/L	0,020

Nota: El parámetro de color fue determinado mediante espectrofotometría UV-Vis, midiendo la absorbancia directa del efluente a una longitud de onda de 647 nm.

La **Tabla 16** presenta los parámetros fisicoquímicos del efluente generado en el proceso de teñido de fibras naturales. Los resultados muestran un pH de 3.32, valor fuera del rango establecido por la normativa peruana y la ZDHC (6–9), lo cual indica una condición ácida en el efluente. Este pH, que es típico de los procesos donde se emplean colorantes reactivos, puede generar riesgos de toxicidad para organismos acuáticos y alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, tal como lo sugieren estudios previos (Hunger, 2003).

En cuanto a la turbidez (40.60 NTU), el color (Abs 0.557 a 647 nm) y el oxígeno disuelto (4.82 mg/L). Si bien estos parámetros no cuentan con límites máximos específicos en la normativa vigente, su evaluación permite complementar la caracterización del efluente. En este sentido, niveles elevados de turbidez pueden limitar la transmisión de la luz en el medio acuático, lo que repercute en procesos como la fotosíntesis y, en consecuencia, en la productividad primaria y el equilibrio ecológico de los sistemas acuáticos (Matos et al., 2024).

El color del efluente, determinado por espectrofotometría (Abs 0.557 a 647 nm), revela la presencia de compuestos cromóforos, asociados principalmente a al uso de colorantes sintéticos en la industria textil. Dentro de estos, los colorantes azoicos presentan alta estabilidad química y baja biodegradabilidad, características que dificultan su eliminación mediante tratamientos convencionales (Cserhatia et al., 2004). Esta estabilidad les permite persistir en el ambiente por períodos prolongados, contribuyendo a la contaminación visual y, en algunos

casos, a efectos tóxicos para organismos acuáticos (Al-Tohamy et al., 2022). Esto subraya la necesidad de adoptar tecnologías de tratamiento avanzadas, como la fotocatálisis, para degradar estos compuestos difíciles de eliminar.

Respecto al oxígeno disuelto (4.82 mg/L), aunque este valor no es crítico para mantener la vida acuática, su medición sigue siendo relevante para evaluar la carga orgánica en el efluente. La acumulación de materia orgánica no degradada puede generar una disminución progresiva del oxígeno disponible en los cuerpos receptores, afectando la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos (Zhang et al., 2024). Por otro lado, los valores registrados de sólidos suspendidos totales (43 mg/L) y sulfuro (0.020 mg/L) se encuentran dentro de los límites establecidos. La temperatura registrada de 21°C también está dentro del rango habitual para efluentes textiles, que varía entre 20 y 40°C según el tipo de proceso industrial (Ibañez, 2021).

La DBO₅ alcanzó 547.3 mg/L y la DQO llegó a 1333.9 mg/L, superando ampliamente los límites establecidos por el D.S. N° 010-2019 (500 y 1000 mg/L, respectivamente), así como los valores de referencia internacional de la ZDHC (30 y 150 mg/L). Los valores obtenidos evidencian una carga orgánica considerable, lo que confirma un nivel de contaminación relevante capaz de comprometer la calidad del agua y limitar la disponibilidad de oxígeno en los cuerpos receptores cercano.

Esta condición pone en evidencia la necesidad de implementar alternativas de tratamiento con mayor eficiencia para la eliminación de compuestos orgánicos de carácter persistente. En este contexto, los valores de DBO₅ y DQO reflejan una elevada carga orgánica, condición característica de los efluentes generados en la industria textil. El valor registrado de DBO₅ se sitúa en el límite superior de los rangos reportados en la literatura. De acuerdo con Azanaw et al. (2022), las concentraciones en este tipo de efluentes pueden oscilar entre 200 y 600 mg/L, lo que permite corroborar la alta carga orgánica presente en la muestra analizada.

Por otro lado, la DQO revela una considerable carga de contaminantes. Según Ibañez (2021), los efluentes textiles pueden alcanzar concentraciones de DQO entre 400 y 1400 mg/L, debido al uso intensivo de colorantes, aditivos y otros compuestos orgánicos difíciles de degradar. El valor registrado de 1333.9 mg/L, que se sitúa en el extremo superior de este rango, refuerza la necesidad de aplicar tratamientos más eficaces antes de verter el efluente al ambiente.

Asimismo, los resultados obtenidos en este estudio, pueden compararse con los reportados por García y Herrera (2022), quienes caracterizaron efluentes de una empresa textil ubicada también en Arequipa. En ambos estudios se encontraron altas concentraciones de DBO₅ y DQO, características comunes de los efluentes de teñido debido a la presencia de compuestos orgánicos y colorantes. Sin embargo, los niveles de DBO₅ y DQO fueron significativamente más altos en el estudio de García y Herrera (2022), lo que podría estar relacionado con las diferencias en los procesos industriales o en los insumos utilizados. En cuanto al color, no se puede hacer una comparación directa debido a que este estudio utilizó un espectrofotómetro, mientras que el estudio de García y Herrera Yana empleó una metodología distinta. A pesar de estas variaciones, las similitudes en los perfiles de contaminantes destacan la problemática común de las empresas textiles, subrayando la necesidad de tratamientos avanzados para lograr una remoción eficaz de los compuestos orgánicos y cumplir con los límites normativos.

Los resultados obtenidos muestran que el efluente textil analizado presenta valores elevados en varios de sus parámetros, especialmente en lo que respecta a la presencia de colorantes, lo cual dificulta su tratamiento utilizando métodos convencionales. En este sentido, y según lo revisado, el proceso de fotocátalisis se destaca como la opción más eficiente para tratar estos efluentes. Este proceso ha demostrado ser eficaz en la degradación de compuestos orgánicos complejos que, de otro modo, son difíciles de eliminar con tecnologías tradicionales. Además, estudios previos coinciden en que la fotocátalisis no solo optimiza los procesos

operativos, sino que también minimiza el impacto ambiental en comparación con otros tratamientos. Así, estos hallazgos refuerzan la necesidad urgente de adoptar tecnologías avanzadas, como la fotocátalisis, para reducir los contaminantes presentes en los efluentes y, a su vez, asegurar el cumplimiento de los límites normativos antes de la disposición final del agua tratada (Wang et al., 2022).

4.1.1.2. Metales y otros elementos totales presentes en el efluente

La **Tabla 17** se presentan concentraciones de metales y otros elementos identificados en el efluente generado durante el proceso de teñido de fibras naturales. El análisis contempló tanto metales traza como metales pesados, además de otros compuestos inorgánicos de relevancia ambiental. Algunos elementos fueron reportados con valores cuantificables, mientras que otros se encontraron por debajo del límite de detección del método empleado. Las determinaciones fueron realizadas por un laboratorio acreditado por INACAL, lo que respalda la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos, se puede consultar el Anexo 1.

Tabla 17

Metales y otros elementos totales presentes en el efluente del proceso de teñido de fibras naturales

Elemento	Unidad	Resultados (mg/L)
Sodio	mg/L	372,5863
Silice	mg/L	73,728
Calcio	mg/L	44.521
Fósforo	mg/L	31,307
Magnesio	mg/L	14.8705
Potasio	mg/L	8,080
Hierro	mg/L	1.8773
Aluminio	mg/L	1,911
Boro	mg/L	1,7625
Zinc	mg/L	0,5436
Estroncio	mg/L	0,25699
Bario	mg/L	0,04341
Litio	mg/L	0,03103
Manganeso	mg/L	0,03005
Titanio	mg/L	0,0231
Cromo	mg/L	0,0216
Cobre	mg/L	0,01786
Vanadio	mg/L	0,0114
Plomo	mg/L	0,011
Arsénico	mg/L	0,00560
Molibdeno	mg/L	0,00134
Niquel	mg/L	0,0011

Nota. Elaboración propia.

El análisis de metales presentes en el efluente textil muestra que todos los elementos para los cuales existe un valor límite regulado como aluminio, arsénico, boro, cobre, cromo, manganeso, níquel, plomo y zinc se encuentran dentro de los niveles permitidos tanto por la normativa peruana como por los estándares internacionales, evidenciando un adecuado cumplimiento en este aspecto. En contraste, otros elementos como sodio, silicio, hierro, potasio y fósforo no cuentan con un valor máximo definido en dichas normativas, por lo que sus resultados se reportan únicamente con fines de control y seguimiento.

Las concentraciones significativas de sodio (372,6 mg/L), sílice (73,7 mg/L), calcio (44,5 mg/L), y fósforo (31,3 mg/L), son compuestos comúnmente encontrados en las aguas residuales textiles debido a colorantes, mordientes y aditivos, así como residuos en las fibras, influyendo en las propiedades fisicoquímicas del efluente, según los considera Díaz Z. (2021)

De igual manera, los metales traza detectados como hierro (1,88 mg/L), cobre (0,018 mg/L) y zinc (0,54 mg/L) presentes en bajas concentraciones pueden desempeñar un rol beneficioso en procesos fotocatalíticos al actuar como co-catalizadores. Su presencia favorece la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que contribuye a incrementar la eficiencia en la oxidación de compuestos orgánicos. Sin embargo, en concentraciones más elevadas, estos mismos metales podrían interferir negativamente en el proceso, reduciendo la activación del TiO_2 o compitiendo por la absorción de luz UV, lo que disminuye la eficacia del tratamiento como indica Gutiérrez et al (2024).

4.2. Determinación de los parámetros óptimos de operación y eficiencia de remoción de contaminantes mediante fotocátalisis heterogénea con nanopartículas de TiO_2 aplicada a efluentes de tñido textil.

En esta sección se analizan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del proceso fotocatalítico con nanopartículas de TiO_2 en efluentes generados del tñido textil. Se examina el comportamiento de las variables pH, concentración de NPs- TiO_2 y tiempo de residencia, y cómo estas influyen en la eliminación de los contaminantes presentes.

La evaluación del desempeño del tratamiento se realizó mediante la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la reducción de color, esta última analizada a través de espectrofotometría UV-Vis. Los experimentos se desarrollaron bajo distintas condiciones operativas, y los resultados obtenidos fueron analizados empleando herramientas estadísticas y curvas de tendencia, lo que permitió establecer la relación entre las variables de estudio y la eficiencia de remoción alcanzada.

4.2.1. Análisis Estadístico

4.2.1.1. Reducción de la Absorbancia tras el tratamiento fotocatalítico

Los valores de absorbancia obtenidos antes y después del tratamiento fotocatalítico permitieron evaluar la eficiencia en la degradación de los colorantes en el agua textil.

La **Tabla 18** presenta la absorbancia de cada muestra y el porcentaje de degradación en comparación con el agua textil inicial, cuyo valor de absorbancia fue de 0,557; los resultados detallados pueden consultarse en el **Anexo 4**. Asimismo, estos datos permiten evidenciar la variación en la eficiencia del proceso de tratamiento aplicado, facilitando una mejor interpretación del comportamiento de cada muestra bajo las condiciones experimentales establecidas

Tabla 18*Valores de absorbancia a 647 nm después del tratamiento fotocatalítico.*

Repetición	Tiempo (min)	Concentración de NPs-TiO ₂ (g/L)	pH	Resultado de Absorbancia	% Degradación
R1	120	0.5	3	0.107	80.79 %
	120	0.5	5	0.108	80.61 %
	120	1	3	0.023	95.87 %
	120	1	5	0.084	84.92 %
	240	0.5	3	0.052	90.66 %
	240	0.5	5	0.072	87.07 %
	240	1	3	0.008	98.56 %
	240	1	5	0.020	96.41 %
R2	120	0.5	3	0.101	81.87 %
	120	0.5	5	0.103	81.51 %
	120	1	3	0.025	95.51 %
	120	1	5	0.080	85.64 %
	240	0.5	3	0.051	90.84 %
	240	0.5	5	0.077	86.18 %
	240	1	3	0.006	98.92 %
	240	1	5	0.028	94.97 %

Nota. Elaboración propia.

Con analizar de manera integral la influencia de las variables operativas en la eficiencia del proceso fotocatalítico heterogéneo, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de tres factores. En este modelo, se evaluaron como variables independientes el tiempo de exposición, la concentración de TiO₂ y el pH de la solución, mientras que la reducción de la absorbancia fue considerada como variable respuesta, al representar el nivel de degradación de los colorantes presentes en el efluente textil.

Este análisis, realizado mediante programación en Python, permitió evidenciar diferencias significativas en la disminución de absorbancia según las condiciones aplicadas, lo que demuestra que cada variable incide directamente en la eficiencia del tratamiento, como se detalla también en el **Anexo 5**.

- **Prueba de normalidad y homocedasticidad**

Previo a la aplicación del análisis inferencial, se verificó el cumplimiento de los supuestos estadísticos requeridos, específicamente la normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas. La evaluación de la normalidad de los residuos se llevó a cabo mediante la prueba de Shapiro–Wilk, obteniéndose un valor de $p = 0,6837$, superior al nivel de significancia

establecido ($\alpha = 0,05$). Este resultado indica que no existen evidencias para rechazar la hipótesis de normalidad, lo que permite asumir que los residuos siguen una distribución normal, condición necesaria para la validez del análisis de varianza (ANOVA). Lo cual fue corroborado mediante el gráfico Q-Q de los residuos, lo que confirma la normalidad del conjunto de datos, se puede encontrar el resultado en el Anexo 5.

Los resultados obtenidos del test de Levene, utilizado para evaluar la homocedasticidad en todos los factores del diseño experimental, se presentan en la **Tabla 19**. Este test es fundamental para asegurar que las varianzas entre los grupos comparados sean homogéneas, lo que valida la aplicabilidad de análisis estadísticos posteriores.

Tabla 19

Resultados del test de Levene para homocedasticidad por factor

Factor experimental	Valor p	Resultado
Tiempo	0.8371	Homocedasticidad
Concentración	0.9274	Homocedasticidad
pH	1	Homocedasticidad

Nota. Elaboración propia.

Se confirmó la homocedasticidad ($p > 0.05$) en todos los casos, lo cual confirma que no existen diferencias significativas entre las varianzas de los grupos experimentales.

Los residuos del modelo mostraron una distribución normal y varianzas homogéneas, lo que cumple con los requisitos esenciales para la aplicación del análisis paramétrico ANOVA. Estas condiciones son fundamentales para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos en el análisis de la varianza. Dicho análisis se presenta y se visualiza en la **Tabla 20**, donde se detallan los resultados correspondientes

La **Tabla 20** presenta el análisis estadístico de la absorbancia mediante ANOVA, realizado con la finalidad de evaluar la influencia de las variables experimentales y sus interacciones sobre la reducción de la absorbancia del efluente textil tratado.

Tabla 20*Análisis estadístico de la absorbancia mediante ANOVA*

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Razón f	Valor P
A: Tiempo	202.279506	1	572.614090	0.0000000099
B: Concentración_TiO ₂	317.463306	1	898.677111	0.0000000016
C: pH	79.700256	1	1.645848	0.0000003812
A: Tiempo x B: Concentración_TiO ₂	0.581406	1	225.615983	0.2354421
A: Tiempo x C: pH	3.071256	1	8.694131	0.0184657
B: Concentración_TiO ₂ x C: Ph	20.543556	1	58.154827	0.00006153
A:Tiempo x B: Concentración_TiO ₂ x C: pH	31.444056	1	89.012031	0.00001308
Residual	2.826050	8	NaN	NaN

Nota. Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la **Tabla 20** evidencia que las variables operativas tiempo, concentración de TiO₂ y pH, ejercen una influencia significativa sobre la reducción de la absorbancia, confirmando su papel determinante en la eficiencia del proceso fotocatalítico. Los resultados evidencian que el tiempo de exposición ($F = 572.61$; $p = 0.0000000099$), la concentración de TiO₂ ($F = 898.68$; $p = 0.0000000016$) y el pH ($F = 1.64$; $p = 0.0000003812$) resultan inferiores al nivel de significancia, lo que indica que los factores evaluados presentan un efecto estadísticamente significativo. En términos de influencia, la concentración de TiO₂ destaca como la variable con mayor incidencia en el proceso, seguida por el tiempo de irradiación y, en menor medida, el pH. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Pekakis et al. (2006), quienes señalan que tanto la dosificación del catalizador como el tiempo de exposición a la radiación desempeñan un papel determinante en la generación de especies reactivas de oxígeno, fundamentales en los procesos fotocatalíticos.

Los resultados obtenidos en la **Tabla 18** muestran que las NPs-TiO₂ logran una degradación eficiente de los grupos cromóforos presentes en el efluente textil, lo cual se refleja en la disminución de absorbancia, alcanzando hasta un 98.56 % luego de 240 minutos de tratamiento (1 g/L TiO₂, pH 3). Esta reducción está directamente asociada a la pérdida de color, lo que sugiere una alteración en la estructura de las moléculas responsables de la coloración tal como se aprecia en el esquema de la **Figura 3**. Coincidiendo con lo que explica Clavijo (2013),

este fenómeno se debe a la acción de especies oxidantes, principalmente radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$), generadas durante el proceso fotocatalítico, las cuales atacan y fragmentan los enlaces de los sistemas cromóforos. Como resultado, no solo se elimina el color, sino que también se avanza hacia la mineralización del contaminante, transformándolo en compuestos más simples.

El aumento del tiempo de tratamiento a 240 minutos mejoró la degradación en un 18 % respecto a los 120 minutos, debido a una mayor interacción entre los radicales oxidantes y los colorantes. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Muñoz y Palomino (2019), quienes señalaron que periodos de exposición más prolongados favorecen la remoción de contaminantes por la activación continua del catalizador. Sin embargo, sus ensayos se realizaron en una solución sintética y a pH 6, a diferencia del presente estudio con un efluente real y condiciones ácidas, lo que explica las diferencias en los porcentajes de remoción. De igual modo, al aumentar la concentración de NPs-TiO₂ de 0.5 a 1 g/L, se incrementó la eficiencia del proceso por la mayor disponibilidad de sitios activos para la generación de especies oxidantes (Carbuloni et al., 2020). No obstante, este efecto puede limitarse a concentraciones elevadas, ya que el exceso de contaminantes puede saturar dichos sitios y reducir la eficacia por competencia de adsorción y bloqueo de la luz (Zhou et al., 2024).

El pH 3 mostró una mayor eficiencia en comparación con el pH 5, con diferencias que variaron entre un 3 % y un 12 %. Este comportamiento lo explica Sun & Liu (2024), quienes indican que el pH influye en la carga superficial del catalizador y en la adsorción de los cromóforos. En medios ácidos, la protonación de la superficie del catalizador favorece las interacciones electrostáticas con los cromóforos aniónicos, lo que incrementa la adsorción. Así, a pH bajo, como en el caso del pH 3, la superficie del catalizador adquiere una carga positiva, lo que genera una fuerte atracción hacia los cromóforos con carga negativa, optimizando la eficiencia del proceso. En contraste, a pH 5, la superficie pierde parte de su carga positiva,

reduciendo la interacción electrostática con los cromóforos y resultando en una eficiencia menor.

En este sentido, tanto en su estudio como en el presente, se confirma que mantener un pH bajo es esencial para optimizar la eficiencia del proceso fotocatalítico. Además, aunque una concentración de 1 g/L de TiO₂ permitió alcanzar los valores máximos de degradación, una dosis menor (0.5 g/L) combinada con un tiempo de tratamiento más prolongado (240 min) logró superar el 90 % de eficiencia, evidenciando una compensación entre el tiempo de exposición y la cantidad de catalizador empleada.

Al comparar los resultados experimentales de la **Tabla 18** con los valores del análisis estadístico de la **Tabla 20**, se observa una clara coherencia, ya que las condiciones óptimas (pH 3, 1 g/L de TiO₂ y 240 minutos) favorecieron la generación de especies oxidantes y una mayor degradación de contaminantes. En conjunto, ambos resultados confirman que la fotocatalisis con NPs-TiO₂ constituye un método eficaz para la remoción del color y la mejora de la calidad del efluente textil.

En coherencia con estos hallazgos, el coeficiente de determinación R² calculado fue de 0.9957, lo que indica que el modelo explica el 99.57 % de la variabilidad total de los datos, evidenciando un ajuste excelente entre los valores.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{residualtotal}} = 1 - \frac{2.826}{655.083} \approx 0.9957$$

En síntesis, los resultados evidencian una notable disminución de la absorbancia en las muestras tratadas, lo que confirma la degradación de los compuestos responsables del color y, por consiguiente, la reducción de los contaminantes orgánicos presentes.

De igual manera, la mínima variabilidad registrada entre las repeticiones (<2 %) demuestra la consistencia del procedimiento aplicado, lo cual es especialmente importante en el tratamiento de efluentes textiles, donde la reducción del color constituye un parámetro clave para evaluar la eficiencia del proceso.

Además, como complemento a los resultados cuantitativos, la **Figura 10** ofrece una comparación visual del efluente textil tras el tratamiento fotocatalítico bajo diferentes condiciones operativas.

Figura 10

Comparación visual del color del efluente textil después del tratamiento fotocatalítico bajo diferentes condiciones operativas.



Nota: Se observa la reducción progresiva del color en función de la combinación de tiempo, pH y concentración de TiO_2 , evidenciada en ambas repeticiones del experimento (Imagen A: réplica 1; Imagen B: réplica 2). Elaboración propia.

Para resumir los resultados y evaluar la consistencia experimental, se calcularon los valores promedio del porcentaje de degradación obtenido a partir de la absorbancia del efluente bajo diferentes condiciones experimentales. Estos resultados se presentan en la **Tabla 21**.

Tabla 21

Promedio del % de degradación del efluente medido por absorbancia bajo distintas condiciones de TiO₂, pH y tiempo

Tiempo (min)	Concentración de NPs-TiO ₂ (g/L)	pH	% Degradación Absorbancia (Promedio ±DE)
120	0.5	3	81.33 ± 0.76
120	0.5	5	81.06 ± 0.64
120	1	3	95.69 ± 0.25
120	1	5	85.28 ± 0.51
240	0.5	3	90.75 ± 0.13
240	0.5	5	86.62 ± 0.63
240	1	3	98.74 ± 0.25
240	1	5	95.69 ± 1.02

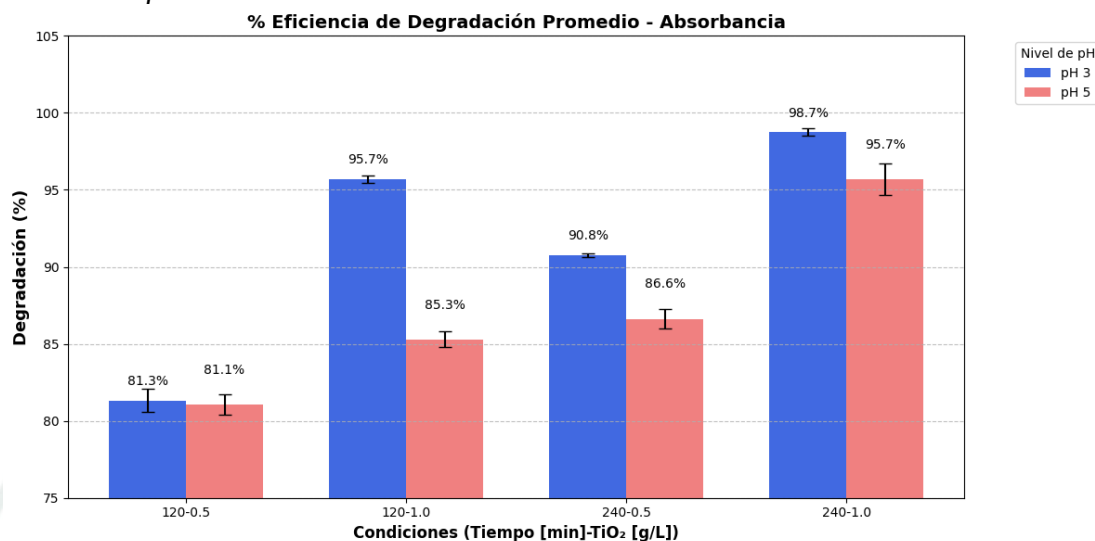
Nota. Elaboración propia.

Los valores presentados en la **Tabla 21** muestran una baja variabilidad, con un rango de variación inferior al 1.0% ($\leq 1.0\%$). Esta baja fluctuación sugiere que los resultados obtenidos son consistentes y estables, lo que refuerza la confiabilidad de los datos obtenidos a lo largo del análisis. La mínima variabilidad observada también indica que el proceso de medición y las condiciones experimentales fueron controladas de manera eficiente, permitiendo una interpretación precisa de los resultados.

Por otro lado, la **Figura 11** ayuda a complementar esta información porque muestra de forma visual las tendencias observadas. Gracias a esta representación gráfica, es más fácil identificar patrones, entender cómo se comportaron los parámetros estudiados y relacionar los resultados entre sí. En conjunto, la tabla y la figura ofrecen una visión más clara y accesible del desempeño del sistema.

Figura 11

% de eficiencia promedio de degradación del color bajo distintas condiciones del tratamiento fotocatalítico.



Nota. Elaboración propia.

La **Figura 11** confirma que la combinación de 240 min, 1 g/L y pH 3 es la más eficiente, alcanzando un promedio de 98.7%, mientras que a pH 5, bajo las mismas condiciones, se obtuvo un promedio igualmente alto (95.7%), aunque ligeramente inferior. Esto reafirma que el pH ácido favorece la generación de especies reactivas, y mejora la estabilidad del sistema catalítico, maximizando la remoción del color en el efluente.

Asimismo, la condición con 0,5 g/L de TiO₂ y 240 minutos lograron también una degradación superior al 90%, lo cual sugiere que un mayor tiempo de exposición puede compensar una menor concentración de catalizador, permitiendo una interacción más prolongada entre las partículas foto catalíticas y los compuestos coloreados.

En resumen, los resultados obtenidos destacan la gran eficacia del tratamiento fotocatalítico en la reducción de la absorbancia de los efluentes textiles, logrando un impresionante 98.56% de degradación bajo condiciones óptimas de 240 minutos, 1 g/L de TiO₂ y un pH de 3.

Este proceso ha demostrado ser altamente consistente, con una variabilidad mínima entre las repeticiones (<2%), lo que respalda la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Además, los análisis estadísticos (ANOVA) confirmaron que las variables operativas, como el tiempo de tratamiento, la concentración de TiO_2 y el pH, tienen una influencia significativa en la eficiencia del proceso, subrayando su importancia crucial en el desempeño general del tratamiento.

4.2.1.2. Reducción de DQO tras el Tratamiento Fotocatalítico

Se determinó, además, la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como un indicador de la eliminación de materia orgánica; en ese sentido, este parámetro permite observar de manera sencilla cómo cambia la calidad del agua después del tratamiento. A medida que los valores de DQO disminuyen, se entiende que hay menos sustancias contaminantes presentes, lo que refleja que el proceso fotocatalítico está dando resultados. Por ello, su evaluación resulta importante, ya que permite comprobar de forma clara la eficacia del tratamiento aplicado.

El valor inicial de DQO, establecido en 1333.9 mg/L, se utilizó como referencia para evaluar las variaciones generadas durante el tratamiento. La **Tabla 22** resume los valores obtenidos en diferentes etapas del proceso, comparándolos con el valor inicial y evidenciando la eficacia en la remoción de la materia orgánica. Cabe destacar que las mediciones fueron realizadas por un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), garantizando la exactitud de los resultados. Para más detalles sobre los procedimientos y los datos obtenidos, consultar el **Anexo 2**.

Tabla 22*Valores de DQO después del tratamiento fotocatalítico.*

Repetición	Tiempo	Concentración de TiO ₂	pH	Resultado de DQO	% Degradación
R1	120	0.5	3	607.2	54.48 %
	120	0.5	5	686.4	48.54 %
	120	1	3	461.9	65.37 %
	120	1	5	455.3	65.87 %
	240	0.5	3	389.3	70.81 %
	240	0.5	5	481.7	63.89 %
	240	1	3	224.3	83.18 %
	240	1	5	329.9	75.27 %
R2	120	0.5	3	607.2	54.48 %
	120	0.5	5	633.6	52.50 %
	120	1	3	405.8	69.58 %
	120	1	5	346.4	74.03 %
	240	0.5	3	333.2	75.02 %
	240	0.5	5	508.1	61.91 %
	240	1	3	164.9	87.64 %
	240	1	5	273.8	79.47 %

Nota. Elaboración propia.

Con el objetivo de analizar la incidencia de las variables operativas en la eficiencia del proceso fotocatalítico heterogéneo, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías, considerando como factores el tiempo de exposición, la concentración de TiO₂ y el pH de la solución, mientras que el porcentaje de degradación de la DQO fue tomado como variable de respuesta. Todo el análisis estadístico se realizó mediante programación en Python tal como se describe en el **Anexo 6**.

Según las condiciones operativas empleadas, se observan variaciones significativas en la eliminación de materia orgánica, lo que evidencia que las variables analizadas influyen directamente en la eficiencia del proceso de tratamiento.

El objetivo del análisis estadístico fue identificar cuál de estas variables tiene mayor impacto sobre el sistema y si existen combinaciones óptimas que potencien la degradación de los contaminantes. En ese sentido, el ANOVA permite sustentar con evidencia estadística la relevancia de cada factor en el desempeño del proceso.

a) Prueba de normalidad y homocedasticidad

Previo a la aplicación del ANOVA, se comprobó el supuesto de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro–Wilk. El valor obtenido ($p = 0.2277$), superior al nivel de significancia establecido ($p > 0.05$), evidenció que los residuos siguen una distribución normal, cumpliéndose así uno de los requisitos fundamentales para este tipo de análisis.

Respecto a la homogeneidad de varianzas, la prueba de Levene arrojó un valor $p = 0.000$ ($p \leq 0.05$), lo que implicó rechazar la hipótesis nula y concluir que existe heterocedasticidad entre los grupos. A pesar de ello, dado que el diseño experimental empleó el mismo tamaño de muestra en cada tratamiento, se procedió con el ANOVA, reconociendo que esta condición podría incrementar el riesgo de incurrir en un error tipo I.

En el **Anexo 6** se muestra el gráfico Q–Q correspondiente a los residuos del modelo, utilizado para verificar su ajuste a una distribución normal. En la que se observa que la mayoría de los puntos se encuentran cercanos a la línea de referencia, lo que sugiere que los residuos muestran un comportamiento acorde con la normalidad y, por tanto, apoya la validez del análisis estadístico realizado.

b) ANOVA y Pruebas de significancia

Hipótesis:

- H_0 : No hay diferencias en la degradación entre los niveles del factor.
- H_1 : Al menos un nivel difiere significativamente.

La **Tabla 23** presenta el análisis estadístico de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el test de ANOVA, con la finalidad de evaluar la influencia de las variables experimentales y sus interacciones sobre la eficiencia de remoción de carga orgánica durante el tratamiento fotocatalítico.

Tabla 23*Análisis estadístico de DQO mediante ANOVA*

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Razón f	Valor P
A: Tiempo	788.767225	1	79.289324	0.000020
B: Concentración_TiO ₂	881.793025	1	88.640566	0.000013
C: pH	95.452900	1	9.595221	0.014719
A: Tiempo x B: Concentración_TiO ₂	7.452900	1	0.749189	0.411937
A: Tiempo x C: pH	68.641225	1	6.900029	0.030329
B: Concentración_TiO ₂ x C: Ph	17.682025	1	1.777452	0.219177
A: Tiempo x B: Concentración_TiO ₂ x C: pH	4.972900	1	0.499891	0.499621
Residual	79.583700	8	NaN	NaN

Nota. Elaboración propia.

En la **Tabla 23** se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos experimentales, evidenciando que el tiempo de reacción, la concentración de TiO₂ y el pH actúan como factores determinantes en la reducción de la DQO. No obstante, cada uno de ellos contribuye con un nivel de influencia distinto sobre la eficiencia del proceso.

La concentración de TiO₂ se posiciona como el factor más influyente ($F = 88.64$, $p < 0.0001$), seguida del tiempo de reacción ($F = 79.29$, $p < 0.0001$) y, en menor proporción, del pH ($F = 9.60$, $p = 0.0147$). Este comportamiento concuerda con estudios previos sobre procesos de oxidación avanzada, donde se destaca que la cantidad de fotocatalizador y el tiempo de irradiación son variables clave para optimizar la generación de especies reactivas de oxígeno, como señalan Pekakis et al. (2006) y Ticona & Tola (2021). El impacto del pH, aunque menor, también es relevante, ya que condiciones ácidas suelen favorecer la adsorción de los contaminantes sobre la superficie del TiO₂, incrementando así la eficiencia del proceso (Camarena, 2021).

El análisis reveló que el efecto del tiempo sobre la degradación depende del pH ($F = 6.90$, $p = 0.0303$), lo que indica que la influencia del tiempo sobre la remoción de DQO varía en función del pH. Este efecto fue más marcado a pH 3, donde un mayor tiempo de reacción incrementó considerablemente la eficiencia.

Esto podría explicarse por la protonación de los sitios activos del TiO_2 en medio ácido, lo que mejora la interacción con los compuestos orgánicos existentes en el efluente (Camarena, 2021).

Por otro lado, las interacciones entre tiempo y concentración de TiO_2 ($p=0.4119$), así como entre concentración de TiO_2 y pH ($p=0.2192$), no resultaron significativas, mientras que la interacción triple entre todos los factores tampoco mostró significancia estadística ($p = 0.4996$).

Esto indica que, dentro del rango de condiciones evaluadas, estos factores actúan de manera predominantemente independiente. Este hallazgo permite simplificar la optimización del proceso, centrándonos en ajustar los efectos individuales más relevantes.

Las condiciones óptimas establecidas para lograr la máxima eficiencia en la degradación corresponden a una concentración de TiO_2 de 1 g/L, un tiempo de reacción de 240 minutos y un pH de 3. Esta combinación no solo recoge los efectos individuales más relevantes, sino que también aprovecha la interacción favorable observada entre el tiempo de exposición y el pH.

A partir de los resultados del análisis de varianza, se calculó el coeficiente de determinación (R^2), el cual refleja el porcentaje de variabilidad que el modelo es capaz de explicar. Este coeficiente se estimó a partir de la relación entre la suma de cuadrados del residuo y la suma total de cuadrados. En esta situación, la suma total de cuadrados alcanzó un valor de 1,944.33, mientras que la suma de cuadrados del residuo fue de 79.58. A partir de estos valores, y aplicando la expresión correspondiente, se procedió a determinar el R^2 del modelo.

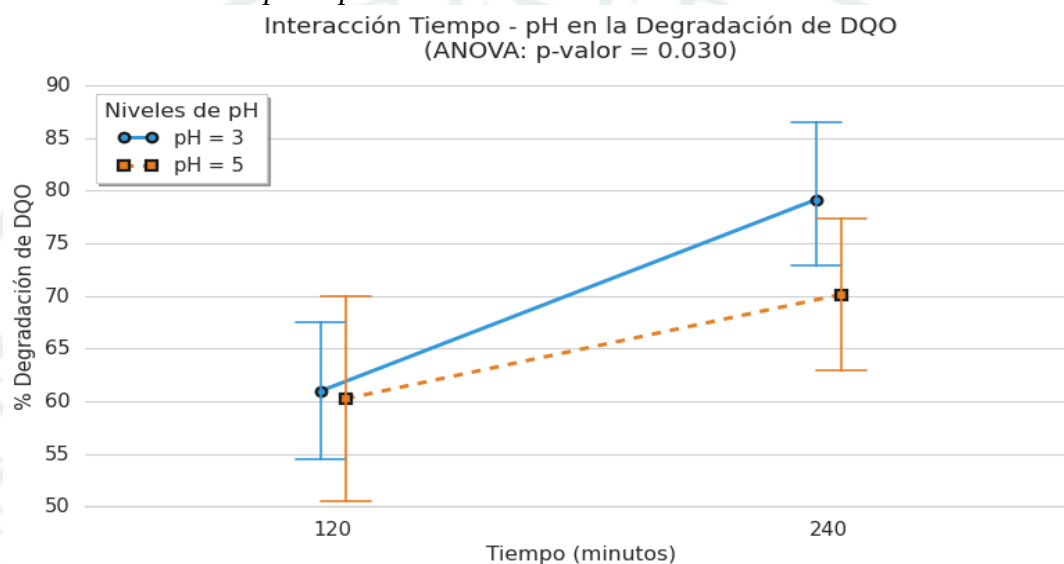
$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{residualtotal}} = 1 - \frac{79.58}{1,944.33} \approx 0.959$$

Este resultado indica que aproximadamente el 96 % de la variabilidad en la remoción de DQO se explica mediante el modelo que incluye el tiempo de exposición, la concentración de TiO_2 , el pH y sus interacciones. En consecuencia, el modelo muestra un adecuado ajuste a los datos experimentales.

Asimismo, la **Figura 12** muestra la interacción entre el tiempo de tratamiento y los niveles de pH en relación con la degradación de la demanda química de oxígeno (DQO), obtenida a través del análisis estadístico. Esta representación gráfica permite visualizar cómo ambos factores se combinan e influyen sobre la eficiencia del proceso fotocatalítico.

Figura 12

Interacción del Tiempo vs pH



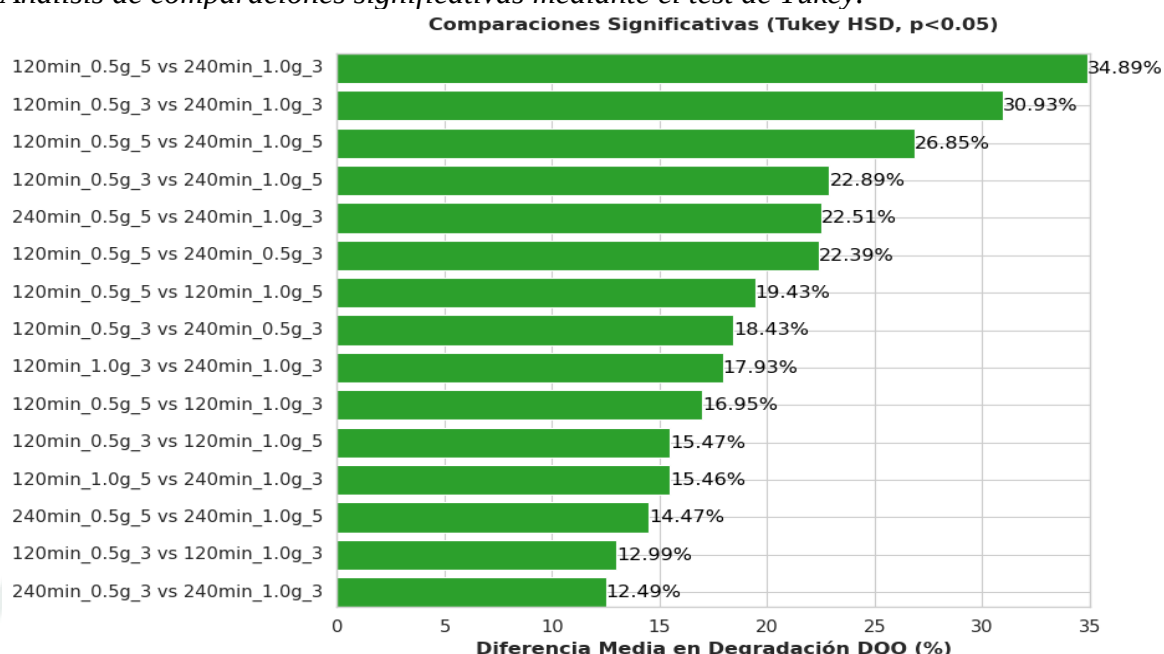
Nota. Elaboración propia.

La interacción significativa entre tiempo y pH ($p=0.030$) se visualiza en la Figura 12. A 240 minutos, el pH 3 muestra un mayor porcentaje de degradación comparado con pH 5, mientras que a 120 minutos ambos pH tienen efectos similares. Los intervalos de confianza del 95%, indican que esta diferencia es estadísticamente relevante sólo con el tiempo prolongado, lo cual podría deberse a una acumulación. Estos resultados reafirman con lo observado en estudio previos, donde se ha demostrado que ambientes más ácidos.

Por otra parte, la **Figura 13** muestra los resultados del análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey, cuyo propósito es identificar los tratamientos que presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Figura 13

Análisis de comparaciones significativas mediante el test de Tukey.



Nota: Elaboración propia. Las barras muestran las diferencias significativas ordenadas por magnitud.

La prueba de Tukey se emplea para hacer comparaciones entre todas las parejas posibles de grupos después de un ANOVA. El objetivo es determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos respecto a la variable dependiente. Aunque el ANOVA detectó interacción tiempo-pH ($p=0.030$), la **Figura 13** da a conocer los resultados del análisis post-hoc de Tukey evidenció 15 comparaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre combinaciones de tiempo, concentración de TiO_2 y pH, lo cual indica que la eficiencia del tratamiento fotocatalítico varía de manera importante con estos factores.

El tratamiento con mayor remoción de DQO (240 min, 1.0 g/L NPs- TiO_2 , pH 3) presentó una diferencia de +34.89% respecto al menos eficaz (120 min, 0.5 g/L NPs- TiO_2 , pH 3), confirmando el papel crucial de tiempos prolongados y mayor concentración del catalizador en la optimización del proceso.

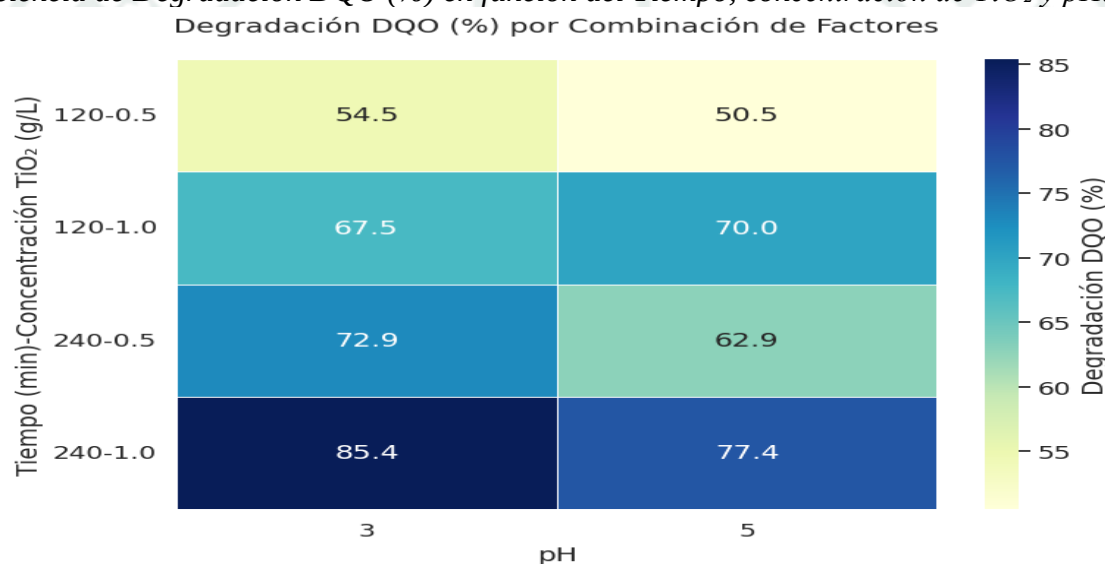
La concentración de NPs- TiO_2 tuvo un impacto marcado en tiempos cortos (120 min), donde el aumento de 0,5 a 1,0 g/L generó mejoras de hasta +19,43%, mientras que este efecto

se redujo a tiempos largos, mostrando solo +12.49% a 240 min, evidenciando una compensación del tiempo sobre la concentración.

Asimismo, el efecto del pH fue más relevante con baja concentración de TiO_2 . Por ejemplo, a 240 min y 0.5 g/L, el descenso de pH de 5 a 3 incrementó la eficiencia en +14.47%, mientras que con 1.0 g/L este cambio tuvo menor impacto. Esto refuerza que el pH ácido potencia la producción de radicales oxidantes, especialmente cuando la disponibilidad del catalizador es limitada.

Figura 14

Eficiencia de Degradación DQO (%) en función del Tiempo, concentración de TiO_2 y pH.



Nota. Elaboración propia.

La **Figura 14** indica la representación mediante el mapa de calor permite visualizar de forma clara el comportamiento del sistema fotocatalítico bajo diferentes combinaciones de tiempo, concentración de TiO_2 y pH, destacando cómo estos factores influyen en la eficiencia de remoción de DQO. La condición óptima se obtuvo con 240 minutos, 1.0 g/L de TiO_2 y pH 3, alcanzando una eficiencia combinada del 85.4 %, lo cual confirma que un mayor tiempo de exposición y una mayor concentración del catalizador en medio ácido favorecen significativamente la degradación.

El tiempo demostró ser un factor determinante; a pH 3, al incrementar el tiempo de 120 a 240 minutos, la eficiencia aumentó en 17.9% con 1.0 g/L y en 18.4% con 0.5 g/L de TiO_2 ; mientras que a pH 5, los incrementos fueron menores, de 7.4% y 12.4% de manera respectiva, lo que implica que el efecto del tiempo es más pronunciado cuando se utiliza menos catalizador. Por su parte, el pH también influyó en la eficiencia, especialmente en condiciones con menor concentración de TiO_2 ; con 120 minutos y 0.5 g/L, el cambio de pH 5 a pH 3 representó una mejora del 4.0%, mientras que en condiciones más favorables (240 min, 1.0 g/L), esa diferencia aumentó a 8.0%. En conjunto, estos resultados sugieren que tanto el tiempo como la concentración de TiO_2 tienen un impacto significativo, y que un pH ácido potencia la eficiencia, especialmente en condiciones de tratamiento menos intensivas.

Según lo mencionado, la concentración óptima es de 240 min, 1,0 g/L de NPs- TiO_2 , pH 3. No obstante, incluso con una concentración baja 0.5 g/L de NPs- TiO_2 , es posible lograr una degradación del 72.9% ajustando el pH 3 y extendiendo el tiempo a 240 min, lo cual representa un equilibrio entre costo y eficiencia operativa si se desea reducir el consumo de catalizador.

Según la **Tabla 21 y 22** los resultados logrados evidencian la gran eficacia del tratamiento fotocatalítico, destacándose especialmente en la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), con una degradación del 87.64% bajo condiciones óptimas de 240 minutos, 1 g/L de TiO_2 y pH 3. Por otro lado, estos resultados son coherentes con los de absorbancia, dado que, al igual que la DQO, la reducción de absorbancia también alcanzó valores elevados (98.92 %) bajo las mismas condiciones. Esto refuerza la idoneidad de la fotocatálisis como proceso eficiente para tratar parámetros fisicoquímicos difíciles de eliminar, tales como los compuestos colorantes, que afectan tanto la absorbancia como la carga orgánica en el efluente. Adicionalmente, los análisis estadísticos (ANOVA) confirmaron que variables operativas como el tiempo de tratamiento, la concentración de TiO_2 y el pH son factores determinantes para maximizar la eficacia del proceso.

Cabe señalar que, el método de síntesis empleado ha sido previamente validado en estudios similares, donde se reporta la obtención de TiO_2 en fase anatasa con dimensiones nanométricas, lo cual permite asumir propiedades adecuadas para su aplicación fotocatalítica. Asimismo, el alto desempeño observado en la degradación de contaminantes respalda indirectamente la efectividad del material sintetizado.

Desde una perspectiva económica, el análisis costo-beneficio del tratamiento fotocatalítico se realizó bajo condiciones de escala de laboratorio, considerando un sistema tipo batch y las condiciones óptimas obtenidas (pH 3, 1 g/L de nanopartículas de TiO_2 y 240 minutos). En este análisis se asumió que los costos están asociados principalmente al consumo de fotocatalizador y al uso de energía durante la irradiación UV, sin incluir costos de infraestructura, operación continua ni mantenimiento.

Los datos fueron estimados a partir de precios referenciales de mercado y de la experiencia experimental. Se identificó que el mayor costo corresponde al precursor isopropóxido de titanio (TTIPP), debido a su adquisición en volúmenes mayores a los requeridos, seguido de la lámpara de irradiación UV. En contraste, otros insumos presentan un impacto económico menor.

Asimismo, se evidenció que la optimización del proceso permite reducir la dosis de nanopartículas de TiO_2 manteniendo la eficiencia mediante el incremento del tiempo de tratamiento, lo que representa una ventaja en la reducción del consumo de reactivos. No obstante, esta condición implica mayores tiempos de operación, lo que a mayor escala podría incrementar el consumo energético.

En síntesis, los resultados obtenidos refuerzan la noción de que el tratamiento fotocatalítico es efectivo no solo para eliminar compuestos orgánicos, sino también en la reducción de colorantes y otros contaminantes que afectan los parámetros fisicoquímicos del efluente. En comparación con estudios previos, estos resultados evidencian que el proceso

fotocatalítico es una alternativa prometedora en el tratamiento de aguas residuales textiles, destacando la relevancia de emplear tecnologías avanzadas que permitan cumplir los límites regulatorios y mitigar el impacto ambiental de la industria textil.

4.2.2. Evaluación del tratamiento fotocatalítico de los parámetros más viables y comparación con la normativa nacional e internacional.

La muestra que mostro la mayor eficiencia en la degradación fue remitida al laboratorio para su análisis, a fin de contrastar los resultados alcanzados con los límites fijados en la normativa nacional y los estándares internacionales, los cuales se interpretan en función del nivel básico (Foundational) de la guía ZDHC. Todas las mediciones fueron realizadas en un laboratorio acreditado por INACAL, lo que asegura la fiabilidad y validez de los resultados. A partir de esta comparación, se identificaron las muestras que cumplieron con los parámetros de referencia, cuyos resultados se presentan en las **Tablas 24 y 25** y se amplían en el **Anexo 3**.

Tabla 24
Comparación de resultados con normativa nacional e internacional.

Parámetro	Unidad	Valores iniciales	Valores finales	% Degradación	D.S. N°010- 2019	Límite ZDHC Foundational
Ph	Unidad de pH	3,32	7	-	6-9	6-9
Temperatura	(°C)	21°	18	-	<35	Δ+15
Turbidez	NTU	40,60	50	-	-	-
Color (Absorbancia UV-Vis)	Abs	0,557	0.006	98.92%	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	43,0	33.2	-	500	50
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	547,3	425.7	-	500	30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1333,9	164.9	87.64%	1000	150
Oxígeno Disuelto (OD)	Mg DO/L	4,82	1.74	-	-	≥4
Sulfuro	mg/L	0,020	<0.002	-	5	0.5

Nota. Elaboración propia.

La **Tabla 24** muestra que el sistema fotocatalítico con NP's de TiO₂ presentó un desempeño destacado en la remoción de contaminantes. En el caso del color, se logró una reducción del 98.92 % (de 0.557 a 0.006 Abs), lo que refleja un alto nivel de eficiencia en la degradación de compuestos cromóforos, característica relevante en efluentes textiles. Cabe

precisar que, de acuerdo con la guía ZDHC, la evaluación del color se realiza mediante mediciones espectrofotométricas a longitudes de onda específicas (436, 525 y 620 nm), las cuales representan diferentes rangos del espectro visible y permiten una caracterización más precisa de la remoción de colorantes.

Respecto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se alcanzó una reducción de 87.64 % (de 1333.9 a 164.9 mg/L). Este valor cumple con el límite establecido por el Decreto Supremo N.º010-2019, aunque se ubica ligeramente por encima del estándar ZDHC, que fija un máximo de 150 mg/L. Esto sugiere que las NPs-TiO₂ son eficaces para romper estructuras cromóforas, pero aún requieren optimización para alcanzar una degradación más completa de los contaminantes orgánicos.

Por su parte, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) mostró una reducción de 22.2 % (de 547.3 a 425.7 mg/L); sin embargo, el valor final supera ampliamente el estándar ZDHC (30 mg/L), lo que evidencia la presencia de materia orgánica biodegradable residual y la necesidad de aplicar tratamientos complementarios, como procesos biológicos.

El oxígeno disuelto (OD) descendió de 4.82 a 1.74 mg/L, valor inferior al mínimo requerido por ZDHC (≥ 4 mg/L). Esta disminución podría deberse al consumo de oxígeno por compuestos orgánicos residuales o a una aireación insuficiente durante el tratamiento. En contraste, se logró una remoción total de sulfuros, al disminuir su concentración de 0.020 mg/L a niveles inferiores al límite de detección (<0.002 mg/L), lo que constituye un resultado favorable en términos de toxicidad. Con respecto a los sólidos suspendidos totales (SST), se registró una reducción de 22.8 % (de 43.0 a 33.2 mg/L), cumpliendo con los límites del D.S. N.º010-2019 (500 mg/L) y del ZDHC (50 mg/L). El pH también fue regulado eficazmente, pasando de 3.32 a 7.00, dentro del rango permitido por ambas normativas (6–9). De igual modo, la temperatura final del efluente fue de 18 °C, valor que se mantiene dentro del máximo admisible (<35 °C).

En general, estos resultados muestran una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes, los cuales evidencian que parámetros como la DQO y la DBO₅ aún no cumplen con los estándares internacionales más exigentes establecidos por ZDHC. Esto indica que, si bien el tratamiento fotocatalítico es altamente efectivo en la degradación de compuestos recalcitrantes y colorantes, presenta limitaciones en la remoción de materia orgánica biodegradable.

En ese sentido, los resultados obtenidos permiten inferir que la fotocatálisis heterogénea con TiO₂ no debe considerarse como un tratamiento independiente, sino como una etapa complementaria dentro de un sistema integral. La inclusión de procesos complementarios, como tratamientos biológicos o fisicoquímicos, podría incrementar la eficiencia global del sistema y asegurar el cumplimiento de normas más exigentes, especialmente en escenarios que demandan una mayor protección ambiental.

A partir de la comparación realizada con la normativa nacional e internacional, se hace necesario profundizar las implicancias regulatorias de los resultados obtenidos.

El cumplimiento de los Valores Máximos Admisibles (VMA), establecidos en el D.S. N.º010-2019-VIVIENDA, no garantiza necesariamente una adecuada protección ambiental, debido a que estos están diseñados principalmente para preservar la infraestructura del sistema de alcantarillado y garantizar el desempeño de las PTAR, mas no para evaluar el impacto final del efluente sobre los ecosistemas receptores.

En el contexto peruano, la gestión de efluentes presenta una fragmentación normativa. Por un lado, los Valores Máximos Admisibles (VMA) regulan las descargas al sistema de alcantarillado, priorizando la protección de la infraestructura sanitaria; por otro, los Límites Máximos Permisibles (LMP) fijan criterios para los vertimientos directos a cuerpos de agua, mientras que los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) determinan la calidad del cuerpo receptor. Sin embargo, este esquema evidencia una limitación importante, ya que no existe un

marco normativo que integre de manera preventiva el control de los contaminantes desde su generación en el proceso industrial, ni que garantice una evaluación integral de los riesgos ambientales y para la salud antes de la descarga al alcantarillado. En este sentido, la normativa nacional se centra en el control del efluente en puntos específicos del sistema, sin abordar de forma completa la gestión de las sustancias químicas utilizadas ni su impacto a lo largo de todo el ciclo, desde su uso en la industria hasta su liberación final al ambiente.

Este vacío normativo implica que un efluente puede cumplir con los VMA, pero aún contener contaminantes que no son completamente removidos en la PTAR, generando riesgos ambientales en los cuerpos receptores. Esta situación es especialmente crítica en el sector textil, a causa de la presencia de compuestos complejos y recalcitrantes.

Según Manickam & Vijay (2021), los efluentes textiles contienen sustancias peligrosas como alquilfenoles, ftalatos, metales pesados y compuestos perfluorados. Estos compuestos presentan toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación, lo que ocasiona riesgos para la salud humana y efectos negativos en los organismos acuáticos.

En este contexto, estándares internacionales como ZDHC establecen criterios más estrictos y consideran aspectos adicionales como la gestión de contaminantes en lodos, lo cual es relevante para el control de nuevas formas de contaminación como los nanomateriales (Paul et al., 2026).

Asimismo, Thakker & Sun (2022) destacan que iniciativas como ZDHC y herramientas como la lista MRSL promueven la eliminación de sustancias peligrosas desde la etapa de producción, fomentando una gestión química preventiva. De manera complementaria, Prasannamedha & Senthilkumar (2021) indican que regulaciones como REACH en la Unión Europea establecen un enfoque preventivo, obligando a las industrias a gestionar los riesgos desde el origen y restringiendo sustancias peligrosas, lo cual contrasta con el enfoque reactivo de la normativa nacional.

Desde una perspectiva práctica, la desarticulación normativa permite que las empresas cumplan con los requisitos legales. En ese sentido, los resultados evidencian la eficiencia del tratamiento fotocatalítico y la necesidad de fortalecer el marco regulatorio e incorporar enfoques preventivos.

Tabla 25

Comparación de metales total con normativas nacionales e internacionales.

Elemento	Unidad	Valores iniciales	Valores finales	D.S. N°010-2019	Límite ZDHC Foundational
Aluminio	mg/L	1,911	1.815	10	-
Arsénico	mg/L	0.00560	0.00259	0.5	0.05
Bario	mg/L	0.04341	0.02918	-	Solo muestrear y reportar
Boro	mg/L	1.7625	1.1068	4	-
Calcio	mg/L	44.521	52.096	-	-
Cobre	mg/L	0.01786	0.01046	3	1
Cromo	mg/L	0.0216	0.0146	10	0.2
Estroncio	mg/L	0.25699	0.40245	-	-
Fosforo	mg/L	31.307	1.968	-	-
Hierro	mg/L	1.8773	2.6590	-	-
Litio	mg/L	0.03103	0.02565	-	-
Magnesio	mg/L	14.8705	18.7563	-	-
Manganeso	mg/L	0.03005	0.04320	4	-
Molibdeno	mg/L	0.00134	<0.00100	-	-
Niquel	mg/L	0.0011	0.0076	4	0.2
Plomo	mg/L	0,011	0.0015	0.5	0.1
Potasio	mg/L	8,080	8.946	-	-
Sodio	mg/L	372,5863	681.6979	-	-
Titanio	mg/L	0,0231	<0.0010	-	-
Vanadio	mg/L	0,0114	0.0079	-	-
Zinc	mg/L	0,5436	0.7806	10	5
Silice	mg/L	73,728	54.519	-	-

Nota: Muestrear y reportar - No hay un valor máximo permitido para ese metal en ese momento, sin embargo, se debe tomar la muestra.

En la **Tabla 25** se muestran los resultados de la comparación de metales totales frente a los límites establecidos por la normativa nacional (D.S. N.°010-2019) y los estándares internacionales (ZDHC). Los valores obtenidos confirman que todos los metales evaluados se ajustan a los rangos permitidos por la normativa peruana, lo cual resalta el buen desempeño del sistema de tratamiento en términos de eliminación de metales pesados.

Asimismo, se observa cumplimiento con los estándares ZDHC en la mayoría de los elementos regulados, destacando concentraciones finales significativamente reducidas de

arsénico (0.0026 mg/L), cobre (0.0105 mg/L), cromo (0.0146 mg/L), níquel (0.0076 mg/L), plomo (0.0015 mg/L) y zinc (0.7806 mg/L), todos por debajo de sus límites respectivos. Esta reducción demuestra la eficiencia del tratamiento no solo en cumplir la legislación nacional, sino también estándares más rigurosos a nivel internacional. Por otro lado, varios elementos como bario, calcio, fósforo, hierro, litio, magnesio, potasio, sodio, titanio, vanadio y sílice no tienen límites establecidos en dichas normativas. No obstante, su cuantificación permite una caracterización más completa del efluente tratado.

Cabe destacar que algunos elementos, como el fósforo (1.968 mg/L), el sodio (681.7 mg/L), la sílice (54.5 mg/L) y el hierro (2.659 mg/L), reflejaron concentraciones relativamente altas después del tratamiento. Aunque estos valores no constituyen una violación de la normativa vigente, podrían afectar ciertos parámetros de calidad del agua para uso industrial.

Estos resultados son relevantes considerando que los metales pesados presentes en efluentes textiles, como plomo, cadmio y cromo, poseen características de toxicidad, persistencia y bioacumulación, pudiendo generar impactos negativos en organismos acuáticos y en la salud humana incluso a bajas concentraciones. En este sentido, su presencia refuerza la necesidad de aplicar criterios de control más estrictos que no solo consideren límites de descarga, sino también su comportamiento y acumulación en el ambiente (Manickam, & Vijay, 2021).

En el contexto actual de la industria textil en Arequipa, se observa que las empresas que buscan mantenerse o ingresar a mercados internacionales no solo deben cumplir con la normativa ambiental nacional, sino que también requieren avanzar progresivamente hacia la adopción de estándares internacionales. En este marco, cobra especial importancia el estándar ZDHC, el cual establece criterios más estrictos para el control de sustancias químicas peligrosas y la gestión de efluentes, mientras que otros estándares como OEKO-TEX o GOTS refuerzan

la trazabilidad y la sostenibilidad en toda la cadena productiva, respondiendo así a las exigencias del mercado global. (Texlimca, 2025)

Finalmente, los resultados de la presente investigación evidencian que el tratamiento evaluado cumple con la normativa nacional vigente; sin embargo, aún se identifican brechas frente a los estándares internacionales más exigentes. En ese sentido, este hallazgo no solo representa una limitación, sino también una oportunidad de mejora para fortalecer el desempeño ambiental del sector textil arequipeño y, con ello, facilitar su competitividad e inserción en mercados internacionales.



4.3. Evaluación de la toxicidad aguda del efluente tratado mediante ensayos con organismos modelo

4.3.1. Bioensayos de Ecotoxicidad con *Daphnia magna*

Se realizó la prueba con el efluente sin tratar de la industria textil (control negativo), observándose una mortalidad del 100 % en todas las repeticiones dentro de las primeras 24 horas de exposición, lo cual evidencia la elevada toxicidad del efluente sin tratamiento y su incapacidad para permitir la supervivencia de los organismos evaluados en un corto periodo de tiempo, reflejando el impacto directo y negativo de los contaminantes presentes en las aguas residuales industriales. De manera similar, Peng et al. (2025) reportan que los efluentes textiles no tratados generan toxicidad aguda en organismos acuáticos como *Daphnia magna*, provocando efectos severos en su supervivencia, lo que refuerza el alto riesgo que este tipo de efluentes representa para los ecosistemas acuáticos receptores.

En consecuencia, se evidencia que los sectores textiles son los que presentan los niveles de toxicidad más altos; por lo tanto, resulta fundamental implementar tratamientos más eficaces y, al mismo tiempo, continuar evaluando de manera sistemática al efecto de estos vertimientos en los ecosistemas acuáticos (Agudelo et al., 2016).

En los resultados obtenidos en la prueba de toxicidad a las 24 horas de exposición, se evaluaron concentraciones del efluente ya tratado (0 %, 6.25 % y 12.5 %), observándose que en estos niveles no se generó mortalidad en *Daphnia magna*, lo que indica que, durante este periodo inicial, el efluente tratado no presentó un efecto letal a bajas concentraciones. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Yuzer et al. (2019), quienes al evaluar la toxicidad de nanopartículas de TiO₂ en *Daphnia magna* evidenciaron que los efectos agudos solo se manifiestan cuando las concentraciones alcanzan niveles suficientemente altos.

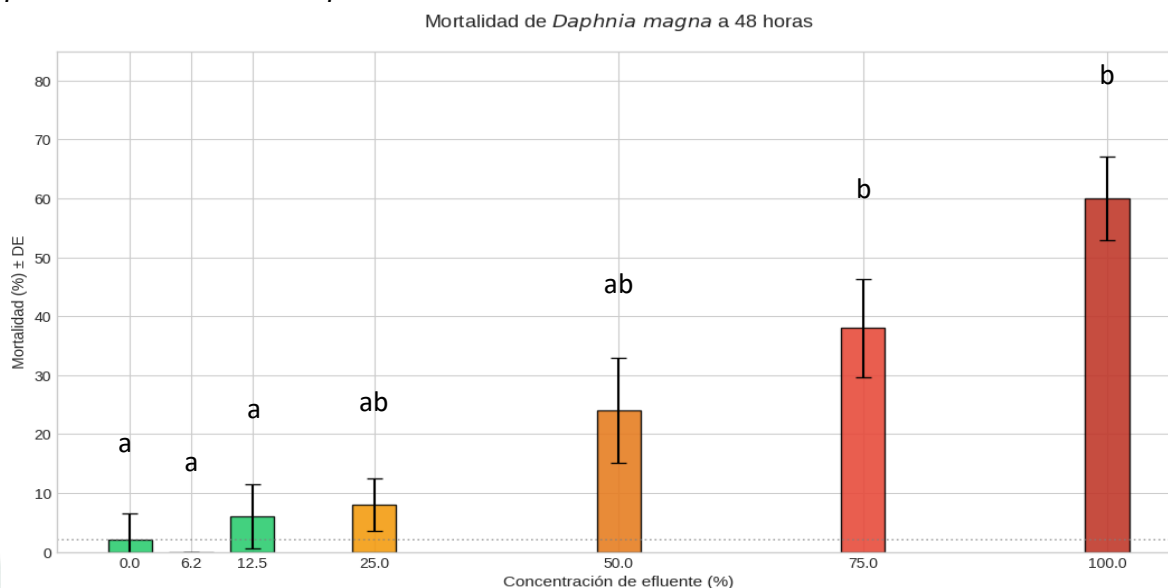
No obstante, a partir de la concentración del 25% del efluente tratado se presentó un aumento progresivo en la mortalidad, alcanzando un valor máximo de $16.0 \pm 5.48\%$ al 100% de efluente tratado durante el periodo de exposición. Este comportamiento es consistente con estudios previos sobre toxicidad aguda en *Daphnia magna*, en los que se ha demostrado que los efectos letales se intensifican conforme aumenta la concentración del contaminante, tal como lo reportó Yuzer et al. (2019), quienes realizaron de manera similar ensayos con nanopartículas de TiO_2 y evidenciaron que el porcentaje de inmovilización aumentaba proporcionalmente con la concentración de las partículas, reflejando la relación dosis-respuesta característica de los efectos agudos en organismos acuáticos.

En conjunto, estos resultados confirman que, aunque la fotocatálisis contribuyó a reducir considerablemente la toxicidad de los efluentes, los efectos agudos aún podían manifestarse cuando se alcanzaban concentraciones elevadas de efluente tratado.

La **Figura 15**, presentada a continuación, muestra el porcentaje de mortalidad después de 48 horas de exposición, permitiendo observar la evolución del efecto tóxico del efluente tratado en el tiempo. Cabe precisar que los resultados correspondientes a las 24 horas de exposición no se incluyen en esta figura, ya que se encuentran detallados de manera específica en el **Anexo 7**, con el fin de complementar y sustentar el análisis comparativo de la toxicidad en ambos periodos de evaluación.

Figura 15

Mortalidad de *Daphnia magna* tras 48 horas de exposición a diferentes concentraciones de efluente tratado mediante fotocátalisis.



Nota. Elaboración propia.

La **Figura 15** muestra que, tras 48 horas de exposición, la mortalidad de *Daphnia magna* aumentó significativamente en comparación con las 24 horas, lo que confirma un efecto acumulativo del efluente. Este patrón es coherente con lo observado por Sa'adah et al. (2025), quienes reportaron que, en bioensayos de 24 h frente a 48 h, la toxicidad hacia *D. magna* se intensifica conforme se alarga el tiempo de exposición, lo que se refleja en una mayor mortalidad. No obstante, es importante destacar que, aunque los resultados mostraron un aumento en la mortalidad, estos son relativamente mejores en comparación con los obtenidos al exponer a *D. magna* al efluente sin tratar, donde se observó una mortalidad del 100 %.

Esto sugiere que, aunque la toxicidad acumulativa sigue presente, el tratamiento del efluente disminuye significativamente su impacto letal. Como señalan Sa'adah et al. (2025), la influencia de los contaminantes no solo está determinada por su concentración inicial, sino también de su persistencia y de los subproductos que se generan durante el tiempo de exposición,

En las concentraciones más bajas (0% y 6.25%), la mortalidad se mantuvo prácticamente ausente. Sin embargo, a partir del 12.5%, se observó un incremento, lo que contrasta con la ausencia de mortalidad registrada en esta misma concentración a las 24 horas.

El aumento en la toxicidad fue más evidente en concentraciones superiores. A los 50% y 75%, lo que indica una progresión clara en la letalidad con el incremento de la concentración. Finalmente, en la concentración máxima (100%), la mortalidad alcanzó el $60.0 \pm 7.07\%$, más del triple del valor registrado en este mismo nivel a las 24 horas.

Estos resultados indican que la toxicidad del efluente aumenta con el tiempo de exposición, sugiriendo que los efectos letales sobre *Daphnia magna* podrían estar asociados a la acumulación de compuestos tóxicos. Por lo tanto, es fundamental considerar la duración de la exposición del efluente en los ecosistemas acuáticos, ya que los efectos nocivos pueden desarrollarse de manera gradual y no manifestarse de inmediato.

El análisis estadístico del efecto del efluente tratado sobre *Daphnia magna* se presenta en la **Tabla 26**, donde se detallaron los porcentajes de mortalidad registrados a las 24 y 48 horas de exposición. Además, se incluyen los resultados de las comparaciones post-hoc realizadas con la prueba de Dunn, los cuales se detallan más en el **Anexo 7**.

Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro–Wilk, cuyos resultados indicaron que los datos no seguían una distribución normal ($p < 0.05$). Esto impidió la aplicación de pruebas paramétricas, como el ANOVA, y justificó el uso de métodos no paramétricos. Si bien la prueba de Levene arrojó homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), la ausencia de normalidad fue determinante para la elección del análisis. En consecuencia, se empleó la prueba de Kruskal–Wallis, la cual evidenció diferencias significativas entre los grupos en ambas evaluaciones ($p < 0.05$).

Debido a que el test de Kruskal-Wallis solo señala diferencias significativas entre los grupos, pero no detalla cuáles son, se requiere un análisis adicional, por lo cual se aplicó un análisis post-hoc de Dunn con ajuste de Holm. Este enfoque es especialmente recomendado para datos no paramétricos, ya que permite identificar de manera precisa qué concentraciones difieren entre sí, controlando el riesgo de errores tipo I. La aplicación de este análisis es fundamental para realizar comparaciones múltiples en estudios donde los datos no están distribuidos normalmente (Dinno, 2015).

La **Tabla 26** presenta los resultados del bioensayo realizado con *Daphnia magna*, expuesta a diferentes concentraciones del efluente textil tratado durante 24 y 48 horas; en ese sentido, permite apreciar de manera general cómo varía la mortalidad conforme aumentan tanto la concentración como el tiempo de exposición. Asimismo, esta información resulta importante porque brinda una visión clara del posible efecto del efluente tratado sobre organismos acuáticos, facilitando la evaluación de su comportamiento en condiciones controladas y aportando elementos para interpretar su nivel de impacto.

Tabla 26

*Evaluación del bioensayo con *Daphnia magna* expuesta a diferentes concentraciones del efluente textil tratado a las 24 y 48 h de exposición.*

Concentración del efluente (%)	% de mortalidad 24 h (Media $\pm$ DE)	% de mortalidad 48 h (Media $\pm$ DE)	Comparaciones post-hoc (Dunn)
0% (control)	0.0 $\pm$ 0.0	2.0 $\pm$ 4.47	-
6.25%	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 $\pm$ 0.0	48h: vs 75% ($p = 0.016^*$), vs 100% ($p = 0.0006^*$)
12.5%	0.0 $\pm$ 0.0	6.0 $\pm$ 5.48	48h: vs 100% ($p = 0.022^*$)
25%	4.0 $\pm$ 5.48	8.0 $\pm$ 4.47	48h: vs 100% ($p = 0.056$)
50%	8.0 $\pm$ 4.47	24.0 $\pm$ 8.94	24h: vs 0%, 6.25%, 12.5% ($p = 0.366$) 48h: vs 6.25% ($p = 0.0997$)
75%	10.0 $\pm$ 0.0	38.0 $\pm$ 8.37	48h: vs 0% ($p = 0.044^*$), vs 6.25% ($p = 0.016^*$)
100%	16.0 $\pm$ 5.48	60.0 $\pm$ 7.07	24h y 48h: vs 0%, 6.25%, 12.5% ($p < 0.05$)
NOEC, %	75.0	50.0	-
LOEC, %	100.0	75.0	-
CL ₅₀ , %	ND	87.12	-
SW	0.73	0.83	-
Sig.	0.00	0.0001	-
Levene	1.58	0.63	-
Sig.	0.19	0.70	-
KW	26.89	30.66	-
Sig.	0.0002	0.00	-

Nota. Sig.: significancia estadística; h: horas; DE: desviación estándar; NOEC: concentración sin efectos observados; LOEC: menor concentración con efectos observados; CL₅₀: concentración letal media; S-W: prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad; Levene: prueba de homocedasticidad; K-W: prueba de Kruskal-Wallis, ND: No Determinado.

Nota: Los valores de p marcados con (*) indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) según la prueba post-hoc de Dunn con ajuste de Holm.

Los resultados mostraron que, a 24 horas, la NOEC fue 75%, indicando que concentraciones $\leq 75\%$ no difieren significativamente del control, mientras que la LOEC fue 100%. A 48 horas, la NOEC disminuyó a 50% y la LOEC a 75%, evidenciando un efecto tóxico acumulativo con el tiempo.

De acuerdo con el análisis post-hoc de Dunn, los resultados muestran un patrón de toxicidad dependiente de la concentración como del tiempo de exposición. A 24 horas, solo la concentración más alta (100%) mostró diferencias significativas respecto al control. A 48 horas, la toxicidad aumentó progresivamente desde 75% ($p < 0.05$) hasta 100% ($p < 0.001$). La ausencia de diferencias entre 50% y concentraciones menores sugiere un posible umbral de toxicidad, donde las concentraciones más bajas no generan un efecto claramente distinguible.

El análisis Probit determinó una CL_{50} de 87.12% a las 48 horas, lo que sugiere que el efluente tratado precisa una concentración elevada para causar un efecto letal agudo en *Daphnia magna*. A las 24 horas, no fue posible calcular la CL_{50} , por lo que se reporta como ND (No determinado), ya que ninguno de los tratamientos superó el 50% de mortalidad requerido para este cálculo.

A pesar del tratamiento fotocatalítico, la toxicidad residual observada sugiere que no se logró una remoción completa de los compuestos tóxicos, lo que podría requerir etapas adicionales de tratamiento o procesos de depuración complementarios.

Según la clasificación de toxicidad basada en unidades toxicológicas agudas (UTa), el valor de CL_{50} obtenido para el efluente corresponde a una UTa de 1.15, lo que lo clasifica como ligeramente tóxico (Persoone et al., 2003). Este resultado indica que el efluente posee cierta capacidad para inducir efectos adversos sobre *Daphnia magna*, aunque en términos generales su toxicidad es baja.

Este resultado guarda coherencia con lo reportado en investigaciones previas que han analizado la capacidad de los procesos fotocatalíticos para disminuir la toxicidad de efluentes industriales. En esta línea, Öztekin y Sponza (2022) observaron que la aplicación de TiO_2 dopado con dióxido de cerio en aguas residuales textiles permitió reducir de manera notable la mortalidad de *Daphnia magna*, lo que evidencia que el proceso no solo degrada compuestos químicos complejos, sino que también atenúa los efectos biológicos asociados a ellos. De este

modo, nuestros hallazgos se integran con la literatura existente y refuerzan la idea de que la fotocátalisis puede convertirse en una herramienta efectiva para minimizar los riesgos ecotoxicológicos derivados de estos vertimientos.

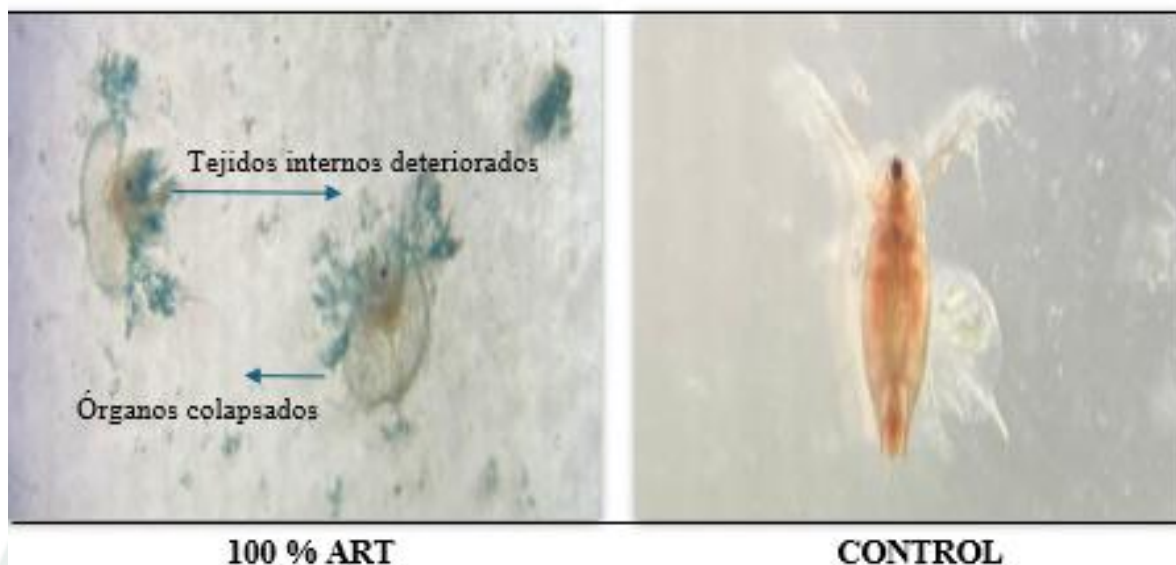
Por otro lado, Gebrati et al. (2010) efectuaron una investigación en la que emplearon un proceso de fotocátalisis con TiO_2 para el tratamiento de efluentes generados por el sector textil. A través de bioensayos con *Daphnia magna*, los autores comprobaron que, tras el tratamiento, la toxicidad del efluente disminuía de manera notable en comparación con el agua residual inicial. Estos resultados no solo muestran la eficiencia del proceso, sino que también permiten establecer un punto de coincidencia con lo observado en nuestro propio análisis: si bien la fotocátalisis no logra eliminar por completo todos los compuestos responsables de la toxicidad, sí contribuye de forma importante a reducir sus efectos hasta niveles más seguros y manejables.

En general, los resultados muestran que la aplicación de TiO_2 en procesos fotocatalíticos representa una opción eficaz para mejorar la calidad ecotoxicológica de los efluentes industriales, ya que supera las limitaciones de los métodos convencionales y permite una disminución más significativa de los compuestos tóxicos y de los impactos negativos en los organismos acuático.

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas mediante estereoscopía de *Daphnia magna* expuesta a diferentes concentraciones del efluente tratado a 48 horas, como parte del bioensayo de ecotoxicidad realizado en el laboratorio.

Figura 16

Alteraciones en el desarrollo de la *Daphnia magna* en la concentración del control negativo frente al control positivo



Nota. Elaboración propia.

La **Figura 16** presenta una comparación visual del estado fisiológico de *Daphnia magna* expuesta al efluente sin tratar frente al control positivo, correspondiente al agua clorada. Como se puede observar, en la muestra expuesta al efluente sin tratamiento se evidencian alteraciones morfológicas notables, tales como el colapso de órganos internos y el deterioro de tejidos, lo cual indica un claro efecto tóxico agudo. Por el contrario, el organismo del control positivo mantiene una estructura íntegra, sin daños visibles, lo que confirma que las condiciones naturales del medio no generan efectos adversos.

Estos resultados guardan coherencia con lo expuesto por Serra et al. (2019), quienes demostraron experimentalmente que *Daphnia magna* actúa como un filtrador natural, cuya eficiencia para capturar partículas suspendidas varía según las condiciones del flujo del agua. Debido a este mecanismo de alimentación, el organismo se encuentra particularmente expuesto a los contaminantes que se encuentran en suspensión o adsorbidos a partículas del medio acuático. En consecuencia, las alteraciones registradas en nuestro estudio pueden interpretarse como una respuesta directa de *D. magna* frente a los compuestos tóxicos presentes en el efluente textil, reforzando su rol como bioindicador sensible de la calidad del agua.

Morris et al. (2021) demuestran que las alteraciones en la calidad del agua pueden influir directamente en la fisiología de *Daphnia magna*, afectando sus procesos de regulación osmótica. En ese sentido, cuando el efluente modifica sus características químicas, se desequilibra el gradiente osmótico del organismo y este debe realizar un esfuerzo adicional para mantener la homeostasis. Como consecuencia, estas alteraciones generan respuestas de estrés que finalmente se manifiestan como efectos tóxicos observables en los bioensayos. En esa misma línea, Bianchini y Wood (2008) explican que los procesos de osmorregulación en organismos acuáticos, aunque esenciales para mantener el equilibrio iónico, representan un elevado costo energético bajo condiciones adversas, lo que intensifica el deterioro fisiológico registrado durante las pruebas de toxicidad.

De manera similar, Núñez et al. (2023) indican que la toxicidad de las aguas residuales textiles sobre *Daphnia magna* no se explica únicamente por la presencia de compuestos químicos disueltos, sino que también intervienen factores físicos característicos de estos efluentes. Entre ellos se incluyen la acumulación de partículas de colorantes y pigmentos, que pueden dificultar la respiración de los organismos, y la formación de espuma generada por tensoactivos.

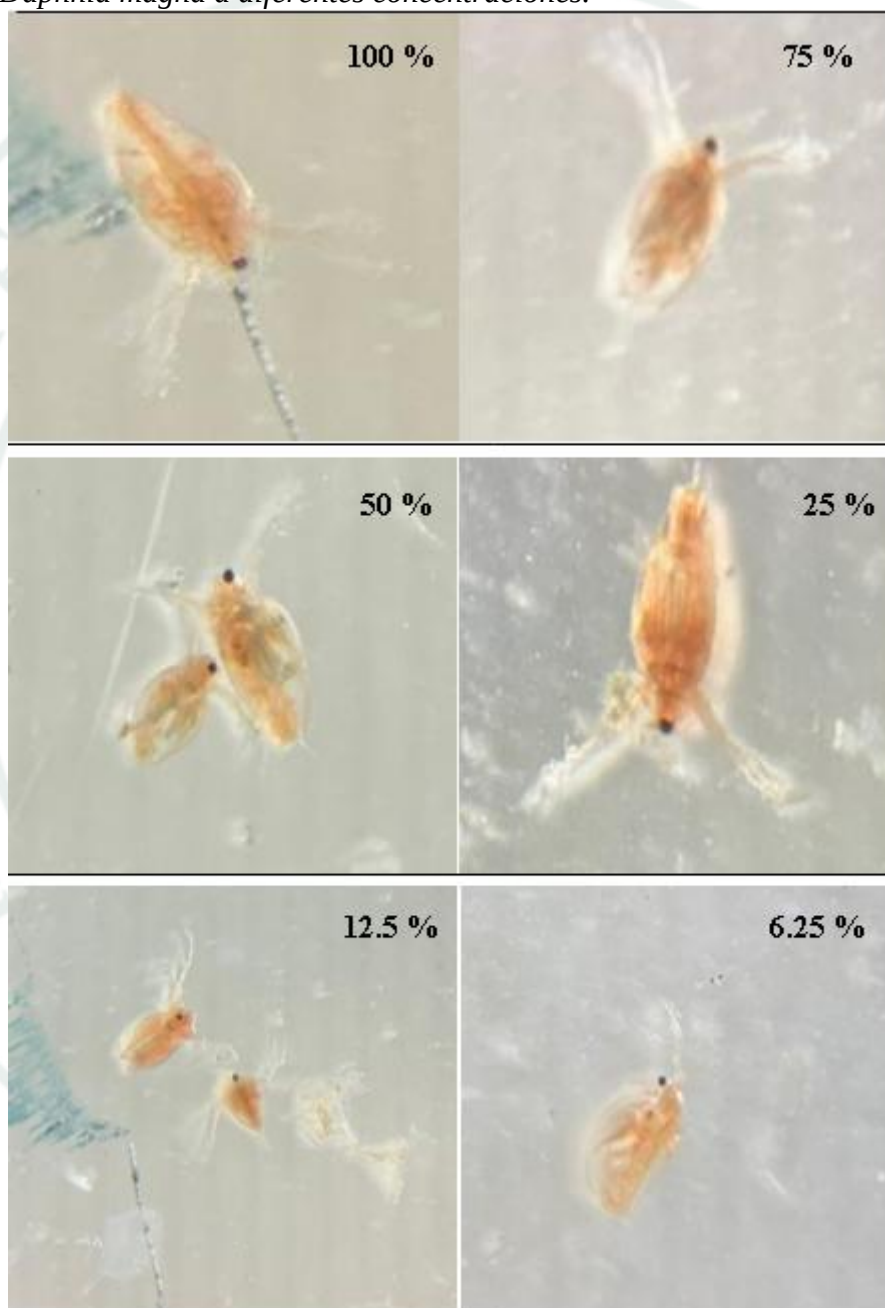
Por esta razón, las modificaciones morfológicas observadas en este estudio podrían atribuirse tanto a los contaminantes químicos de los tintes como a estos efectos físicos propios de los efluentes textiles. En consecuencia, estos resultados resaltan la importancia de evaluar tanto los efectos químicos como los físicos asociados al agua residual textil al analizar su toxicidad sobre *Daphnia magna*. Las alteraciones fisiológicas y morfológicas registradas reflejan el impacto conjunto de los distintos contaminantes presentes en estos efluentes.

A continuación, se proporcionan los resultados obtenidos en *Daphnia magna* tras su exposición a diferentes concentraciones del efluente textil tratado. De esta manera, se busca comprender cómo responde este organismo a los cambios en la calidad del agua. Además, este

análisis no solo permite evaluar la eficiencia del tratamiento aplicado, sino que igualmente ofrece una perspectiva más clara del posible impacto que estos vertimientos podrían generar en los ecosistemas acuáticos.

Figura 17

*Evaluación del efecto tóxico del agua residual textil tratada sobre *Daphnia magna* a diferentes concentraciones.*



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, al trabajar con diferentes diluciones del efluente tratado mediante fotocátalisis heterogénea como se presenta en la **Figura 17**, no se observaron alteraciones fisiológicas visibles en los organismos expuestos. Este resultado, en concordancia con el valor de CL_{50} obtenido, sugiere que el tratamiento aplicado redujo de manera significativa la toxicidad del efluente.

En este sentido, tal como señalan Persoone et al. (2003), un efluente clasificado como ligeramente tóxico no produce efectos adversos evidentes en organismos acuáticos a bajas concentraciones. Por lo tanto, la ausencia de daños estructurales en las *Daphnia magna* expuestas a las diluciones del agua tratada se encuentra dentro de lo esperable para este nivel de toxicidad.

4.3.2. Bioensayos de Ecotoxicidad con *Lactuca sativa* L.

Al finalizar el ensayo, los controles superaron el 90 %, lo que permitió confirmar no solo la viabilidad inicial de las semillas, sino también que las condiciones experimentales fueron adecuadas durante todo el proceso. Además, al considerar el comportamiento general observado frente a las distintas concentraciones del efluente tratado, se alcanzó un 98.3 %, cifra que evidencia un desarrollo sólido y homogéneo bajo las condiciones evaluadas. Estos resultados ofrecen una base confiable para interpretar los efectos del efluente tratado en el crecimiento vegetal.

En consecuencia, la **Tabla 27** presenta de manera detallada la evaluación del bioensayo realizado con *Lactuca sativa* L., mostrando cómo las semillas respondieron frente a las diversas concentraciones del efluente tratado. Gracias a estos datos, es posible apreciar con mayor claridad el buen desempeño del material biológico y el nivel de tolerancia que exhibió durante la prueba.

Tabla 27*Evaluación del bioensayo con Lactuca sativa L,*

Concentración (%)	Promedio			Elr (%)	Elh (%)	Ig (%)
	Radícula (mm) ± DE	Hipocótilo (mm) ± DE	Germinación (und) ± DE			
0%	23.12 ± 6.62	25.70 ± 5.45	60 ± 0.00	-	-	-
5%	23.03 ± 9.47	25.67 ± 10.4	60 ± 0.00	-0.38	-0.11	0
25%	18.87 ± 6.20	24.43 ± 9.88	59 ± 0.13	-18.38	-4.94	1.67
50%	16.03 ± 5.99	23.97 ± 7.46	60 ± 0.00	-30.66	-6.73	0
75%	12.58 ± 4.03	23.67 ± 10.5	60 ± 0.00	-45.58	-7.89	0
100%	10.80 ± 3.91	22.20 ± 5.77	59 ± 0.13	-53.29	-13.62	1.67
Control (-) – Agua residual textil	4.48 ± 3.34	0.78 ± 1.13	43 ± 0.45	-80.62	-96.96	28.33
S-W	0.9693	0.9796		-	-	-
Sig.	0.2386	0.5623	-	-	-	-
Levene	1.4046	1.5356	-	-	-	-
Sig.	0.2423	0.1995	-	-	-	-

Nota. Sig.: significancia estadística; DE: desviación estándar; S-W: prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad; Levene: prueba de homocedasticidad; K-W: prueba de Kruskal-Wallis.

En la **Tabla 27** se reportan los resultados del análisis toxicológico del residual tratado. Se observa que, en las concentraciones del 5 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, la germinación se mantuvo alta y prácticamente sin alteraciones, registrándose solo una ligera inhibición del 1.67 % en las concentraciones del 25 % y 100 %. Esto indica que el porcentaje de germinación se mantuvo por encima del 98.3 %, lo que sugiere que el tratamiento fotocatalítico permitió conservar elevados niveles de viabilidad en las semillas, reduciendo significativamente los efectos negativos observados en los efluentes sin tratamiento.

De igual manera, los valores obtenidos para la longitud del hipocótilo y de la radícula cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, como se detalla en el **Anexo 8**. Dado que estos supuestos fueron validados, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) paramétrico para evaluar las diferencias entre los tratamientos, cuyos resultados se detallan en el mismo anexo para su análisis detallado. En contraste, no se realizó un análisis estadístico para el porcentaje de germinación, ya que no se registró variabilidad significativa en los datos. Esta falta de variabilidad sugiere que los resultados fueron consistentes a través de

los tratamientos, lo que facilita la comparación de las proporciones de germinación entre los diferentes tratamientos

Tabla 28

ANOVA – Análisis estadístico de longitud de Radícula de Lactuca Sativa L.

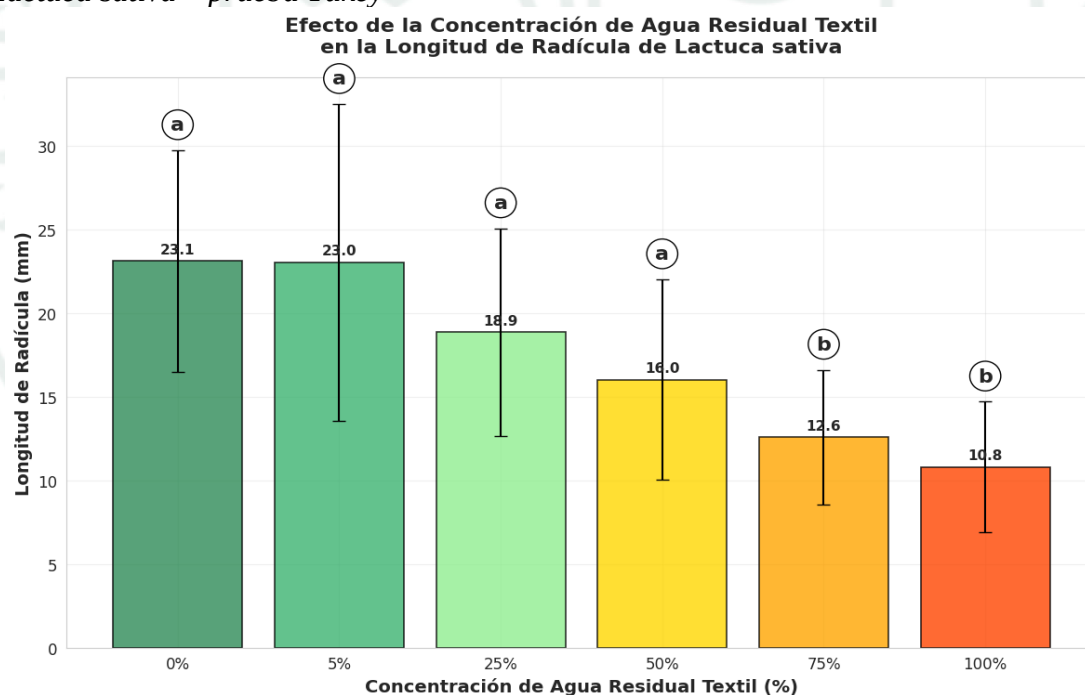
Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Razón f	Valor P
C (Concentración)	1081.9628	5	5.424406	0.000615
Residual	1675.4808	42	NaN	NaN

Nota. Elaboración propia.

La **Tabla 28** demuestra que hay diferencias significativas entre las concentraciones evaluadas ($p < 0.05$) en la longitud de la radícula. Por ello, se aplicó la prueba post-hoc de Tukey para poder identificar entre qué concentraciones específicas se presentaron dichas diferencias significativas.

Figura 18

Efecto de diferentes concentraciones del efluente tratado sobre la longitud de radícula en Lactuca sativa – prueba Tukey



Nota. Elaboración propia.

El análisis del efecto de las distintas concentraciones de agua residual textil sobre la longitud de la radícula de *Lactuca sativa L.*, reveló diferencias estadísticamente significativas (ANOVA, $p < 0.001$). Como se observa en la **Figura 18**, los grupos que comparten una misma letra no presentan diferencias significativas entre sí, conforme con los resultados de la prueba de Tukey ($p > 0.05$), lo cual se confirma en el análisis detallado presentado en el **Anexo 8**.

Los tratamientos correspondientes a las concentraciones de 0%, 5%, 25% y 50%, identificados con las letras “a” y “ab”, no presentaron diferencias significativas entre sí, mostrando longitudes promedio de radícula similares y relativamente altas. Esto sugiere que, en estas concentraciones, el efluente tratado no ejerce un efecto tóxico relevante sobre el crecimiento radicular.

En cambio, las concentraciones del 75 % y 100 %, identificadas con la letra “b”, registraron una disminución significativa en la longitud de la radícula en comparación con las concentraciones más bajas. Este cambio indica que la inhibición significativa del crecimiento radicular se manifiesta a partir del 75% de concentración, momento en el cual el efecto tóxico del efluente comienza a ser evidente.

De manera complementaria, los valores de inhibición de la elongación radicular (Elr%) refuerzan esta tendencia. Las concentraciones de 5% y 25% presentan inhibiciones mínimas (-0.38% y -18.38%), mientras que las concentraciones de 50%, 75% y 100% muestran una inhibición progresiva más marcada, con valores de -30.66%, -45.58% y -53.29%, respectivamente.

En conjunto, estos resultados demuestran que el efluente textil tratado mantiene una baja toxicidad en concentraciones moderadas, permitiendo un desarrollo radicular normal. No obstante, en concentraciones iguales o superiores al 75%, se evidencia una inhibición estadísticamente significativa del crecimiento, atribuida al incremento de la carga residual

presente en el efluente, lo que confirma un efecto fitotóxico leve a moderado en condiciones de alta concentración.

La **Tabla 29** se detallan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) realizado para la longitud del hipocótilo en *Lactuca sativa L.* A través de este análisis se examinó si las distintas concentraciones del efluente textil tratado ejercieron efectos diferenciados en el desarrollo del hipocótilo.

Tabla 29

ANOVA – Análisis estadístico de longitud de Hipocótilo de Lactuca Sativa L.

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Razón f	Valor P
C (Concentración)	70.122667	5	0.193588	0.96332
Residual	3042.699800	42	NaN	NaN

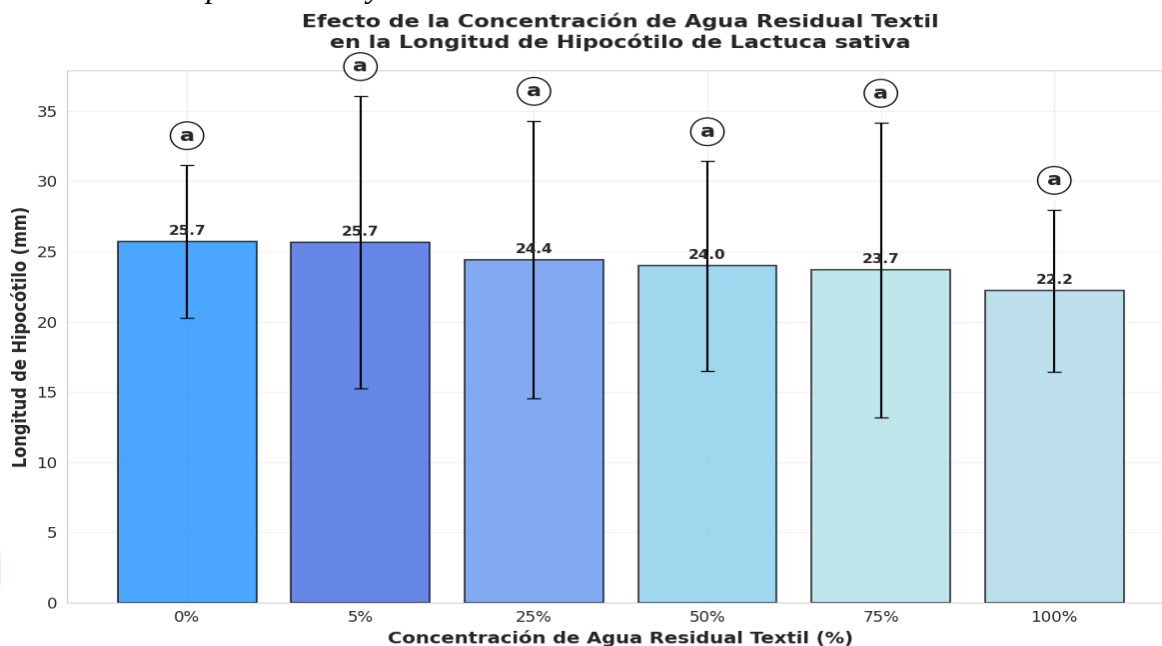
Nota. Elaboración propia.

La **Tabla 29** presenta el análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la longitud del hipocótilo de *Lactuca sativa L.* en función de las distintas concentraciones evaluadas. A partir de los resultados, se observa que el factor concentración presenta una razón F de 0.193588 y un valor p de 0.96332, el cual es considerablemente mayor al nivel de significancia convencional ($p > 0.05$). Esto indica que las variaciones en la concentración no generaron cambios estadísticamente significativos en la longitud del hipocótilo.

La **Figura 19** ilustra el efecto de las distintas concentraciones del efluente textil tratado sobre el crecimiento del hipocótilo en *Lactuca sativa L.* El análisis mediante la prueba de Tukey hizo posible determinar la existencia o ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados y evidenciar de qué manera el incremento en la concentración del efluente afectó el desarrollo del hipocótilo.

Figura 19

Efecto de diferentes concentraciones del efluente tratado sobre la longitud de Hipocótilo en Lactuca sativa – prueba Tukey



Nota. Adaptación propia.

El análisis del efecto de distintas concentraciones de agua residual textil sobre la longitud del hipocótilo de *Lactuca sativa* L. no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (ANOVA, $p > 0.05$). Tal como se aprecia en la **Figura 19**, todos los tratamientos comparten la misma letra, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre las concentraciones evaluadas (prueba de Tukey, $p > 0.05$). Estos resultados indican que el hipocótilo presenta menor sensibilidad al agua residual textil en comparación con la radícula, sin variaciones relevantes a lo largo de los tratamientos. Las longitudes promedio variaron entre 25.7 mm (0% y 5%) y 22.2 mm (100%), mostrando una ligera disminución, aunque sin significancia estadística.

Por su parte, en la **Tabla 27** los valores de inhibición de la elongación del hipocótilo (Elh%) muestran una tendencia coherente con el análisis de Tukey. A bajas concentraciones (5%) la inhibición fue prácticamente nula (-0.11%), mientras que a partir del 25% se registró una ligera disminución continua, alcanzando un valor máximo de -13.62% en la concentración

del 100%. Aunque esta disminución refleja cierto grado de sensibilidad del tejido, no representa un efecto tóxico severo, ya que el crecimiento se mantiene dentro de rangos normales.

A pesar de estas reducciones en el crecimiento radicular e hipocotilar, el desarrollo de las plántulas no se vio comprometido en su totalidad, lo que resalta la eficacia del tratamiento fotocatalítico en la mitigación de los efectos tóxicos del efluente sobre la germinación y el desarrollo temprano de *Lactuca sativa* L. En contraste, el control negativo (agua residual sin tratar) mostró un impacto fitotóxico severo, reduciendo la germinación al 43%, lo que implica una pérdida considerable de viabilidad respecto a las condiciones con agua tratada. Asimismo, se registró una inhibición severa del crecimiento radicular (-80.62 %) y del hipocótilo (-96.96 %), prácticamente impidiendo el desarrollo normal de las plántulas.

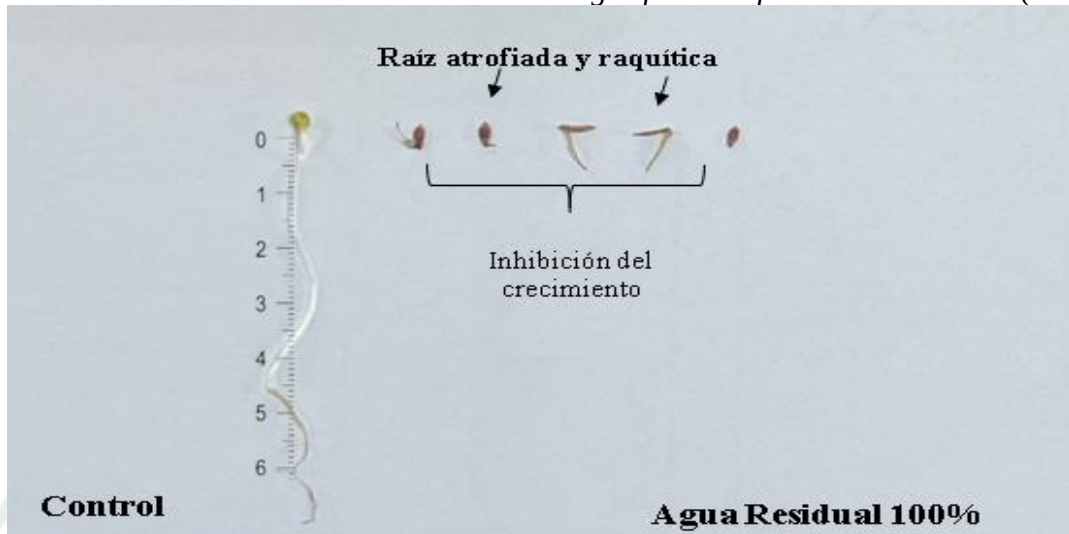
Como complemento a los resultados descritos a continuación, se exhiben imágenes representativas del desarrollo de plántulas de *Lactuca sativa* L. expuestas a distintas concentraciones del efluente textil tratado, junto con el control. Mediante esta comparación visual, es posible apreciar con mayor claridad los efectos morfológicos provocados por los diferentes tratamientos, especialmente en la raíz y el hipocótilo.

Asimismo, la exposición directa al agua sin tratar generó graves malformaciones en las plántulas, como se puede observar en la **Figura 20**, lo que evidencia un impacto altamente perjudicial sobre la estructura y morfología de las semillas germinadas.

Por otro lado, además de mantener la ausencia de toxicidad en la germinación, los tratamientos con agua residual tratada mostraron una reducción progresiva en el crecimiento radicular y del hipocótilo, tal como se observará en las **Figura 21, 22, 23 y 24**, a medida que incrementaba la concentración del efluente.

Figura 20

Anomalías en la raíz de las semillas de lechugas por la exposición al residual (100 %).



Nota. Adaptación propia.

Según Torres et al. (2019), en un estudio enfocado en la evaluación toxicológica de procesos de oxidación electroquímica, señalan que la inhibición del crecimiento vegetal puede estar asociada a elevadas concentraciones de sales disueltas, ya que estas generan potenciales hídricos muy negativos que dificultan la absorción de agua por las semillas. En el contexto de las aguas residuales textiles analizadas en la presente investigación, esta condición podría interferir en las etapas iniciales de la germinación de *Lactuca sativa* L., afectando negativamente los procesos fisiológicos necesarios para su adecuado desarrollo.

Figura 21

Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga por la exposición al efluente tratado (100 %).



Nota. Adaptación propia.

En el presente ensayo se observó que, aunque las semillas germinaron, la elongación radicular fue limitada, mientras que el hipocótilo mostró un mayor desarrollo. Esto puede atribuirse a la presencia de aluminio (Al), ya que este metal no esencial ejerce efectos fitotóxicos principalmente sobre el crecimiento radicular. La toxicidad del Al se manifiesta cuando interactúa con la membrana celular, la membrana citoplasmática y el simplasma de las células del ápice radicular, penetrando en los orgánulos subcelulares y provocando diversos efectos perjudiciales, incluyendo la reducción de los pelos radiculares, la disminución de la biomasa general y la inhibición del crecimiento de raíces y brotes. Además, altera procesos fisiológicos y bioquímicos, como la absorción de agua, generando deficiencias nutricionales que comprometen el desarrollo de la plántula (Ur Rahman et al., 2024).

Figura 22

Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga por la exposición al efluente tratado (75 %).



Nota. Adaptación propia.

En las plántulas expuestas a las mayores concentraciones del efluente tratado se evidenció la quemadura en el ápice radicular, lo que sugiere un efecto fitotóxico sobre las células meristemáticas. Este daño está asociado a metabolitos secundarios generados durante la degradación del colorante, que permanecen en el agua incluso después del tratamiento

fotocatalítico. De acuerdo con Montes et al. (2022), estos metabolitos pueden alterar procesos mitóticos en tejidos meristemáticos, induciendo estrés oxidativo y desestabilización de membranas. Dichas alteraciones comprometen la capacidad de absorción y el anclaje de la plántula.

Figura 23

Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga por la exposición al efluente tratado (50 %).



Nota. Adaptación propia.

Se evidencia que, a concentraciones superiores al 50%, persisten efectos tóxicos moderados sobre el crecimiento de *Lactuca sativa* L., particularmente en la elongación radicular e hipocotilar. Asimismo, este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de compuestos residuales en bajas concentraciones, los cuales todavía generan cierto nivel de estrés en la planta. En conjunto, los resultados indican una mejora en las condiciones del medio, evidenciando que, aunque no se elimina completamente el efecto tóxico a concentraciones elevadas, sí se logra una disminución significativa de su impacto en el desarrollo vegetal.

Figura 24

Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga por la exposición al efluente tratado (25 %).



Nota. Adaptación propia.

En este estudio, los tratamientos del 5% y 25% muestran una baja fitotoxicidad, mientras que a partir del 50% se detecta una inhibición significativa en el crecimiento.

Figura 25

Anomalías en la raíz e hipocótilo de las semillas de lechuga por la exposición al efluente tratado (5 %).



Nota. Adaptación propia.

Los resultados indican que el tratamiento fotocatalítico aplicado al efluente redujo significativamente su fitotoxicidad en comparación con el control negativo (agua residual sin tratar), permitiendo mantener una germinación del 98.3%. Este porcentaje sugiere que el efluente tratado no presenta toxicidad evidente en la germinación de las semillas, en contraste

con el agua residual sin tratar, que mostró un alto nivel de toxicidad, reduciendo significativamente la germinación y provocando anomalías en el crecimiento de las plántulas. Sin embargo, para que un residuo no sea considerado fitotóxico, los valores de El_r y El_h deberían acercarse a 0 o ser positivos, lo que indicaría ausencia de inhibición.

Los bioensayos con *Daphnia magna* y *Lactuca sativa* demostraron que el tratamiento fotocatalítico con TiO_2 mejoró significativamente la calidad ecotoxicológica del efluente textil. Asimismo, permitieron identificar las concentraciones a partir de las cuales el efluente comienza a generar efectos adversos en organismos sensibles, proporcionando una evaluación más precisa de su impacto ambiental.

Por otro lado, la presencia de efectos inhibitorios en concentraciones elevadas evidencia que aún persiste un riesgo biológico residual, lo que confirma la necesidad de evaluar no solo los parámetros fisicoquímicos, sino también los efectos sobre los organismos. Además, los bioensayos realizados con *Daphnia magna* y *Lactuca sativa* permitieron evaluar la respuesta de organismos representativos de ecosistemas acuáticos, brindando una visión más completa de la calidad del efluente tratado. Por ello, los resultados obtenidos pueden servir como base para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de criterios ecotoxicológicos que complementen los parámetros fisicoquímicos tradicionales. De esta manera, las industrias textiles no solo podrían enfocarse en cumplir con límites de DQO o color, sino también en minimizar los posibles efectos sobre los organismos y contribuir a una gestión ambiental más responsable y sostenible.

Finalmente, se propone considerar la fotocatálisis con TiO_2 como una etapa complementaria dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales textiles y, de ser necesario, combinarla con otras alternativas que permitan reducir aún más el riesgo ambiental y garantizar una mejor calidad del efluente tratado.



Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

- La caracterización fisicoquímica del efluente textil permitió identificar una serie de parámetros que evidencian su alta carga contaminante. El pH ácido (3.32), junto con elevados niveles de DBO (547.3 mg/L), DQO (1333.9 mg/L) y una absorbancia significativa, reflejan la presencia de compuestos orgánicos y colorantes recalcitrantes, complicados de remover mediante métodos tradicionales. Además, se detectó la presencia de diversos metales y elementos inorgánicos, como hierro, sodio, fósforo y zinc, en concentraciones cuantificables. Con base en estos resultados, se destaca la necesidad de aplicar tecnologías avanzadas que permitan mejorar sustancialmente la calidad del efluente antes de su vertido.
- A partir de los ensayos experimentales, se identificaron las condiciones más favorables para el proceso fotocatalítico heterogéneo con TiO_2 . La combinación de 1 g/L de catalizador, pH 3 y 240 minutos de exposición fue la que alcanzó los mayores porcentajes de remoción, logrando disminuir el color en un 98.92 % y la DQO en un 87.64 %. El análisis estadístico confirmó que la dosis de TiO_2 y el tiempo de irradiación son las variables con mayor impacto, mientras que el pH ácido contribuye a incrementar la actividad catalítica. Asimismo, los resultados indican que tiempos de exposición más largos pueden compensar concentraciones menores de catalizador, lo cual tiene implicaciones positivas en términos económicos.
- Se concluye que el tratamiento fotocatalítico heterogéneo con nanopartículas de TiO_2 permite una reducción significativa de la carga contaminante de los efluentes textiles, logrando el cumplimiento de los Valores Máximos Admisibles (D.S. N.º 010-2019-VIVIENDA). No obstante, al contrastar los resultados con estándares internacionales más exigentes como ZDHC, se evidencian limitaciones en parámetros como la DQO, la DBO_5 y el oxígeno disuelto, lo que refleja que el cumplimiento normativo nacional no garantiza necesariamente una adecuada protección ambiental. En este sentido, los resultados ponen en

evidencia vacíos en el marco normativo peruano, el cual presenta una fragmentación y se orienta principalmente al control de descargas en puntos específicos, sin incorporar un enfoque preventivo ni una gestión integral de las sustancias químicas desde su origen, a diferencia de estándares internacionales que promueven la eliminación progresiva de contaminantes peligrosos. Por ello, si bien la fotocatalisis con NPs-TiO₂ demuestra alta eficiencia en la degradación de compuestos recalcitrantes y colorantes, su implementación en contextos más exigentes requiere su integración con otros procesos de tratamiento.

- Finalmente, la evaluación ecotoxicológica del efluente tratado reveló una disminución notable en la toxicidad aguda respecto al efluente sin tratar. En los bioensayos con *Daphnia magna*, la CL₅₀ estimada a 48 horas fue de 87.12 %, lo que permitió clasificar el efluente como ligeramente tóxico. Por otro lado, las pruebas con *Lactuca sativa L.* mostraron una germinación elevada de 98.3 % en todas las concentraciones evaluadas, aunque se observó inhibición en el crecimiento radicular e hipocotilar a concentraciones superiores al 75 %. Estos resultados sugieren que, si bien el tratamiento fotocatalítico redujo significativamente los efectos tóxicos, sería recomendable considerar una dilución o un tratamiento complementario previo a su descarga, con el fin de garantizar una mínima afectación al entorno biológico receptor.
- Se sugiere implementar estudios de ciclo de vida del tratamiento fotocatalítico con TiO₂ a mayor escala, teniendo en cuenta el impacto ambiental relacionado con la producción, uso, disposición y la posibilidad de reutilización o recuperación de las nanopartículas, con el fin de garantizar una solución verdaderamente sostenible y eficiente en términos económicos y ambientales.
- Se recomienda evaluar tiempos de irradiación superiores a los estudiados en la presente investigación, con el fin de determinar el punto óptimo de operación del proceso fotocatalítico y verificar si es posible alcanzar mayores porcentajes de remoción de materia

orgánica y otros contaminantes remanentes. Asimismo, se sugiere analizar la relación entre la eficiencia obtenida y el consumo energético del sistema, considerando que periodos de exposición más prolongados podrían generar rendimientos decrecientes debido a las limitaciones cinéticas propias de la fotocatálisis heterogénea.

- Se recomienda complementar futuras investigaciones con la evaluación de posibles residuos secundarios generados durante el proceso fotocatalítico, incluyendo trazas residuales de TiO_2 , subproductos de degradación de colorantes y otros compuestos remanentes en el efluente tratado. Asimismo, se sugiere establecer estrategias de recuperación, manejo y disposición adecuada de estos residuos, con el fin de minimizar riesgos ambientales y fortalecer la sostenibilidad del tratamiento.
- Se recomienda evaluar la incorporación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como agente oxidante auxiliar, ya que su presencia podría incrementar la formación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y mejorar la eficiencia en la degradación de materia orgánica. Asimismo, integrar procesos complementarios podría optimizar la remoción de contaminantes y asegurar el cumplimiento de estándares internacionales más estrictos.
- Considerar, como línea futura de investigación, la posibilidad de aplicar el tratamiento en combinación con fuentes de energía renovables, como la luz solar en lugar de radiación UV artificial, con el objetivo de potencialmente mejorar su eficiencia energética y sostenible.
- Aunque esta investigación se realizó a escala de laboratorio, su implementación a nivel industrial requiere una evaluación técnica, especialmente en lo referente al diseño de reactores adecuados, el control de parámetros operacionales y la eficacia del sistema en condiciones reales de funcionamiento. Estas consideraciones son esenciales para adaptar eficazmente la tecnología a contextos de mayor escala.

Referencias

- Abdu, M., Babaee, S., Worku, A., Diale, P., Msagati, T. A. M., & Nure, J. F. (2025). Synthesis and optimization of TiO₂-biochar composite for degradation of Basic Blue 41 dye in textile wastewater using response surface methodology. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 114078.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114078>
- Agudelo, E., Barrios, L., Cardona, S., & Gaviria, L. (2016). Study of toxicity associated to dumping of wastewater containing dyes and pigments in the Aburrá Valley metropolitan área. *EIA*, 13(26), 61–74. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n26/n26a05.pdf>
- Aguilar, J., & Rey, O. (2021). Diseño de un sistema para el tratamiento de aguas residuales del distrito de Acomayo, en la provincia de Acomayo, región del Cusco. Cusco. Obtenido de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11790>
- Aguirre, F. (2019). Estudio de fotocatalizadores Nanoestructurados [SrAl₂O₄:LnX Y TiO₂] para la posible eliminacion deCr⁶⁺ en efluentes de teneria. Obtenido de Repositorio Interinstitucional en Ciencia y Tecnología: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1122/1/17825.pdf>
- Ahmad, R., Ahmad, Z., Khan, A. U., Mastoi, N. R., Aslam, M., & Kim, J. (2016). Photocatalytic systems as an advanced environmental remediation: Recent developments, limitations and new avenues for applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4143–4164. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.009>
- Ahumada, R. (2014). Crecimiento y Caracterización de Películas de Óxido de Zinc por “Sputtering” para su potencial aplicación en Fotocatálisis. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4125/1/1080253822.pdf>

- Alegre, Y., & Rosales, S. (2017). Influencia del Tipo de Fotocatálisis y tiempo en el Tratamiento de Aguas Residuales Textiles. Huancayo. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/05c755a6-a92f-43d7-acf8-3454ea8acabb>
- Al-Mamun, M., Kader, S., Islam, M., & Khan, M. (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- ANA. (2016). Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. LIMA. Obtenido de Plataforma del Estado Peruano: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-superficiales>
- Aquino, A. (2017). Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil Artesanal por Fotocatálisis Homogénea y Heterogénea. Huancayo. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/0da7c88c-abcf-4c40-9aab-87b6d3cfb1c1>
- Azabache, D., Campero, J., Gallardo, A., & Ramirez, A. (Marzo de 2021). Repositorio Universidad de Lima. Obtenido de ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA FIBRA: https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/13275/Azabache_Analisis-evolucion-fibra.pdf?sequence=1

- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental* <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
- Bandala, E., Blanco, J., Estrada, C., Gelover, S., Leal, T., & Malato, S. (2017). Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: Estado del arte. <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/48/48431/08cap03.pdf>
- Bermejo, M. (2018). Fotocatálisis y su capacidad descontaminante, aplicación en Gran Vía. Madrid. Obtenido de https://oa.upm.es/49612/1/TFG_Bermejo_Fernandez_Marina.pdf
- Benigno, J., Blanco, J., Cardona, A., & Malato, S. (2015). Diseño de reactores para fotocátalisis: Evaluación comparativa de las distintas opciones. Obtenido de <https://goo.su/cW7Y60>
- Bianchini, A., & Wood, C. M. (2008). Sodium uptake in different life stages of crustaceans: The water flea *Daphnia magna* Strauss. *Journal of Experimental Biology*, 211(4), 539–547. <https://doi.org/10.1242/jeb.009175>
- Botero, J., Mollinedo, P., & Nina, G. (2010). Determinación de los parámetros de fijación de colorantes ácidos y dispersos en fibras de poliamida (Nylon). [Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/17896>
- Borges, M., Sierra, M., Cuevas, E., Garcia, R., & Esparza, P. (2016). Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO₂ loaded on a natural material for wastewater treatment. *Solar Energy*, 135, 527-535. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.022>

- Brendonck, L., Philippe, C., Pinceel, T., & Thore, E. (2021). Towards improved fish tests in ecotoxicology - Efficient chronic and multi-generational testing with the killifish *Nothobranchius furzeri*. *Chemosphere*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129697>
- Bulmaro. (2020). IQR - INGENIERIA QUIMICA. Obtenido de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/reactores-de-mezcla-completa-cstr.html>
- Caballero, M., Cárdenas, P., Hermoza, E., & Uribe, C. (2020). Reúso en procesos de blanqueo textil de los efluentes provenientes de tinturas con colorantes reactivos negros decolorados mediante el método de Fenton. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 86(3).
- Cabo, S. (Septiembre de 2015). Estudio experimental de tintura de tejidos sintéticos para la preparación de muestras de referencia. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59952/Binder1.pdf?sequence=5>
- Clavijo, J. (2013). Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocátalisis con TiO_2/UV : caso azul de metileno. *Revista ELEMENTOS*, 3(3), 150-156. <https://revistas.poligran.edu.co/index.php/elementos/article/view/421/398>
- Camarena, L. (2021). “Cinética de degradación de la Bencil Penicilina en medio acuoso porC Fotocátalisis Heterogénea”. Huancayo. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/0e065068-0c84-4410-bc6c-c8e53d169a70>
- Cantero, A. (2015). Estudio de las opciones tecnológicas para la reducción fotocatalítica de CO_2 . Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90480/fichero/TFG+%28Ana+Conuelo+Cantero+Ag%C3%BCera%29.pdf+>

- Carbuloni, C., Savoia, J., Santos, J., Pereira, C., Marques, R., Ribeiro, V., & Ferrari, A. (2020). Degradation of metformin in water by TiO₂–ZrO₂ photocatalysis. *Journal of Environmental Management*, 262. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110347>
- Carriquiriborde, P. (2021). Principios de Ecotoxicología. Obtenido de https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/118183/Documento_completo_pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Castillo, C. (2019). Propuesta de mejora en el proceso de tintura de fibras textiles en poliamida. Obtenido de Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Química, Bogotá D.C.: <https://repository.uamerica.edu.co/items/3281e547-55a5-43df-9fd3-07a07af749d3>
- Chaires, I., Proal, J., Salas, H., & Zaruma, P. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: Una breve revisión. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 19, 1390–1869.
- Churata, L. (2017). “Degradación del colorante Azoico textil Naranja II por el método de Fotocatálisis Heterogénea”. Arequipa. Obtenido de Repositorio UNSA: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/c164a19e-94d4-43e1-a0cd-c1a19644e586>
- CONCYTEP. (2021). Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla. Obtenido de https://www.cdhpuebla.org.mx/micrositios/Derecho_Humano_al_Agua_y_Saneamiento/parametros.pdf
- Congreso Constituyente Democrático. (1993). *Constitución Política del Perú*. Diario Oficial El Peruano. <https://diariooficial.elperuano.pe/Normas/obtenerDocumento?idNorma=1>
- Congreso de la República del Perú. (2005). *Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente*. <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/3569-28611>

Congreso de la República del Perú. (2009). *Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos*.

<https://www.gob.pe/institucion/ana/normas-legales/229646-ley-n-29338>

Coronel, J. (2014). “Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK”. Quito. Obtenido de

<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1006/1/%E2%80%9CDise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20reactor%20tipo%20batch%20C%20Universidad%20Internacional%20SEK%E2%80%9D.pdf>

Corrales, L., & Caycedo, L. (2020). Principios físicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología. *Nova*, 18(33), 73-100. <https://doi.org/10.22490/24629448.3701>.

Cserhatia, T., Forgacs, E., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30, 953–971. https://www.researchgate.net/publication/304796434_Removal_of_synthetic_dyes_from_wastewater_a_review

Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA. (2019). Decreto Supremo que aprueba los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Dehghani, M. H., Mahdavi, P., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. K. (2016). Investigating the toxicity of acid dyes from textile effluent under UV/ZnO process using *Daphnia magna*. *Desalination and Water Treatment*, 57(51), 24359–24367. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1141327>

- Delgado, D., & Santander, N. (2017). “Remoción de coloración de tintes de teñido en Aguas Residuales de la Industria Textil utilizando Procesos de Oxidación Avanzada (POA)”. Puno. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4227>
- Díaz, P. (2023). Degradación de colorantes directos y reactivos utilizados en la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogenea. Obtenido de Universidad Federico Villareal: <https://repositorio.unfv.edu.pe/items/75540de3-260a-4db3-a5cf-8ce8069d7a1a>
- Díaz, Z. (2021). “Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil mediante Procesos de Oxidación Avanzada (O3/UV/H2O2) para su vertimiento en la red de alcantarillado”. Obtenido de Repositorio de Universidad Nacional Federico Villareal: <https://repositorio.unfv.edu.pe/items/1ea58099-7fee-4625-bf28-00adbe54d049>
- Dinno, A. (2015). Nonparametric Pairwise Multiple Comparisons in Independent Groups using Dunn’s Test. The Stata Journal, 15(1), 292-300. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1536867X1501500117>
- Estacio, A. (2020). “Análisis Comparativo de Afinidad Tintórea de Colorantes Directos Amarillo, Azul y Rojo en Fibras de Algodón, Bambú y Acetato de Celulosa”. Obtenido de Repositorio de Universidad Técnica del Norte: Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10682>
- Fernández, L. (2012). Fotodegradación oxidativa de Fenol con catalizadores TiO2- C. Análisis de la respuesta fotoquímica de la fase carbonosa. Asturias. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10261/72354>

- Fujiwara, T., Fukahori, S., Kiso, T., Myoujin, K., Nomura, Y., & Zhang, W. (2025). Ecotoxicity mitigation and biodegradability enhancement during sulfamethazine removal by a pilot-scale rotating advanced oxidation contactor equipped with TiO₂-zeolite composite sheets. *Journal of Environmental Management*, 377. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124621>
- García, G., & Ayala, C. (2024). Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de Tio₂ para el tratamiento de aguas residuales de camal. Obtenido de Repositorio Universidad Peruana Unión: <https://hdl.handle.net/20.500.12840/7843>
- García, J., & Giraldo, E. (2011). Guía didáctica para la selección preliminar del sistema de tratamiento de aguas residuales. Obtenido de Universidad Militar "Nueva Granada": <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/3639/GarciaOsorioJuliana2011.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- García, S., & Herrera, Y. (2022). Evaluación de tratamiento de aguas residuales del proceso de teñido textil de la empresa Andes Yarn mediante el método Fenton. Obtenido de Repositorio Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/90557b87-397b-4e8f-b007-f18ce1e7315e>
- Gebrati, L., Loukili Idrissi, L., Mountassir, Y., & Nejmeddine, A. (2010). Détoxification des effluents d'industrie de textile par photocatalyse [Detoxification of textile industry effluents by photocatalytic treatment]. *Environmental Technology*, 31(6), 625–632. <https://doi.org/10.1080/09593331003592253>
- Gobierno del Perú. (1969). *Ley N.º 17752, Ley General de Aguas*. <https://leyes.congreso.gob.pe/>

- González, Y., González, Y., Torres, A., Marin, D., & Castillo, J. (2020). Evaluación ecotoxicológica de los residuales del Laboratorio de Química Analítica. *Tecnología Química*, 40(2), 226-240. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222461852020000200226&lng=es&tlng=es.
- Gouda, R., Gupta, G., Halli, H., Hatti, V., Prasad, M., & Raghavendra. (2022). Chapter 7 - Scientific approaches for water resources management in developing countries. *Urban Water Crisis and Management: Strategies for Sustainable Development*, 6, 129 -147. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91838-1.00017-8>
- Guamanquispe, M. (2011). Gestión de Procesos para incrementar la capacidad de producción en el área de tinturado y acabados en la empresa textil Andelas CIA. LTDA. Obtenido de https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/799/1/Tesis_t663id.pdf
- Guillen, M., Pérez, V., Quispe, T., & Flora, H. (2020). Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa. *Scielo*, 4. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2020000400428
- Gutiérrez, M., Velasco, A., Rosales, R., Valle, B., Mugica, V., & Torres, M. (2024). Síntesis de catalizadores de hierro y cobre para la hidrogenación de nitratos en agua. *Publicación Semestral Pädi*, 153–160. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/13823>
- Hernández, I., Proal, J., Salas, H., & Zaruma, P. (2018). Textil Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 19,1390–1869. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216/1506>

- HoiBui, V., KhanhVu, T., Tungto, H., & Negishi, N. (Mayo de 2022). Application of TiO₂-ceramic/UVA photocatalyst for the photodegradation of sulfamethoxazole. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 26. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554122000213>
- Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. v., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>
- Huanca, Y. (2019). Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocátalisis heterogénea. Huancayo. Obtenido de Repositorio de Universidad Nacional del Centro del Perú: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5197/T%20010_41662828_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Huang, Z. (2016). ¿Qué son los Colorantes Sulfuros? Obtenido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-son-los-colorantes-sulfuros-zoe-huang/?originalSubdomain=es>
- Hunger, K. (2003). *Industrial dyes: Chemistry, properties, applications*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527602011>
- Ibañez, C. (2021, October 19). Tratamiento y reutilización de aguas residuales en la industria textil. <https://sigmadafclarifiers.com/tratamiento-y-reutilizacion-de-aguas-residuales-industria-textil/>
- IQR. (Noviembre de 2020). IQR - INGENIERIA QUIMICA. Obtenido de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/11/reactores-de-flujo-piston.html#:~:text=El%20reactor%20de%20flujo%20pist%C3%B3n,sea%20funci%C3%B3n%20de%20la%20posici%C3%B3n.>

- Islam, M. T., Mamun, M., Halim, A. F. M., Peila, R., & Sánchez-Ramírez, D. O. (2024). Current trends in textile wastewater treatment—bibliometric review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 19166–19184. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32454-3>
- Jegatheesan, V., Pramanik, B., Chen, J., Navaratna, D., Chang, C., & Shu, L. (2016). Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review. *Bioresour. Technology*, pp. 202-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.006>
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 6, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Khan, S., Noor, T., Iqbal, N., & Yaqoob, L. (2024). Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review. *ACS Omega*, 21751–21767. doi:<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00887>
- Korkmaz, V., Onder Erguven, G., Tanyol, M., Alatas, M., & Yildirim, N. (2022). Decolorization of Remazol Brilliant Violet 5R and Brilliant Green dyes by *Hypnum cupressiforme* using response surface methodology-central composite design methodology: toxicity assessment studies by *Daphnia magna*. *Desalination and Water Treatment*, 278, 251–262. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29082>

- Llanes, M., Pérez, G., & Mesa, Z. (2021). Colorantes más usados en el estudio de Estructuras Tisulares . Obtenido de Ciencias básicas Biomédicas den Granma: <https://cibamanz2021.sld.cu/index.php/cibamanz/cibamanz2021/paper/viewFile/465/345>
- Manickam, P., & Vijay, D. (2021). Chemical hazards in textiles. (S. S. Muthu, Ed.) Chemical Management in Textiles and Fashion, 19-52. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820494-8.00002-2>.
- Marcano, D. (2018). Introducción a la Química de los Colorantes. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencia Físicas, Matemáticas y Naturales Obtenido de: <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>.
- Marín, S. J. M., Rubiano, H. C. M., Laguna, C. W. A., & Zapata, S. C. E. (2005). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. *Gestión y Ambiente*, 8(1), 105–121. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169421171002.pdf>
- Matos, T., Martins, M. S., Henriques, R., & Goncalves, L. M. (2024). A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105624>
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental para Agua*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA, Valores Máximos Admisibles (VMA)*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/>

- Montes, A., Romero, I. D., & Herrera, J. (2022). Poder fitotóxico de *Lactuca sativa* L. como modelo biológico empleando metabolitos secundarios productos de degradación del colorante rojo ponceau. *Revista Productos Naturales*, 5(1), 8–10.
<https://doi.org/10.3407/rpn.v5i1.6717>
- Morris, A. B., Hager, H. H., Baldwin, J. A., & Arias, L. (2021). Plasticity in depth selection behavior and heat shock proteins in *Daphnia*. *Aquatic Ecology*, 55, 1171–1178.
<https://doi.org/10.1007/s10452-021-09895-w>
- Muñoz, Y., & Palomino, S. (2019). Influencia de la concentración de TiO_2 y tiempo de tratamiento en la degradación de las aguas residuales de camal por fotocátalisis heterogénea. Huancayo. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5054/T010_70040659_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Núñez, M., Moreno, M., Moscoso, N., & Velasteguí, E. (2023). Toxicidad de aguas residuales textiles en Ambato: evaluación del conocimiento de decisores. *Revista Universidad y Sociedad*, 15(2), 306–315. Recuperado de <https://zenodo.org/records/8298751/files/Toxicidad%20de%20aguas%20residuales%20textiles%20en%20Ambato%20evaluaci%C3%B3n%20del%20conocimiento%20de%20decisores.pdf>
- OECD. (2004). Test No. 202: *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2.
[doi:https://doi.org/10.1787/9789264069947-en](https://doi.org/10.1787/9789264069947-en).
- OEFA. (2014). Obtenido de Organismo de Evaluación y Fiscalización ambiental: <https://repositorio.oefa.gob.pe/server/api/core/bitstreams/ab1d9b54-4a85-494a-b058-964dc6404749/content>

- Öztekin, R., & Sponza, D. T. (2022). Photocatalytic Degradation of Polyphenols and Polyaromatic Amines in Textile Industry Wastewaters by Nano-Cerium Dioxide Doped Titanium Dioxide and the Evaluation of Acute Toxicity Assays with Microtox and *Daphnia magna*. *Journal of Biomedical Research and Environmental Sciences*, 3(8), 852-866. <https://doi.org/10.37871/jbres1524>
- Papa, E. (2018). Investigación de tintes naturales, aplicado a la lana como fibra natural. Obtenido de Universidad de la República de Uruguay: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/20274?mode=full>
- Paul, S., Banerjee, S., Ali, S. W., & Naik, S. (2026). 13 - Ethical aspects and environmental impacts of nanomaterial-based textile dyeing and printing. (S. W. Satyaranjan Bairagi, Ed.) *Nanotechnology in Textile Dyeing and Printing*, In *Micro and Nano Technologies*, 355-393. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33435-1.00008-5>.
- Pekakis, P., Xekoukopulotakis, N., & Mantzavinos, D. (2006). Treatment of textile dyehouse wastewater by TiO₂ photocatalysis. *Water Research*, 40(6), 1276-1286. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.019>
- Pereira, J. (2014). Control del proceso de teñido de las fibras de algodón. Obtenido de ALICIA: Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_8853043c7aca871a9b4e4f32b21de12e
- Persoone, G., Marsalek, B., Blinova, I., Törökne, A., Zarina, D., Manusadzianas, L., Nalecz-Jawecki, G., Tofan, L., Stepanova, N., Tothova, L., & Kolar, B. (2003). A practical and user-friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters. *Environmental Toxicology*, 18(6), 395–402. <https://doi.org/10.1002/tox.10141>
- PNUD. (2015). Obtenido de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

- Prasannamedha, G., & Senthilkumar, P. (2021). 7 - Chemical compliance and regulations in textiles and fashion,. (S. S. Muthu, Ed.) In The Textile Institute Book Series, Chemical Management in Textiles and Fashion,, 135-154. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820494-8.00007-1>.
- Poder Ejecutivo del Perú. (1990). *Decreto Legislativo N.º 613, Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales*. <https://leyes.congreso.gob.pe/>
- Ponce de León, M., & Valdivia, M. (2014). “Optimización de los Parámetros para la Curva de Teñido con Colorantes Ácidos, Reactivos y Complejo Metálico en Fibra de Alpaca”. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6a158d70-1efc-4a16-9288-e57f5bee3348/content>
- Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Blaney, L. (2022). Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. *Journal of Environmental Management*, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115295a> 316, 115295.
- Ramadan, H., Al-Shaibani, M., Radin, M., Al-Gheethi, A., Sharma, A., & Bin, M. (2022). Photocatalytic degradation of disperse azo dyes in textile wastewater using green zinc oxide nanoparticles synthesized in plant extract: A critical review. *Science Direct*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102705>
- Requejo, I. (2020). “Reducción de los parámetros fisicoquímicos mediante fotocatálisis con TiO₂ para el tratamiento de agua residual del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018”. Lima. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/item/3de8af8c-56af-40d7-aa7b-c6f49a485d95>
- Rincon, C. (2020). Estudio de Ciclo de Vida de la implementacion de un Reactor de Oxidacion Avanzada para tratamiento de Agua Residual Textil. Repositorio Institucional de la Universidad Catolica de Colombia, Bogota.

- Sa'adah, N. N., Rahmawati, S., Fathurahman, D., Atikana, A., Rahayu, A., & Fajri, J. A. (2025). Toxicity assessment of textile wastewater treated by constructed wetland augmented consortium endophytic bacteria using *Daphnia magna*; Ecological Engineering & Environmental Technology, 26(6), 57–72. <https://doi.org/10.12912/27197050/203519>
- Salas, L. S. (2024). "Síntesis y caracterización de nanopartículas de TiO_2 obtenidas por el método sol gel asistido con ácido acético". Obtenido de Repositorio UNSA: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/be44306d-265b-4928-b7bc-726463e9a345>
- Salehzadeh, J., Nassiri, M., Dehghani, Z., & Mohajeri, S. (2025). Synthesis of TiO_2 nanoparticles: Structural characterization, photocatalytic degradation of malachite green dye from aqueous solution under UV irradiation. Journal of the Indian Chemical Society, 102(10), 102059. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102059>
- Samsami, S., Mohamadizani, M., Sarrafzadeh, M., Rene, E., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. Process Safety and Environmental Protection, 138-163. Volumen 143 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>.
- Serra, T., Soler, M., Pous, N., & Colomer, J. (2019). *Daphnia magna* filtration, swimming and mortality under ammonium, nitrite, nitrate and phosphate. Science of The Total Environment, 656, 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.382>
- SINIA. (2016). Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/153.pdf>
- Sirisha, U., Sowjanya, B., Rehana, H., Punugoti, T., Mohamed, A., & Vangalapati, M. (2022). Synthesized TiO_2 nanoparticles for the application of photocatalytic degradation of synthetic toxic dye acridine orange. Materials Today: Proceedings, 62, 3444-3449. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.278>

- Subramani, K., Selva, J., Srinivasan, S., Tamilselvi, N., & Incharoensakdi, A. (2025). Hydrothermally and green synthesized TiO₂ nanoparticles with high photocatalytic textile industry dye degradation, antibacterial and antioxidant activities,. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 1017. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179068>
- Sun, H., & Liu, Y. (2024). Efficient Adsorption of Azo Dye Acid Brilliant Red on Graphite Carbon Nitride in Aqueous Solution. *ACS Omega*, 9(26), 28626–28636. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02705>
- Tan, S. N., Yuen, M. L., & Ramli, R. A. (2025). Photocatalysis of dyes: Operational parameters, mechanisms, and degradation pathway. *Green Analytical Chemistry*, 12, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2025.100230>
- Tejada, K. (2022). Ecotoxicidad aguda y riesgo ambiental del agua residual del proceso completo de curtido de pieles empleando bioindicadores acuáticos. Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/764b0bb8-90d8-465f-8888-f1f5a93543e2/content>
- Terreros, J. (2022). Análisis de la influencia de la fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales en las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja. Huancayo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11536>
- Texlimca. (2025). Certificaciones textiles: moda y sostenibilidad. <https://texlimca.com/blog/certificaciones-textiles-moda-sostenibilidad>
- Thakker, A. M., & Sun, D. (2022). Ecological application of natural biomaterial on natural fibres. *Cleaner Materials*, III, 2772-3976. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100038>.

- Ticona, K., & Tola, J. (2021). Evaluación del Proceso de Fotocatálisis Heterogénea con Tio2 para la degradación de Azul de Metileno de los efluentes de la Industria Textil en Arequipa. Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5a88631c-d252-41e0-8472-bfcd7a753d3>
- Torres, N. H., Souza, B. S., Ferreira, L. F. R., Lima, Á. S., dos Santos, G. N., & Cavalcanti, E. B. (2019). Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment. *Chemosphere*, 236, 124309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.040>
- Toribio, M. (2021). “Remoción del color de las aguas residuales del teñido de jeans usados con fotocátalisis heterogénea”. Junín. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7242>
- Ur Rahman, S., Han, J.-C., Ahmad, M., Ashraf, M. N., Khaliq, M. A., Yousaf, M., Wang, Y., Yasin, G., Nawaz, M. F., Khan, K. A., & Du, Z. (2024). Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115791. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791>
- Vargas, C., & Morillos, O. (2022). Modelo univariante para describir y pronosticar la producción mensual de alpacas en el departamento de Puno. Periodo 2002 – junio 2021. Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Recuperado de <https://vriunap.pe/fedu/upload/2022/p00000452-5-Proy.pdf>
- Vélez, M., & Villa, N. (2012). Identificación y cuantificación de Antraquinonas y Cromonas en plantas de Aloe Vera cultivadas en municipios de Risalda por Cromatografía líquida de Alta Eficiencia. Obtenido de UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, FACULTAD DE TECNOLOGÍA QUÍMICA INDUSTRIAL: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/5430894V436.pdf>

- Yuzer, B., Ciner, F., Calhan, R., Selcuk, H., & Meric, S. (2019). Investigation of inhibition effects of different sol-gel based TiO₂ nanoparticles on activated sludge and toxicity to *Daphnia magna*. *Desalination and Water Treatment*, 172, 15–20. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24973>
- Wang, H., Li, X., Zhao, X., Li, C., Song, X., Zhang, P., Huo, P., & Li, X. (2022). A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies. *Chinese Journal of Catalysis*, 43(2), 178–214. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(21\)63910-4](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)63910-4)
- Wang, Y., Qi, Q., Fan, J., Wang, W., & Yu, D. (2021). Simple and robust MXene/carbon nanotubes/cotton fabrics for textile wastewater purification via solar-driven interfacial water evaporation. *Separation and purification technology*, Volumen 254; <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117615>.
- ZDHC. (Setiembre de 2024). Road map to Zero. Obtenido de ZDHC Wastewater Guidelines Versión 2.2: <https://downloads.roadmaptozero.com/output/ZDHC-Wastewater-Guidelines>
- Zhang, T., Zhou, L., Zhou, Y., Zhang, Y., Guo, J., Han, Y., Zhang, Y., Hu, L., Jang, K. S., Spencer, R. G. M., Brookes, J. D., Dolfing, J., & Jeppesen, E. (2024). Terrestrial dissolved organic matter inputs accompanied by dissolved oxygen depletion and declining pH exacerbate CO₂ emissions from a major Chinese reservoir. *Water Research*, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121155> 251, 121155.
- Zhou, H., Wang, H., Yue, C., He, L., Li, H., Zhang, H., Yang, S., & Ma, T. (2024). Photocatalytic degradation by TiO₂-conjugated/coordination polymer heterojunction: Preparation, mechanisms, and prospects. *Applied Catalysis B: Environmental*, 344, 123605. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123605>

Anexos

Anexo 1.

Informe de caracterización de agua residual textil



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|--|
| 1.- RAZON SOCIAL | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 2.- DIRECCIÓN | : Calle Ricardo Palma 304 Urb. Simón Bolívar Jose Luis Bustamante y Rivero |
| 3.- PROYECTO | : CARACTERIZACION DE EFLUENTES |
| 4.- PROCEDENCIA | : LA PAMPA, SOCABAYA, PERU |
| 5.- SOLICITANTE | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Residual |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000000392-2025-0000 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-02-03 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 1 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-01-24 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-01-24 al 2025-02-03 |
| 6.- FECHA INFORME CON TRAZABILIDAD | : 2025-04-16 |


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 6

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 1877,
Bellavista, Callao.
Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 Lt. 02,
Castilla - Piura
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Selvalery - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-O H, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved). Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Sulfuro	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-S2- D, 24th Ed. 2023.	Sulfide. Methylene Blue Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	pH Value Electrometric Method	SIN ACREDITACION
Oxígeno Disuelto	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-O G. 24th Ed. 2023.	Oxygen (Dissolved). Membrane Electrode Method.	SIN ACREDITACION
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B. 24th Ed. 2023.	Temperature. Laboratory and Field Methods.	SIN ACREDITACION
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B. 24th Ed. 2023.	Turbidity. Nephelometric Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Metales Totales ICP-MS	Method 200.8, Revision 5.4 1994. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance: Bi, B, Ca, Ce, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Na, Nb, P, Rb, Si, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, W, Yb, Zr), 2021.	Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.	INACAL LE - 096 CHALACA

*SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

*APHA : American Public Health Association

*APHA : American Public Health Association

Pág 2 de 6

SEDE PRINCIPAL
 Av. Benavides Chacana N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 479 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-5204
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P_01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0231709.33 N:8175974.27
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Effluente Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				23-01-2025 11:50
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	547,3
Oxígeno Disuelto (**)	mg DO/L	NA	0,10	4,82
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	3,32
Temperatura (**)	(°C)	NA	0,1	21,0
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	40,60
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	43,0
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	1 333,9
Sulfuro (*)	mg/L	0,001	0,002	0,020
Metales Totales ICP-MS				
Aluminio (*)	mg/L	0,001	0,003	1,911
Antimonio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	<0,0020
Arsénico (*)	mg/L	0,00020	0,00100	0,00560
Bario (*)	mg/L	0,00008	0,00030	0,04341
Berilio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Bismuto (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Boro (*)	mg/L	0,0003	0,0010	1,7625
Cadmio (*)	mg/L	0,00010	0,00020	<0,00020
Calcio (*)	mg/L	0,001	0,004	44,521
Cerio (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág. 3 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Benavides Chusca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-5204
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P_01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0231709.33 N:8175974.27
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Efluente Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				23-01-2025 11:50
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Cesio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Cobalto (*)	mg/L	0,0005	0,0020	<0,0020
Cobre (*)	mg/L	0,00010	0,00020	0,01786
Cromo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	0,0216
Estaño (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Estroncio (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,25699
Fosforo (*)	mg/L	0,002	0,006	31,307
Galio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Germanio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hafnio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hierro (*)	mg/L	0,0010	0,0020	1,8773
Iturbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Lantano (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Litio (*)	mg/L	0,00003	0,00010	0,03103
Lutecio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Magnesio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	14,8705
Manganeso (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,03005
Mercurio (*)	mg/L	0,00033	0,000100	<0,000100
Molibdeno (*)	mg/L	0,00030	0,00100	0,00134
Niobio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niquel (*)	mg/L	0,0001	0,0004	0,0011
Plata (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág 4 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Buenavista Chusca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Castilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 479 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-5204
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P_01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0231709.33 N:8175974.27
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Efluente Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				23-01-2025 11:50
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Plomo (*)	mg/L	0,0008	0,0010	0,0011
Potasio (*)	mg/L	0,003	0,010	8,080
Rubidio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Selenio (*)	mg/L	0,001	0,002	<0,002
Silicio (*)	mg/L	0,0002	0,0007	<0,0007
Sodio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	372,5863
Talio (*)	mg/L	0,00010	0,00040	<0,00040
Tántalo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Telurio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Titanio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	0,0231
Torio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Uranio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Vanadio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	0,0114
Wolframio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Zinc (*)	mg/L	0,0001	0,0002	0,5436
Zirconio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Azufre (**)	mg/L	0,006	0,020	<0,020
Erbio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Europio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Gadolinio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Holmio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Indio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág. 5 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Buenavista Chusaca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13073

N° Id.: 0000154041

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-5204
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P_01
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0231709.33 N:8175974.27
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Efluente Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				23-01-2025 11:50
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Itrio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Neodimio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Praseodimio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Renio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Samario (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Silice (**)	mg/L	0,001	0,002	73,728
Terbio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

VII.- MODIFICACIONES A LOS INFORMES DE ENSAYO

LA MODIFICACION ES UN "SUB DIVISION" DEL INFORME DE ENSAYO ORIGINAL IE-25-2271 CON FECHA DE EMISIÓN 2025-02-03

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág 6 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Benavides Chusca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prologuación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

Anexo 2.

Resultados del tratamiento fotocatalítico para el parámetro de DQO.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-8146

N° Id.: 0000149113

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|--|
| 1.- RAZON SOCIAL | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 2.- DIRECCIÓN | : Calle Ricardo Palma 304 Urb. Simón Bolívar Jose Luis Bustamante y Rivero |
| 3.- PROYECTO | : TRATAMIENTO FOTOCATALITICO CON TIO2 |
| 4.- PROCEDENCIA | : UCSM, AREQUIPA PERU |
| 5.- SOLICITANTE | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Residual |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000001625-2025-0000 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-03-24 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 8 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-03-13 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-03-13 al 2025-03-24 |


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág. 1 de 4

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 1877,
Bellavista, Callao.
Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 648 480

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 818 843
Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 Lt. 02,
Castillo - Piura
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 723 0636
Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-8146

N° Id.: 0000149113

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

Pág 2 de 4

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chacana N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-8146

N° Id.: 0000149113

V.- RESULTADOS

ITEM				1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-19586	M-25-19587	M-25-19588	M-25-19589
CÓDIGO CLIENTE ^(*)				MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03	MUESTRA 04
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(*)				E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(*)				Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(*)				Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(*)				21-02-2025 17:10	21-02-2025 17:12	21-02-2025 17:14	21-02-2025 17:16
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	224,3	461,9	329,9	455,3

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " $\leq$ "= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " $\leq$ "= Menor que el L.D.M.

^(*)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág.3 de 4

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chelaca N° 5877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
 Ballesteros, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 480

SEDE AREQUIPA
 COOP SIOSUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa
 Telf.: (+054) 816 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Castilla - Piura
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
 Alto Salaverry - Trujillo
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-8146

N° Id.: 0000149113

ITEM				5	6	7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-19590	M-25-19591	M-25-19592	M-25-19593
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				MUESTRA 05	MUESTRA 06	MUESTRA 07	MUESTRA 08
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				21-02-2025 17:18	21-02-2025 17:20	21-02-2025 17:22	21-02-2025 17:24
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	389,3	607,2	481,7	686,4

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " $\leq$ "= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " $\leq$ "= Menor que el L.D.M.

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.4 de 4

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 1877,
Belavista, Callao.
Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
Belleza, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 646 480

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 816 843
Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
Un. San Isidro III Etapa
Mz. D3 Lt. 02,
Castilla - Piura
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Un. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-11078

N° Id.: 0000152045

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

1.- RAZON SOCIAL : DANITZA QUISPE ROSAS
2.- DIRECCIÓN : Calle Ricardo Palma 304 Urb. Simón Bolívar Jose Luis Bustamante y Rivero
3.- PROYECTO : TRATAMIENTO FOTOCATALITICO CON COTIO2
4.- PROCEDENCIA : UCSM, AREQUIPA PERU
5.- SOLICITANTE : DANITZA QUISPE ROSAS
6.- PRODUCTO : Agua Residual

II.- DATOS DEL SERVICIO

1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 0000002152-2025-0000
2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 2025-04-09

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

1.- MUESTREO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 8
3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2025-04-01
4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2025-04-01 al 2025-04-09


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 4

📍 SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 5877,
Bellevista, Callao.
Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

📍 SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
Bellevista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 646 480

📍 SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 816 843
Cel.: 932 646 642

📍 SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 Lt. 02,
Castilla - Piura
Telf.: (+011) 713 0636
Cel.: 919 475 133

📍 SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Telf.: (+011) 713 0636
Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-11078

N° Id.: 0000152045

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

Pág 2 de 4

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chacana N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-11078

N° Id.: 0000152045

V.- RESULTADOS

ITEM				1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-27939	M-25-27940	M-25-27941	M-25-27942
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				MUESTRA 09	MUESTRA 10	MUESTRA 11	MUESTRA 12
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 10:05	06-03-2025 10:07	06-03-2025 10:09	06-03-2025 10:11
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Quimica de Oxigeno (*)	mg/L	2,0	5,0	273,8	508,1	164,9	346,4

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág.3 de 4

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chacana N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prologuación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 479 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-11078

N° Id.: 0000152045

ITEM				5	6	7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-27943	M-25-27944	M-25-27945	M-25-27946
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				MUESTRA 13	MUESTRA 14	MUESTRA 15	MUESTRA 16
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465	E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 10:13	06-03-2025 10:15	06-03-2025 10:17	06-03-2025 10:19
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	333,2	405,8	607,2	633,6

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " $\leq$ " Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, " $\leq$ " Menor que el L.D.M.

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág 4 de 4

SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chusca N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zarumilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

Tabla 30*Descripción de variables según el número de muestras*

Nombre de muestra	pH	NPs de TiO ₂ (gr/L)	Tiempo (min)
Muestra 1	3	1	240
Muestra 2	3	1	120
Muestra 3	5	1	240
Muestra 4	5	1	120
Muestra 5	3	0.5	240
Muestra 6	3	0.5	120
Muestra 7	5	0.5	240
Muestra 8	5	0.5	120
Muestra 9	5	1	240
Muestra 10	5	0.5	240
Muestra 11	3	1	240
Muestra 12	5	1	120
Muestra 13	3	0.5	240
Muestra 14	3	1	120
Muestra 15	3	0.5	120
Muestra 16	5	0.5	120

Anexo 3.

Informe de caracterización final del tratamiento con mayor degradación.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

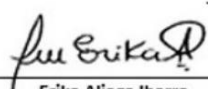
- | | |
|------------------|--|
| 1.- RAZON SOCIAL | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 2.- DIRECCIÓN | : Calle Ricardo Palma 304 Urb. Simón Bolívar Jose Luis Bustamante y Rivero |
| 3.- PROYECTO | : CARACTERIZACION FINAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS |
| 4.- PROCEDENCIA | : UCSM, AREQUIPA |
| 5.- SOLICITANTE | : DANITZA QUISPE ROSAS |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Residual |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000001415-2025-0000 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-03-24 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1.- MUESTREADO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 1 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-03-06 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-03-06 al 2025-03-24 |
| 6.- FECHA INFORME CON TRAZABILIDAD | : 2025-04-16 |


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág. 1 de 6

📍 SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 1877,
Bellavista, Callao.
Tel.: (+511) 713 0766 / 713 0636
Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

📍 SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz D2 L1 3,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

📍 SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E L1 9,
Arequipa.
Tel.: (+054) 618 643
Cel.: 932 646 642

📍 SEDE PIURA
Urb. San Isidro III Etapa
Mz. D3 L1 02,
Castilla - Piura.
Tel.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

📍 SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A L1 26,
Alto Salaverry - Trujillo
Tel.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

🌐 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-O H, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved). Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Sulfuro	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-S2- D, 24th Ed. 2023.□	Sulfide. Methylene Blue Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
Oxígeno Disuelto	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-O G. 24th Ed. 2023.	Oxygen (Dissolved). Membrane Electrode Method.	SIN ACREDITACION
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B. 24th Ed. 2023.	Turbidity. Nephelometric Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Metales Totales ICP-MS	Method 200.8, Revision 5.4 1994. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance: Bi, B, Ca, Ce, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Na, Nb, P, Rb, Si, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, W, Yb, Zr), 2021.	Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.	INACAL LE - 096 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

Pág 2 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Benavides Chusca N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-16962
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P.01 MUESTREO FINAL
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 09:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	425,7
Oxígeno Disuelto (**)	mg DO/L	NA	0,10	1,74
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	50,00
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	33,2
Sulfuro (*)	mg/L	0,001	0,002	<0,002
Metales Totales ICP-MS				
Aluminio (*)	mg/L	0,001	0,003	1,815
Antimonio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	<0,0020
Arsénico (*)	mg/L	0,00020	0,00100	0,00259
Bario (*)	mg/L	0,00008	0,00030	0,02918
Berilio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Bismuto (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Boro (*)	mg/L	0,0003	0,0010	1,1068
Cadmio (*)	mg/L	0,00010	0,00020	<0,00020
Calcio (*)	mg/L	0,001	0,004	52,096
Cerio (*)	mg/L	0,003	0,010	<0,010
Cesio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Cobalto (*)	mg/L	0,0005	0,0020	<0,0020
Cobre (*)	mg/L	0,00010	0,00020	0,01046
Cromo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	0,0146
Estaño (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA.

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado.

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág.3 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Benavides Chusca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Casilla - Piura.
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+01) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-16962
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P.01 MUESTREO FINAL
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 09:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Estroncio (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,40245
Fosforo (*)	mg/L	0,002	0,006	1,968
Galio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Germanio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hafnio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Hierro (*)	mg/L	0,0010	0,0020	2,6590
Iterbio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Lantano (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Litio (*)	mg/L	0,00003	0,00010	0,02565
Lutecio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Magnesio (*)	mg/L	0,0006	0,0020	18,7563
Manganeso (*)	mg/L	0,00002	0,00005	0,04320
Mercurio (*)	mg/L	0,000033	0,000100	<0,000100
Molibdeno (*)	mg/L	0,00030	0,00100	<0,00100
Niobio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Niquel (*)	mg/L	0,0001	0,0004	0,0076
Plata (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Plomo (*)	mg/L	0,0008	0,0010	0,0015
Potasio (*)	mg/L	0,003	0,010	8,946
Rubidio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Selenio (*)	mg/L	0,001	0,002	<0,002
Silicio (*)	mg/L	0,0002	0,0007	25,4423

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág 4 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Buenavista Chusaca N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Casilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 479 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-16962
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P.01 MUESTREO FINAL
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 09:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Sodio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	681,6979
Talio (*)	mg/L	0,00010	0,00040	<0,00040
Tántalo (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Telurio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Titanio (*)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Torio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Uranio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Vanadio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	0,0079
Wolframio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Zinc (*)	mg/L	0,0001	0,0002	0,7806
Zirconio (*)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Azufre (**)	mg/L	0,006	0,020	<0,020
Erbio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Europio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Gadolinio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Holmio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Indio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Itrio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Neodimio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Praseodimio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Renio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003
Samario (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág. 5 de 6

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Burela Chispa N° 1877,
 Belavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Belavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Cañilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-13018

N° Id.: 0000153985

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-16962
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				P.01 MUESTREO FINAL
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0227762 N:8184465
PRODUCTO ^(A)				Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)				Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-03-2025 09:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Silice (**)	mg/L	0,001	0,002	54,519
Terbio (**)	mg/L	0,0001	0,0003	<0,0003

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI. - OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

VII. - MODIFICACIONES A LOS INFORMES DE ENSAYO

LA MODIFICACION ES UN "SUB DIVISION" DEL INFORME DE ENSAYO ORIGINAL IE-25-7127 CON FECHA DE EMISIÓN 2025-03-24

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág 6 de 6

📍 SEDE PRINCIPAL
 Av. Banderita Chispa N° 1877,
 Bellavista, Callao.
 Telf.: (+511) 713 0756 / 713 0636
 Cel.: 977 516 675 / 937 111 379

📍 SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zaramilla Mz D2 Lt 3,
 Bellavista, Callao.
 Cel.: 977 516 675 / 932 646 460

📍 SEDE AREQUIPA
 COOP SIDGUR Mz. E Lt. 9,
 Arequipa.
 Telf.: (+054) 616 843
 Cel.: 932 646 642

📍 SEDE PIURA
 Urb. San Isidro III Etapa
 Mz. D3 Lt. 02,
 Casilla - Piura.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

📍 SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A Lt. 28,
 Alto Salaverry - Trujillo.
 Telf.: (+011) 713 0636
 Cel.: 919 475 133

🌐 www.alab.com.pe

Anexo 4.

Análisis espectral de 647nm y muestras

I.Efluente textil inicial



II. Barrido espectral (205–1100 nm), lo que permitió identificar la longitud de onda máxima de absorción del efluente textil, ubicada en 647 nm.



III.Medición de absorbancia de las muestras a diferentes condiciones.

Fijo_20_02_2025_10:07:18

1 / 1

20-feb.-2025 11:15 a. m.

N.º serie del instrumento: 9A5A013005

Nombre del método: Fijo 20-feb.-2025

Modelo instrumento: GENESYS 150

Método creado: 20-feb.-2025 10:06 a. m.

Versión de paquete de software: 2.6

Firma:

Método actualizado: 20-feb.-2025 10:06 a. m.

Fijo: parámetros de método"

Ecuación : Resultados = ABS(647)x1

$\lambda 1$: 647nm

F_1 : 1,000

Ejemplo	ABS(647)	Resultados (-)
Blanco		
Agua Destilada	0,000	0,000
Agua Textil	0,557	0,557
Muestra 1	0,008	0,008
Muestra 2	0,023	0,023
Muestra 3	0,020	0,020
Muestra 4	0,084	0,084
Muestra 5	0,052	0,052
Muestra 6	0,107	0,107
Muestra 7	0,072	0,072
Muestra 8	0,108	0,108

Ejemplo	ABS(647)	Resultados (-)
Blanco		
Agua Destilada	0,000	0,000
Agua Textil	0,557	0,557
Muestra 9	0,028	0,028
Muestra 10	0,077	0,077
Muestra 11	0,006	0,006
Muestra 12	0,080	0,080
Muestra 13	0,051	0,051
Muestra 14	0,025	0,025
Muestra 15	0,101	0,101
Muestra 16	0,101	0,101

Fijo_20_02_2025_9:41:16

1 / 1

20-feb.-2025 09:52 a. m.

N.º serie del instrumento: 9A5A013005

Nombre del método: Fijo 20-feb.-2025

Modelo instrumento: GENESYS 150

Método creado: 20-feb.-2025 09:40 a. m.

Versión de paquete de software: 2.6

Firma:

Método actualizado: 20-feb.-2025 09:40 a. m.

Fijo: parámetros de método"

Ecuación : Resultados = ABS(647)x1

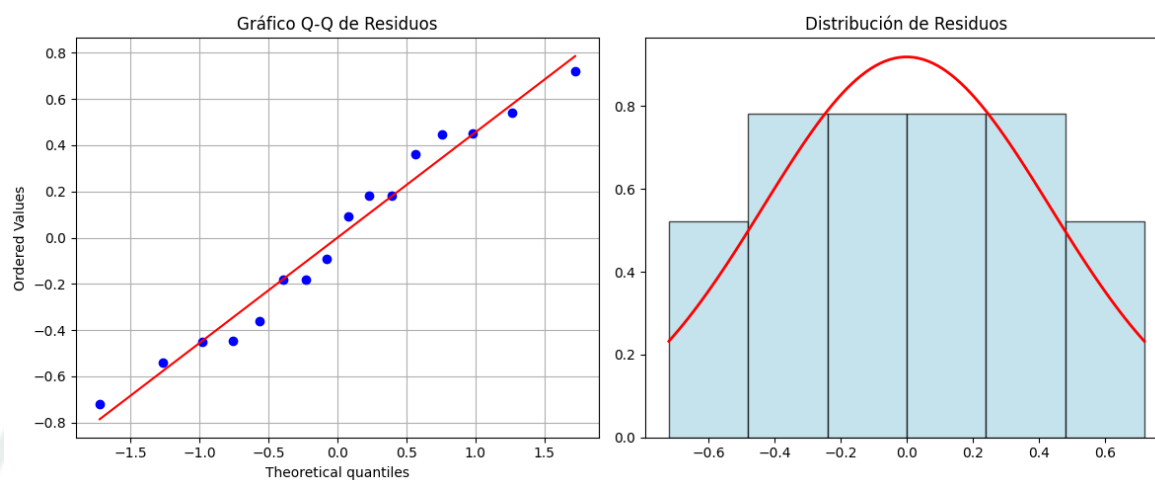
$\lambda 1$: 647nm

F_1 : 1,000

Anexo 5.

Análisis estadístico de Absorbancia.

I. Prueba de normalidad de residuos de Shapiro-Wilk y homocedasticidad Levene:



Shapiro-Wilk: $p = 0.6837$

Normalidad ACEPTADA - Puedes usar ANOVA paramétrico

2. ANÁLISIS DE HOMOCEDASTICIDAD

Tiempo: $p = 0.8371$

Concentración: $p = 0.9274$

pH: $p = 0.4472$

Interpretación:

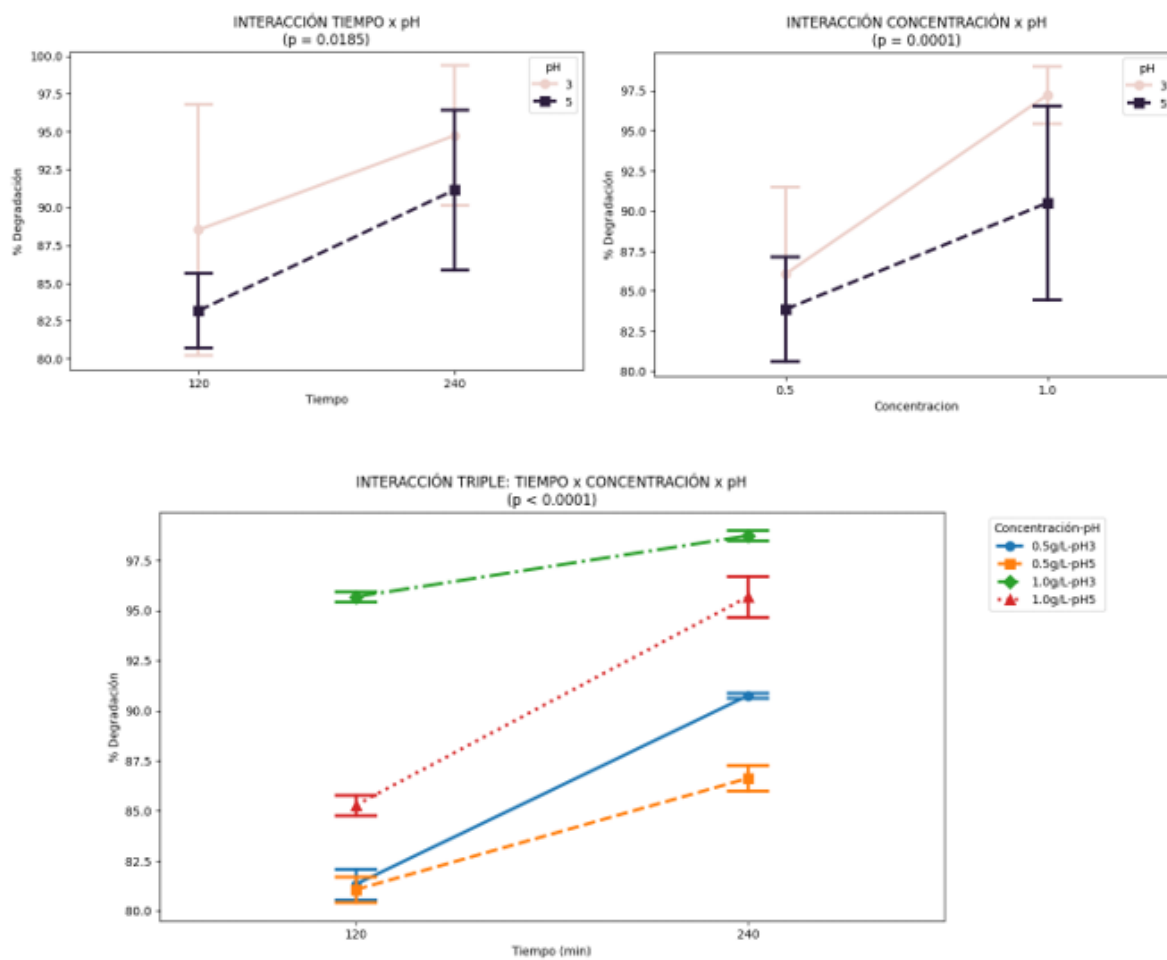
$p > 0.05 \rightarrow$ Varianzas iguales (Homocedasticidad)

$p < 0.05 \rightarrow$ Varianzas diferentes (Heterocedasticidad)

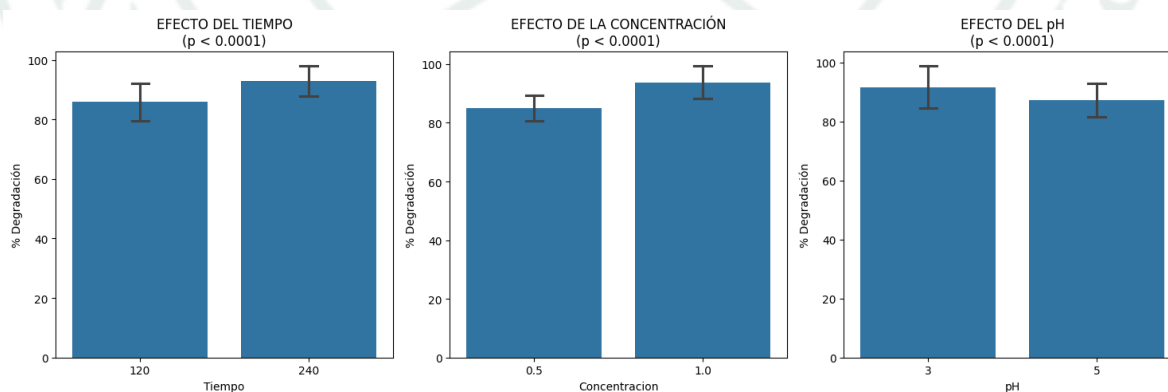
II. ANOVA

3. ANOVA DE TRES VÍAS

	sum_sq	df	F	PR(>F)
Tiempo	202.279506	1.0	572.614090	9.910041e-09
Concentracion	317.463306	1.0	898.677111	1.663206e-09
Tiempo:Concentracion	0.581406	1.0	1.645848	2.354421e-01
pH	79.700256	1.0	225.615983	3.812809e-07
Tiempo:pH	3.071256	1.0	8.694131	1.846570e-02
Concentracion:pH	20.543556	1.0	58.154827	6.153789e-05
Tiempo:Concentracion:pH	31.444056	1.0	89.012031	1.308486e-05
Residual	2.826050	8.0	NaN	NaN

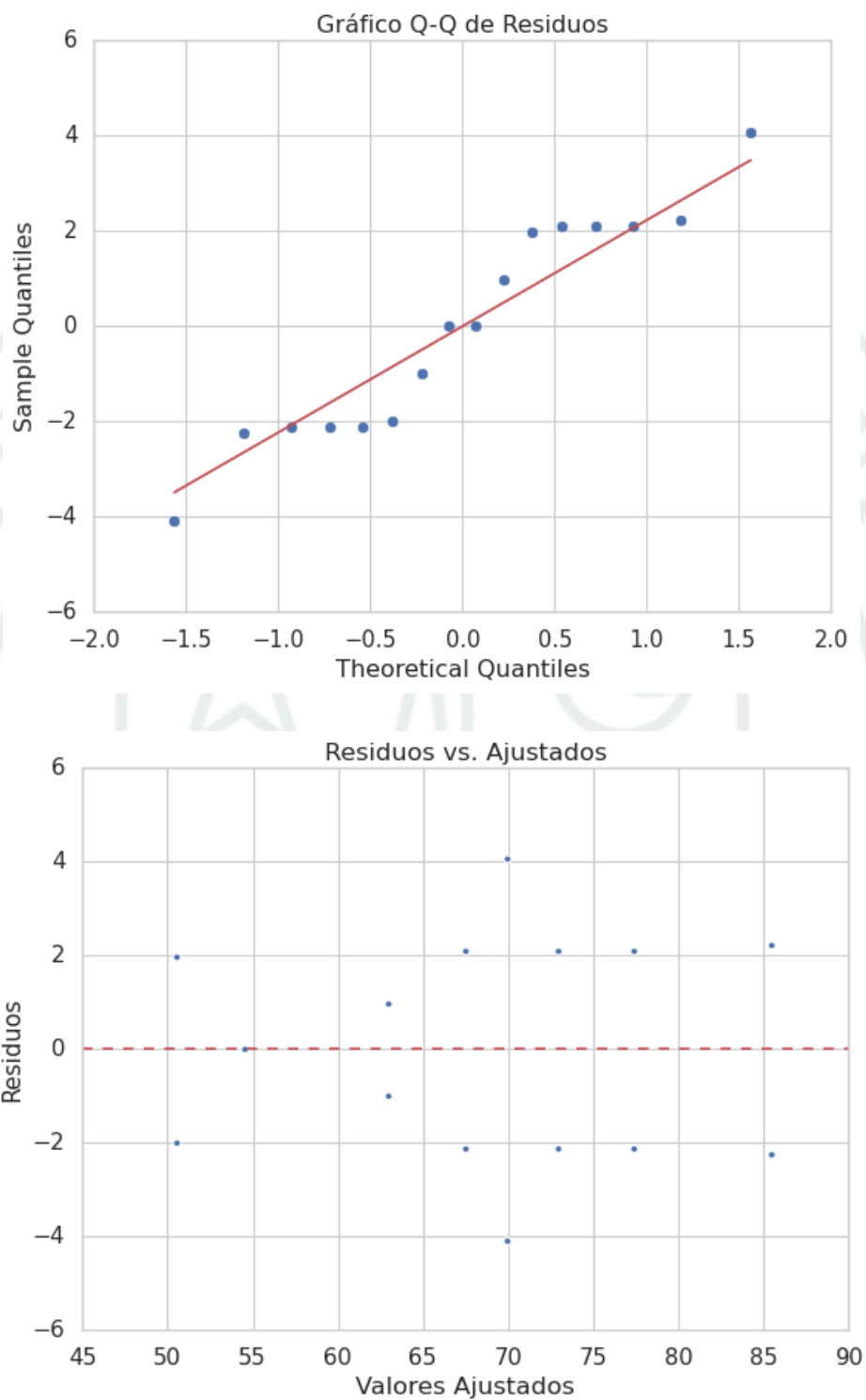


III. Efecto de degradación del Tiempo, Concentración y pH.

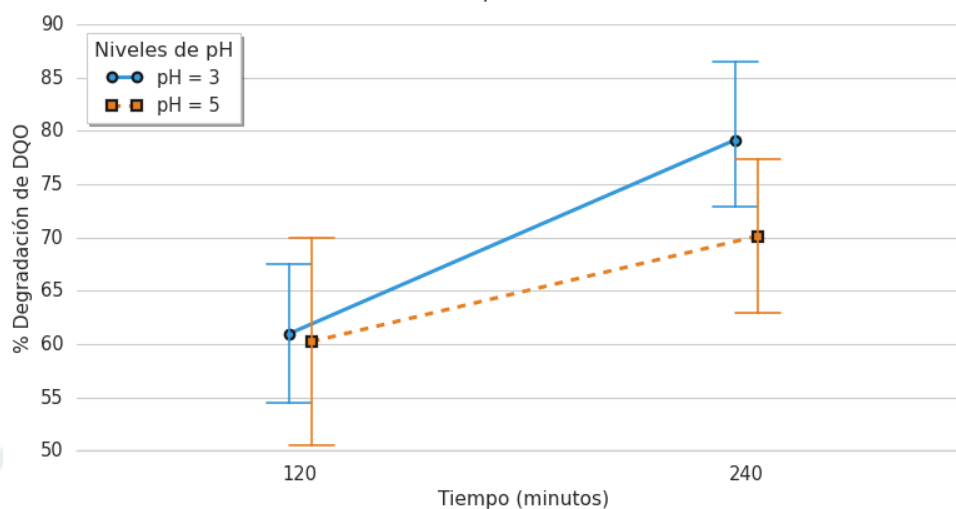


Anexo 6. Análisis estadístico de DQO.

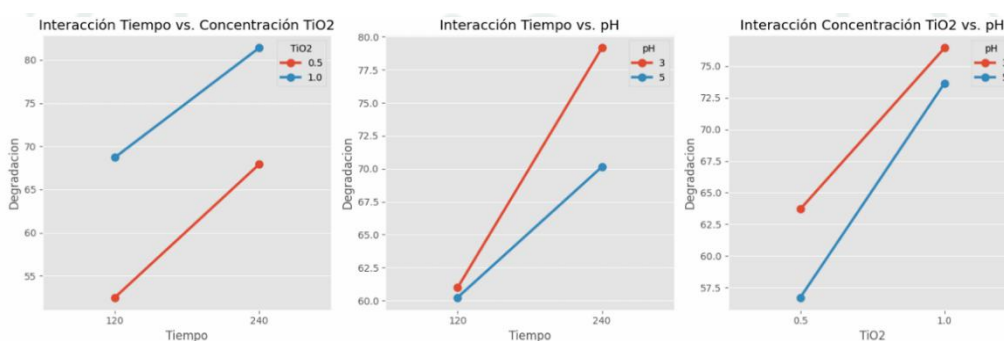
I. Prueba de normalidad de residuos de Shapiro-Wilk:



Interacción Tiempo - pH en la Degradación de DQO
(ANOVA: p-valor = 0.030)



Prueba de Shapiro-Wilk para normalidad de residuos:
Estadístico W = 0.9281, p-valor = 0.2277



II. ANOVA

Tabla ANOVA con Interacción Triple:

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tiempo)	788.767225	1.0	79.289324	0.000020
C(TiO2)	881.793025	1.0	88.640566	0.000013
C(pH)	95.452900	1.0	9.595221	0.014719
C(Tiempo):C(TiO2)	7.452900	1.0	0.749189	0.411937
C(Tiempo):C(pH)	68.641225	1.0	6.900029	0.030329
C(TiO2):C(pH)	17.682025	1.0	1.777452	0.219177
C(Tiempo):C(TiO2):C(pH)	4.972900	1.0	0.499891	0.499621
Residual	79.583700	8.0	NaN	NaN

Interacción significativa detectada: C(Tiempo):C(pH)

III. Prueba post-hoc Tukey

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05

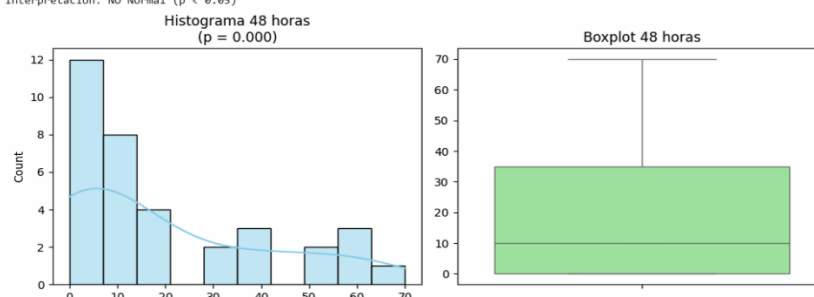
group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_120_TiO2_0.5_pH_5	-3.96	0.8926	-16.4408	8.5208	False
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_120_TiO2_1.0_pH_3	12.995	0.0407	0.5142	25.4758	True
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_120_TiO2_1.0_pH_5	15.47	0.0156	2.9892	27.9508	True
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_0.5_pH_3	18.435	0.0053	5.9542	30.9158	True
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_0.5_pH_5	8.42	0.2549	-4.0608	20.9008	False
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_3	30.93	0.0001	18.4492	43.4108	True
T_120_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_5	22.89	0.0013	10.4092	35.3708	True
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_120_TiO2_1.0_pH_3	16.955	0.009	4.4742	29.4358	True
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_120_TiO2_1.0_pH_5	19.43	0.0038	6.9492	31.9108	True
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_0.5_pH_3	22.395	0.0015	9.9142	34.8758	True
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_0.5_pH_5	12.38	0.0521	-0.1008	24.8608	False
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_3	34.89	0.0001	22.4092	47.3708	True
T_120_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_5	26.85	0.0004	14.3692	39.3308	True
T_120_TiO2_1.0_pH_3	T_120_TiO2_1.0_pH_5	2.475	0.9893	-10.0058	14.9558	False
T_120_TiO2_1.0_pH_3	T_240_TiO2_0.5_pH_3	5.44	0.6763	-7.0408	17.9208	False
T_120_TiO2_1.0_pH_3	T_240_TiO2_0.5_pH_5	-4.575	0.8132	-17.0558	7.9058	False
T_120_TiO2_1.0_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_3	17.935	0.0064	5.4542	30.4158	True
T_120_TiO2_1.0_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_5	9.895	0.1425	-2.5858	22.3758	False
T_120_TiO2_1.0_pH_5	T_240_TiO2_0.5_pH_3	2.965	0.9719	-9.5158	15.4458	False
T_120_TiO2_1.0_pH_5	T_240_TiO2_0.5_pH_5	-7.05	0.4192	-19.5308	5.4308	False
T_120_TiO2_1.0_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_3	15.46	0.0156	2.9792	27.9408	True
T_120_TiO2_1.0_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_5	7.42	0.3687	-5.0608	19.9008	False
T_240_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_0.5_pH_5	-10.015	0.1357	-22.4958	2.4658	False
T_240_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_3	12.495	0.0497	0.0142	24.9758	True
T_240_TiO2_0.5_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_5	4.455	0.8302	-8.0258	16.9358	False
T_240_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_3	22.51	0.0014	10.0292	34.9908	True
T_240_TiO2_0.5_pH_5	T_240_TiO2_1.0_pH_5	14.47	0.0228	1.9892	26.9508	True
T_240_TiO2_1.0_pH_3	T_240_TiO2_1.0_pH_5	-8.04	0.2942	-20.5208	4.4408	False

Anexo 7. Análisis estadístico de ecotoxicidad de *Daphnia magna*.

I. Análisis de Normalidad y Homocedasticidad

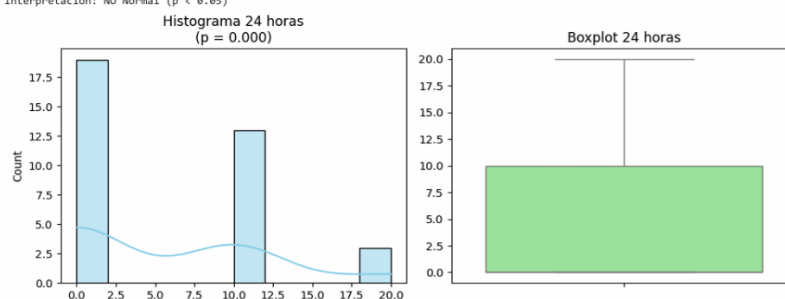
--- Resultados Shapiro-Wilk para 48 horas ---
Estadístico (W): 0.8308

p-valor: 0.0001
Interpretación: NO Normal ($p < 0.05$)



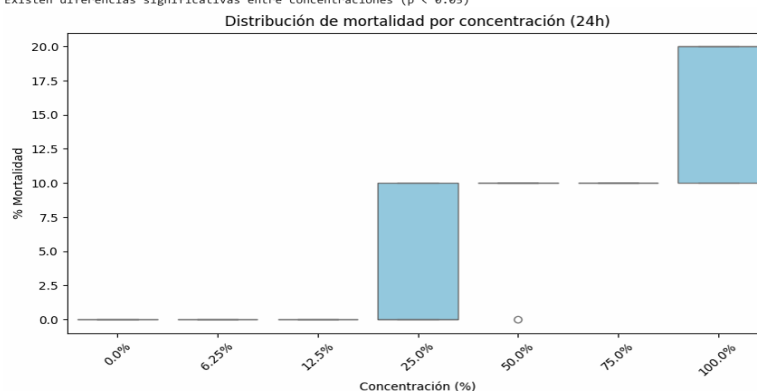
--- Análisis de normalidad (Shapiro-Wilk) como referencia ---

--- Resultados Shapiro-Wilk para 24 horas ---
Estadístico (W): 0.7329
p-valor: 0.0000
Interpretación: NO Normal ($p < 0.05$)



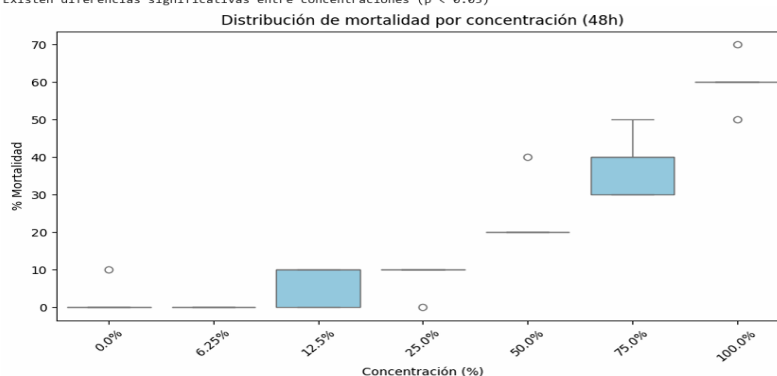
--- Kruskal-Wallis para 24h ---

Estadístico H: 26.8909
p-valor: 0.0002
Existen diferencias significativas entre concentraciones ($p < 0.05$)



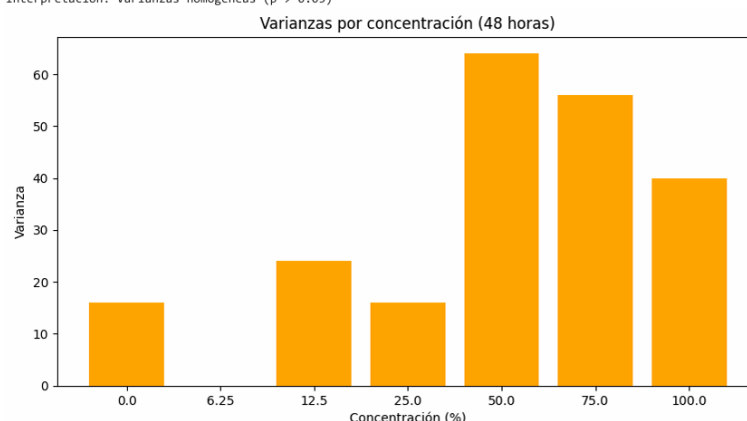
--- Kruskal-Wallis para 48h ---

Estadístico H: 30.6564
p-valor: 0.0000
Existen diferencias significativas entre concentraciones ($p < 0.05$)



II. Prueba de Kruskal-Wallis

--- Test de Levene para 48 horas ---
 Estadístico: 0.6349
 p-valor: 0.7012
 Interpretación: Varianzas homogéneas ($p > 0.05$)



III. Prueba post-hoc de Dunn-Holm

--- Dunn para 24h ---

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.366231	0.097907	0.006338
2	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.366231	0.097907	0.006338
3	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.366231	0.097907	0.006338
4	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.185336
5	0.366231	0.366231	0.366231	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
6	0.097907	0.097907	0.097907	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
7	0.006338	0.006338	0.006338	0.185336	1.000000	1.000000	1.000000

--- Dunn para 48h ---

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.231832	0.043648	0.002157
2	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.099792	0.016343	0.000587
3	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.859595	0.231832	0.021709
4	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.469261	0.055996
5	0.231832	0.099792	0.859595	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
6	0.043648	0.016343	0.231832	0.469261	1.000000	1.000000	1.000000
7	0.002157	0.000587	0.021709	0.055996	1.000000	1.000000	1.000000

IV. Análisis Probit de CL50

Generalized Linear Model Regression Results

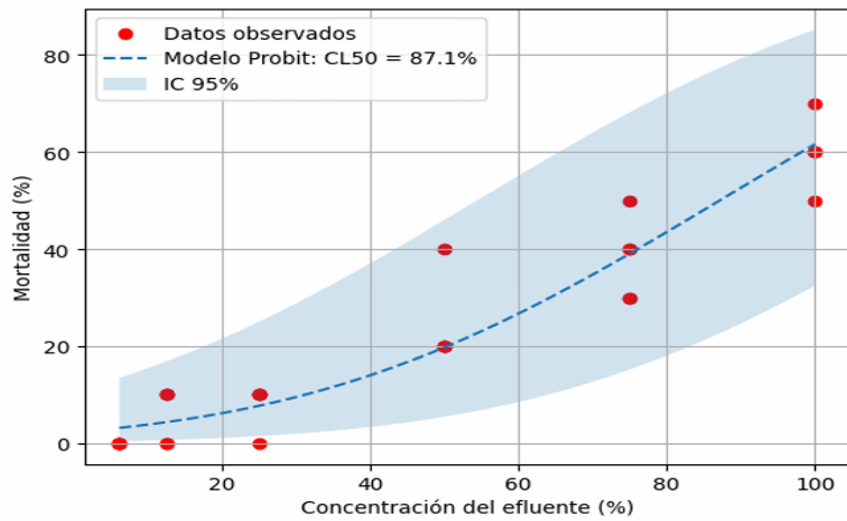
```

=====
Dep. Variable:          ['y1', 'y2']      No. Observations:          30
Model:                  GLM                Df Residuals:             28
Model Family:           Binomial           Df Model:                  1
Link Function:          probit              Scale:                    1.0000
Method:                 IRLS               Log-Likelihood:          -32.925
Date:                   Wed, 09 Apr 2025    Deviance:                 12.865
Time:                   00:22:52           Pearson chi2:             10.7
No. Iterations:         6                  Pseudo R-squ. (CS):      0.9247
Covariance Type:        nonrobust
=====

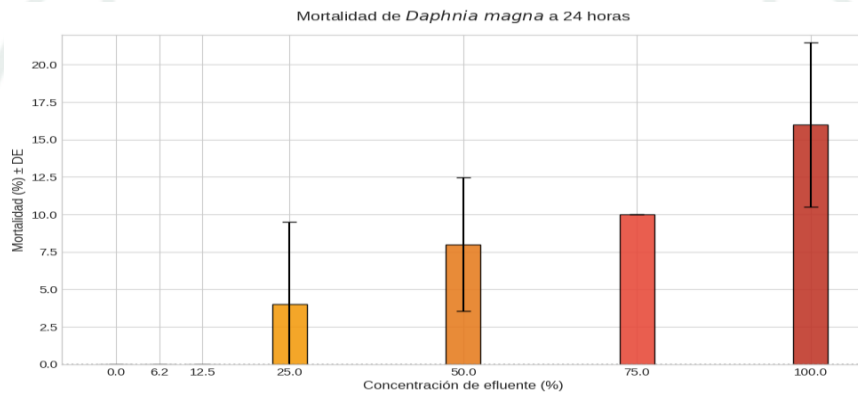
```

	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
const	-1.9973	0.194	-10.310	0.000	-2.377	-1.618
concentracion	0.0229	0.003	8.066	0.000	0.017	0.028

CL50 (Probit): 87.12%



V. Representación gráfica Mortalidad de *Daphnia magna* tras 24 horas de exposición a diferentes concentraciones de efluente tratado mediante fotocatalisis.



Anexo 8. Análisis estadístico de ecotoxicidad de *Lactuca Sativa L.*

I. Análisis de supuestos de Normalidad y Homocedasticidad de Radícula

=====

Residuos calculados:

- Número de residuos: 48
- Media de residuos: -0.0000 (debe ser ~0)
- Desviación estándar: 5.9706

=====

PRUEBA DE NORMALIDAD - SHAPIRO-WILK

=====

RESULTADOS SHAPIRO-WILK:

- Estadístico W = 0.9693
- Valor p = 0.2386

✓ CONCLUSIÓN: Los residuos siguen distribución normal ($p > 0.05$)

=====

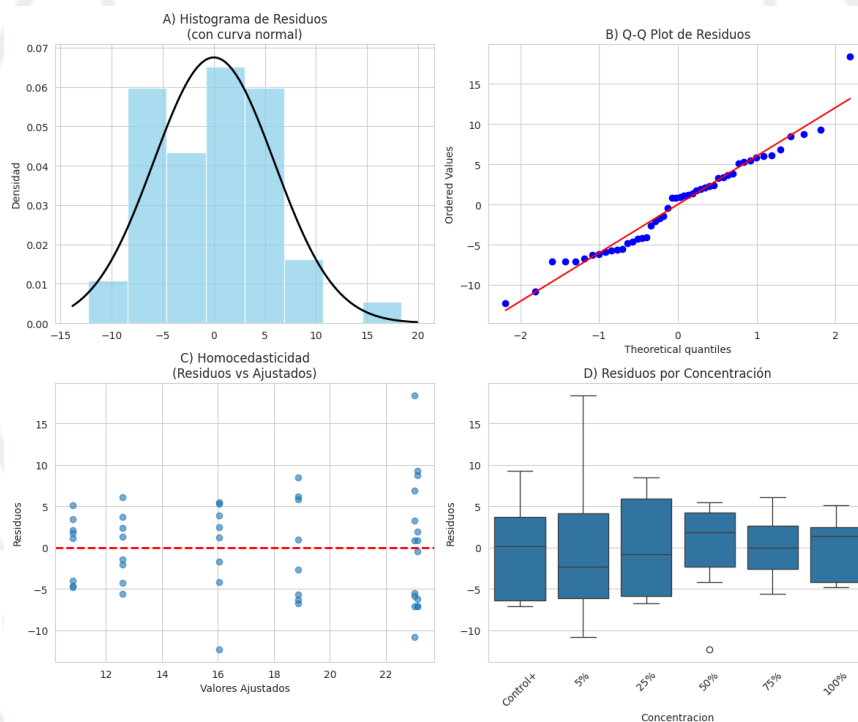
PRUEBA DE HOMOCEDASTICIDAD - LEVENE

=====

RESULTADOS LEVENE:

- Estadístico F = 1.4046
- Valor p = 0.2423

✓ CONCLUSIÓN: Hay homocedasticidad (varianzas iguales, $p > 0.05$)



II. Análisis de supuestos de Normalidad y Homocedasticidad de Hipocótilo

```
=====
Residuos calculados:
• Número de residuos: 48
• Media de residuos: -0.0000 (debe ser ~0)
• Desviación estándar: 5.9706

=====
PRUEBA DE NORMALIDAD - SHAPIRO-WILK
=====
RESULTADOS SHAPIRO-WILK:
• Estadístico W = 0.9693
• Valor p = 0.2386
✓ CONCLUSIÓN: Los residuos siguen distribución normal (p > 0.05)

=====
PRUEBA DE HOMOCEDASTICIDAD - LEVENE
=====
RESULTADOS LEVENE:
• Estadístico F = 1.4046
• Valor p = 0.2423
✓ CONCLUSIÓN: Hay homocedasticidad (varianzas iguales, p > 0.05)
```

III. ANOVA y Post-hoc Tukey – Longitud de Radícula e Hipocótilo

```
=====
ANOVA - LONGITUD DE RADÍCULA
=====
RESULTADOS ANOVA RADÍCULA:
• F = 5.4244
• Valor p = 0.0006
✓ CONCLUSIÓN: Hay diferencias significativas entre concentraciones (p < 0.05)

TABLA ANOVA COMPLETA - RADÍCULA:
      sum_sq    df      F      PR(>F)
C(Concentracion) 1081.9628    5.0  5.424406  0.000615
Residual          1675.4808   42.0      NaN      NaN

=====
PRUEBA POST-HOC TUKEY - RADÍCULA
=====
Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05
=====
group1 group2 meandiff p-adj  lower  upper  reject
-----
0%      100%   -12.32  0.0043 -21.7475 -2.8925  True
0%      25%    -4.25  0.758  -13.6775  5.1775  False
0%       5%    -0.09  1.0   -9.5175  9.3375  False
0%      50%    -7.09  0.2396 -16.5175  2.3375  False
0%      75%   -10.54  0.0205 -19.9675 -1.1125  True
100%    25%     8.07  0.1315 -1.3575  17.4975  False
100%     5%    12.23  0.0047  2.8025  21.6575  True
100%    50%     5.23  0.5674 -4.1975  14.6575  False
100%    75%     1.78  0.9928 -7.6475  11.2075  False
25%     5%     4.16  0.7739 -5.2675  13.5875  False
25%    50%    -2.84  0.9445 -12.2675  6.5875  False
25%    75%    -6.29  0.364  -15.7175  3.1375  False
5%      50%    -7.0  0.252  -16.4275  2.4275  False
5%      75%   -10.45  0.0221 -19.8775 -1.0225  True
50%     75%    -3.45  0.8816 -12.8775  5.9775  False
=====
```

ANOVA - LONGITUD DE HIPOCÓTILO

RESULTADOS ANOVA HIPOCÓTILO:

- F = 0.1936
- Valor p = 0.9633

✗ CONCLUSIÓN: NO hay diferencias significativas entre concentraciones ($p > 0.05$)

TABLA ANOVA COMPLETA - HIPOCÓTILO:

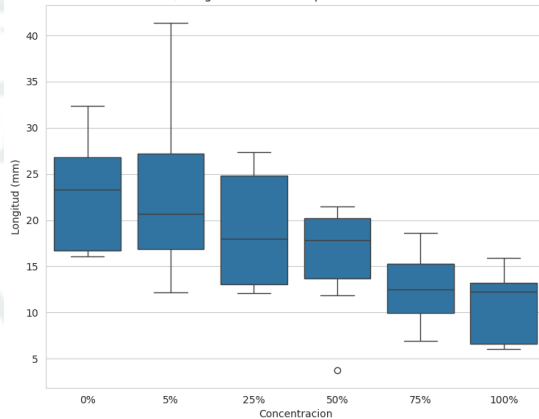
	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Concentracion)	70.122667	5.0	0.193588	0.96332
Residual	3042.699800	42.0	NaN	NaN

PRUEBA POST-HOC TUKEY - HIPOCÓTILO

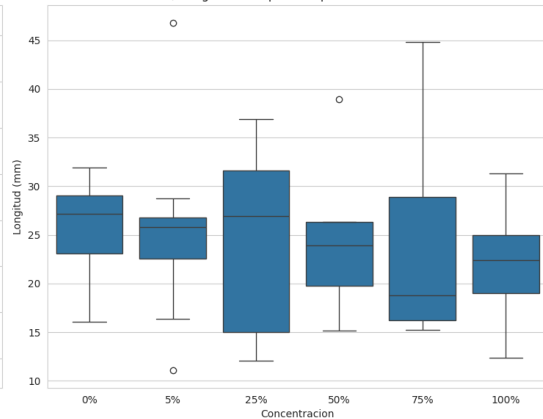
Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05

group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
0%	100%	-3.5	0.9617	-16.2044	9.2044	False
0%	25%	-1.27	0.9997	-13.9744	11.4344	False
0%	5%	-0.03	1.0	-12.7344	12.6744	False
0%	50%	-1.73	0.9985	-14.4344	10.9744	False
0%	75%	-2.03	0.9967	-14.7344	10.6744	False
100%	25%	2.23	0.9949	-10.4744	14.9344	False
100%	5%	3.47	0.9631	-9.2344	16.1744	False
100%	50%	1.77	0.9983	-10.9344	14.4744	False
100%	75%	1.47	0.9993	-11.2344	14.1744	False
25%	5%	1.24	0.9997	-11.4644	13.9444	False
25%	50%	-0.46	1.0	-13.1644	12.2444	False
25%	75%	-0.76	1.0	-13.4644	11.9444	False
5%	50%	-1.7	0.9986	-14.4044	11.0044	False
5%	75%	-2.0	0.9969	-14.7044	10.7044	False
50%	75%	-0.3	1.0	-13.0044	12.4044	False

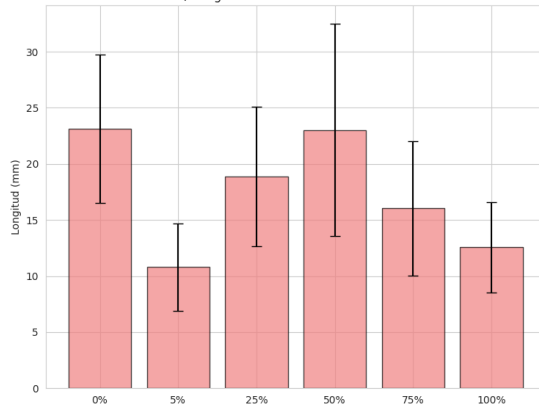
A) Longitud de Radícula por Concentración



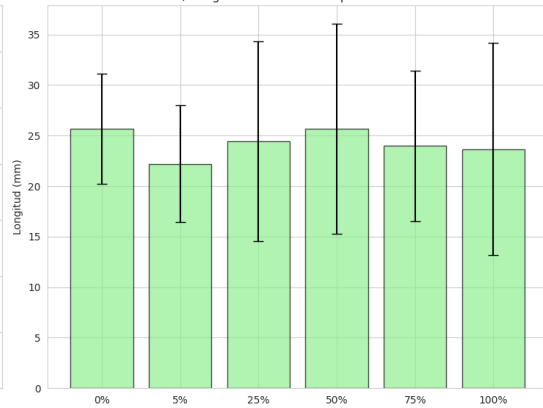
B) Longitud de Hipocótilo por Concentración



C) Longitud Promedio de Radícula ± DE

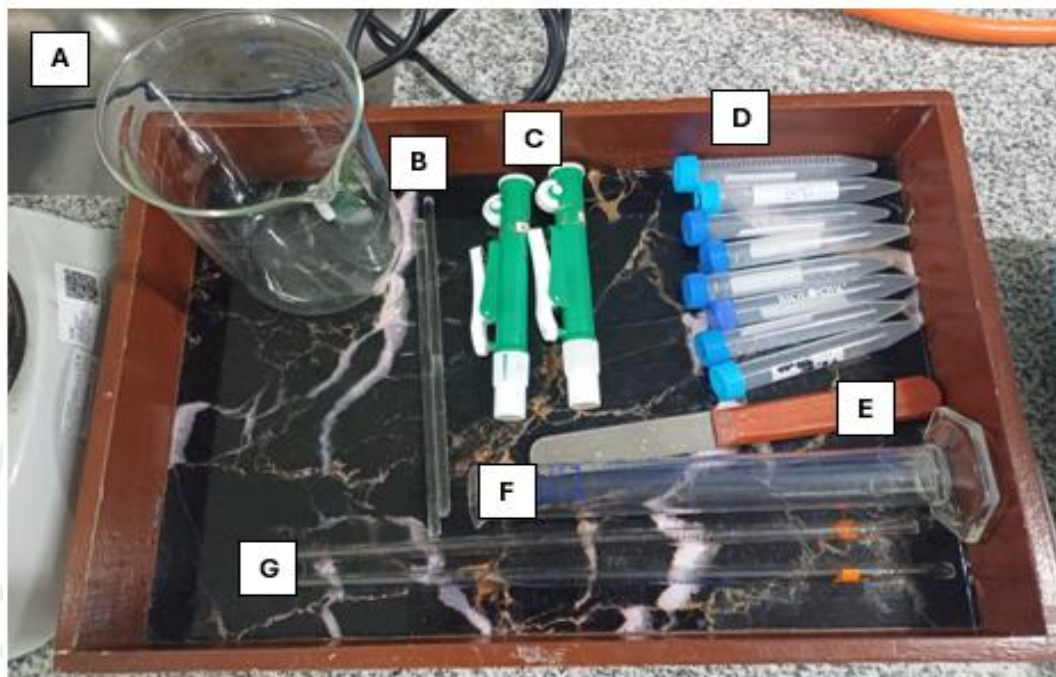


D) Longitud Promedio de Hipocótilo ± DE

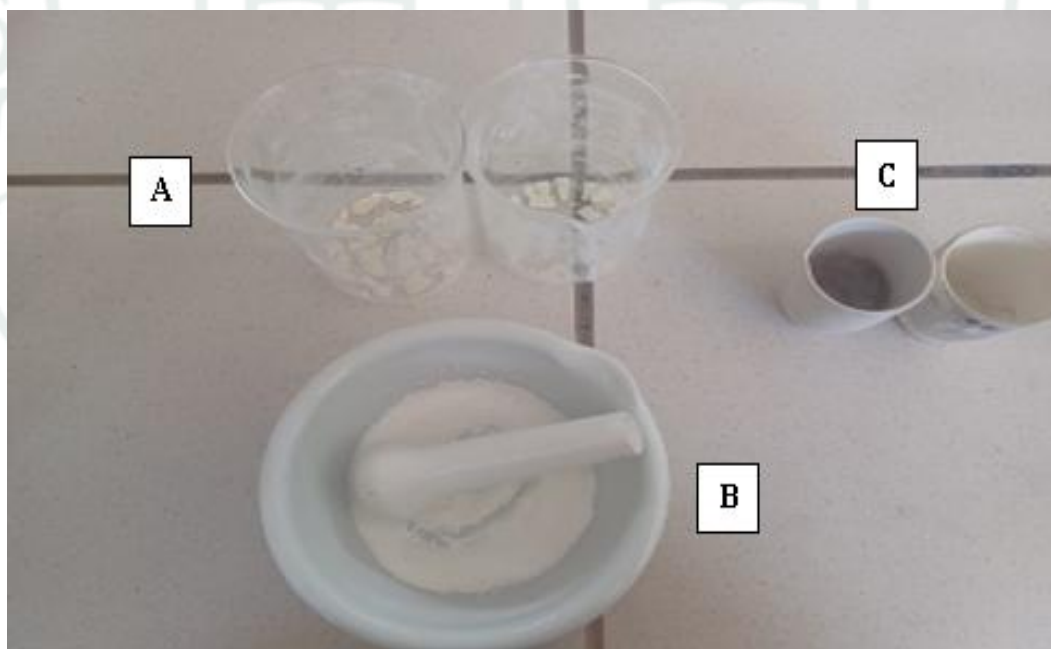


Anexo 9. Materiales, Reactivos y Equipos utilizados en el experimento.

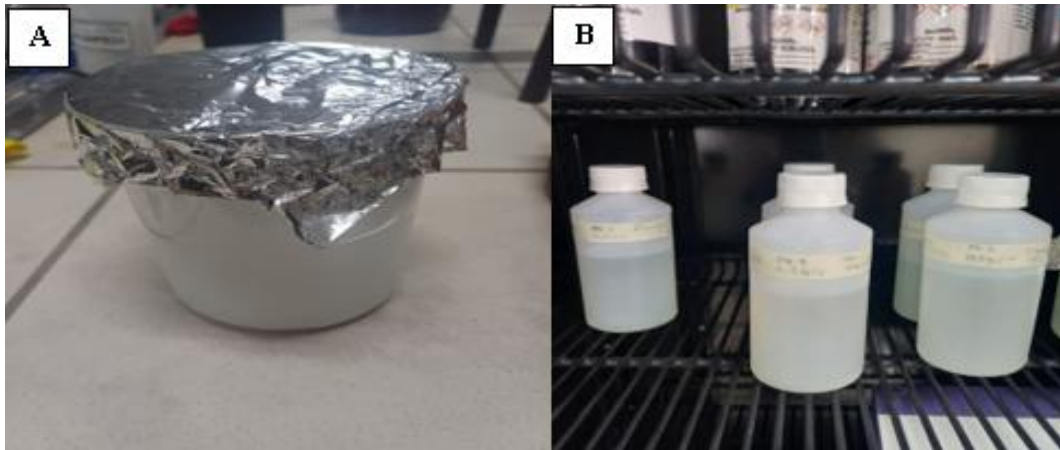
I. Materiales usados durante el ensayo



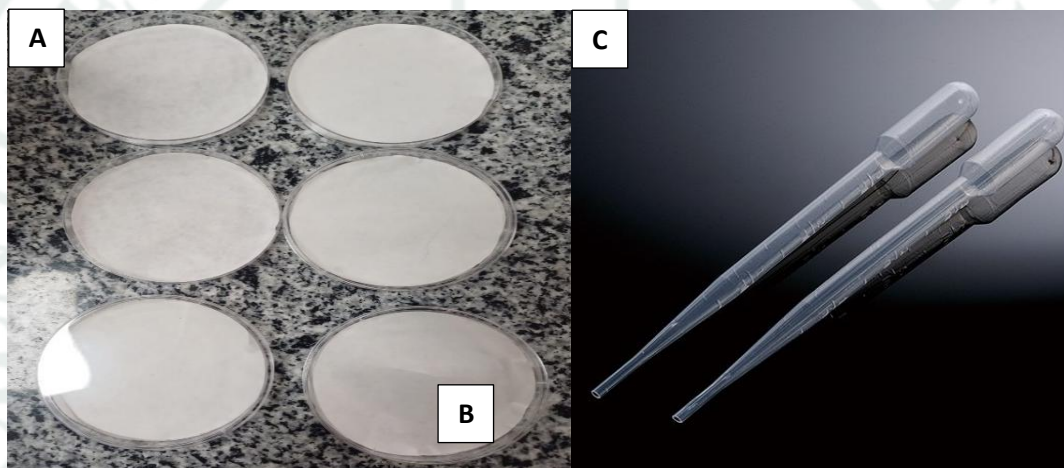
(A) Vaso precipitado 1 LT (B) Varilla de vidrio (C) Propipetas (D) Tubos Falcon para centrifugación (E) Espátula (F) Probeta (G) Pipeta



(A) Vaso precipitado 250 ml (B) Mortero (C) Crisol de porcelana



A) Papel aluminio (B) Botellas de plástico



(A) Placas Petri (B) Papel filtro (C) Pipeta Pasteur



A) Papel milimetrado

II. Reactivos usados durante el ensayo



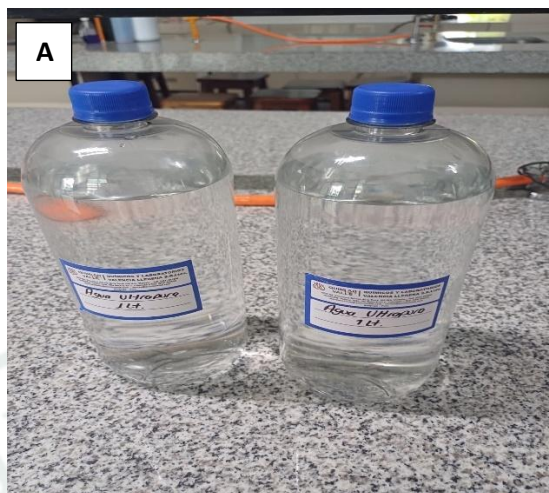
A) Isopropóxido de titanio



A) Ácido acético glacial



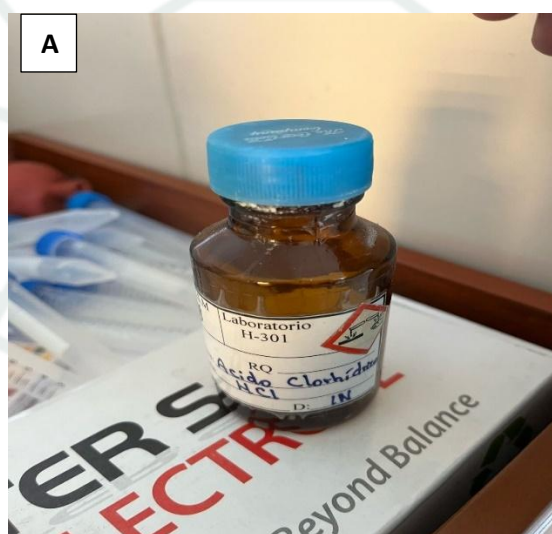
A) Ácido sulfúrico



A) Agua ultrapura

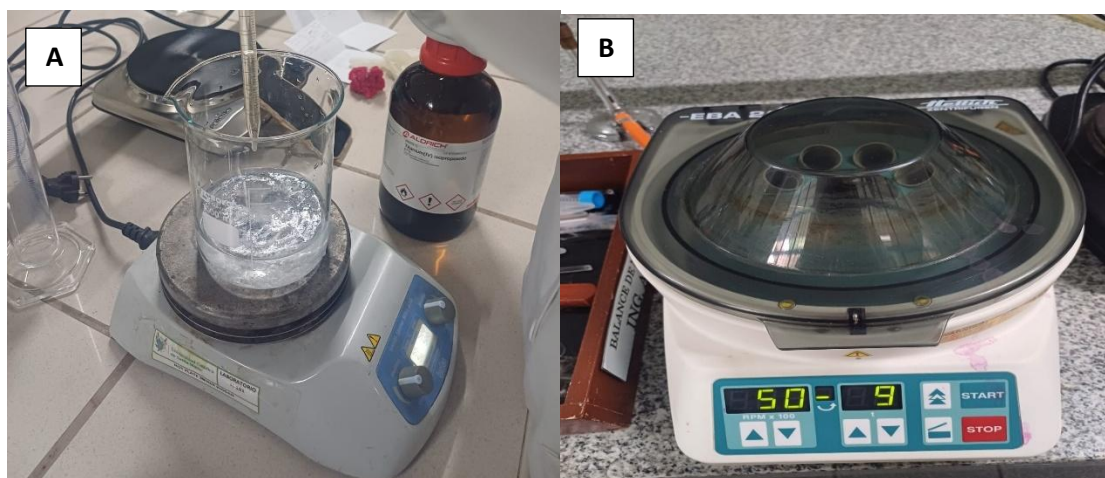


A) Hidróxido de sodio

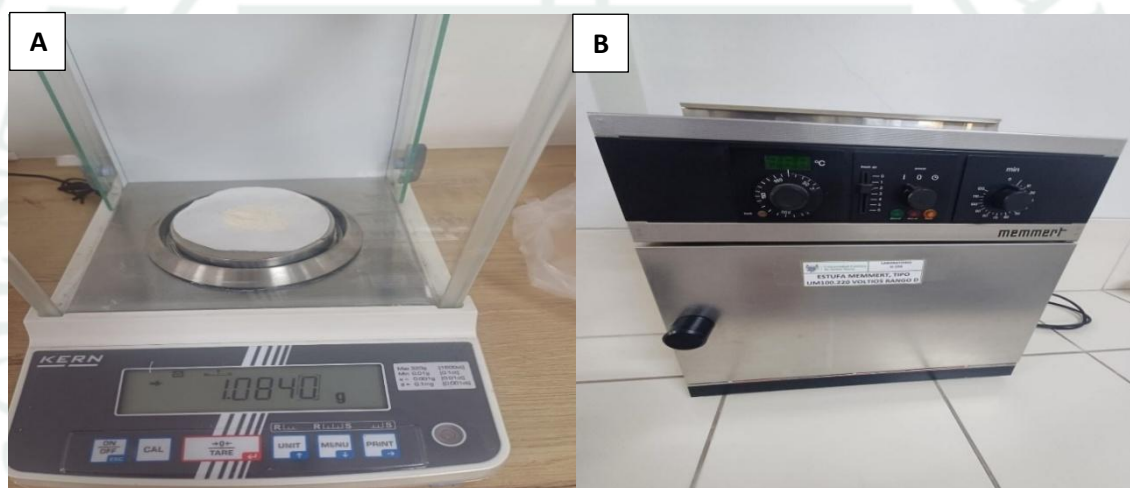


A) Ácido clorhídrico

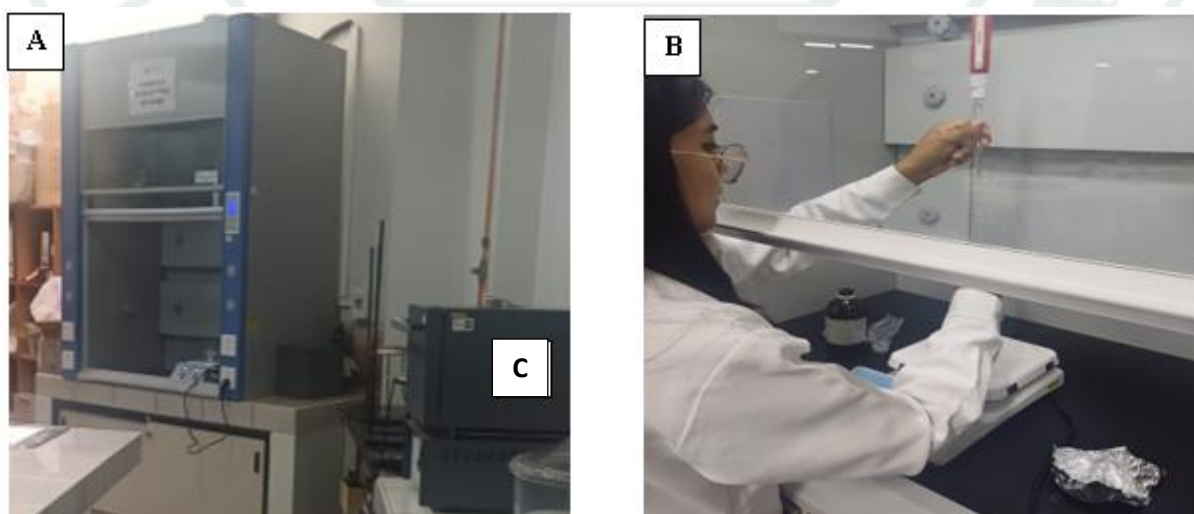
III. Equipos usados durante el ensayo



(A) Agitador Magnético (B) Centrifugadora



(A) Balanza analítica (B) Estufa memmert



(A, B) Campana extractora (C) Mufla



(A) Lampara UV (B) Bomba de pecera de 2.5 watts



(A) Espectrofotómetro (B) pHmetro



(A) Estereoscopio

Anexo 10. Ficha Técnica del Isopropóxido de Titanio.

Sigma-Aldrich

3855 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

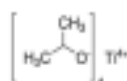
Email USA: techserv@sigmaaldrich.com

Outside USA: eurtechserv@sigmaaldrich.com

Product Specification

Product Name:
Titanium(IV) Isopropoxide - 97%

Product Number: 205273
CAS Number: 546-68-9
Formula: C₁₂H₂₈O₄Ti
Formula Weight: 284,22 g/mol



TEST	Specification
Color Test	≤ 25 APHA
at Time of Manufacturing	
Specific Gravity	0.950 - 0.960
at 25/25°C	
Freezing Point	17.5 - 19.5 °C
At Time of Manufacturing	
Infrared Spectrum	Conforms to Structure
Miscellaneous Assay	27.5 - 28.3 %
as TiO ₂	
Chloride (Cl)	≤ 65 ppm
Note	Confirmed
Product of Dorf Ketal	

Specification: PRE0.ZQ5.10000021642

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.



Anexo 11. Ficha de datos de seguridad del Isopropóxido de Titanio.

www.sigmaaldrich.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo al Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 6.8
Fecha de revisión 15.06.2023
Fecha de impresión 14.03.2025
GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : Titanium(IV) isopropoxide

Referencia : 205273
Marca : Aldrich
REACH No. : 01-2119967389-17-XXXX
No. CAS : 546-68-9

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.
3050 SPRUCE ST
ST. LOUIS MO 63103
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765
Fax : +1 800 325-5052

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008
Líquidos inflamables (Categoría 3), H226
Iritación ocular (Categoría 2), H319
Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema nervioso central, H336

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Aldrich- 205273

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Página 1 de 12

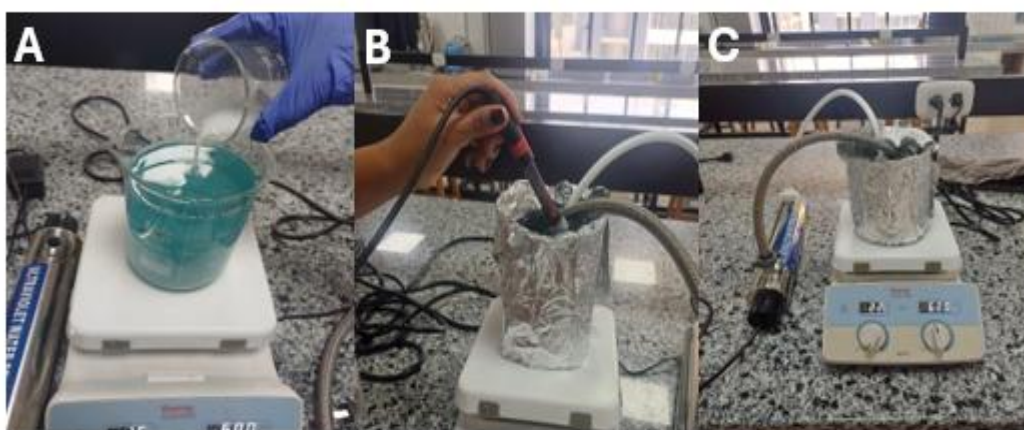
Anexo 12. Galería fotográfica.

I. Proceso de síntesis de nanopartículas de TiO_2 mediante el método sol-gel.



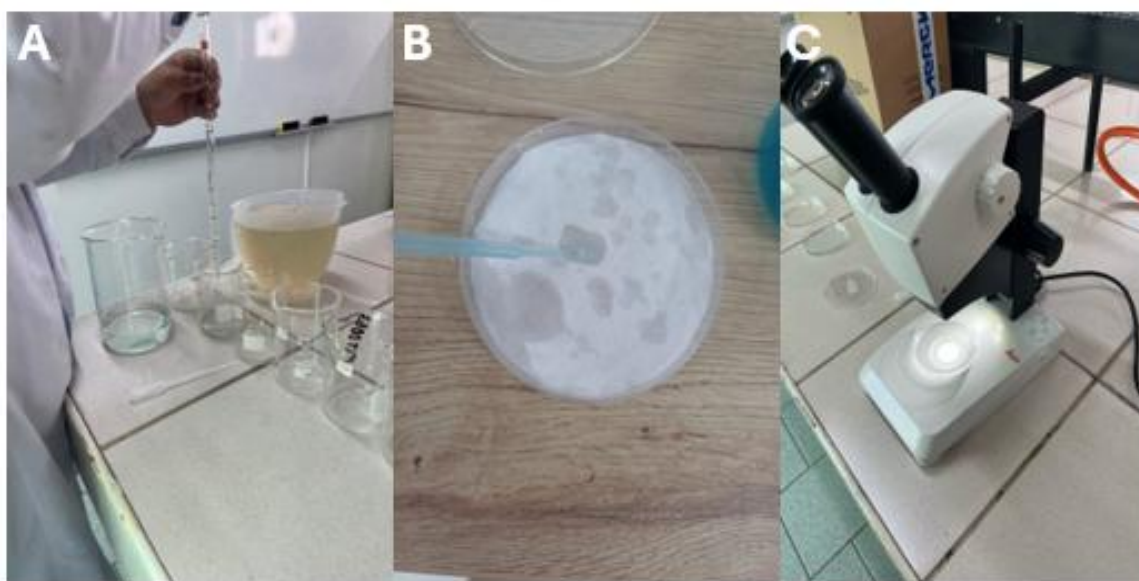
A) Adición de TTIP al agua ultrapura bajo agitación; (B) Incorporación de ácido acético para la estabilización del sol; (C) Lavado y sedimentación de las nanopartículas sintetizadas; (D) Secado y calcinación del material obtenido.

II. Etapas del tratamiento fotocatalítico heterogéneo para la degradación de contaminantes.



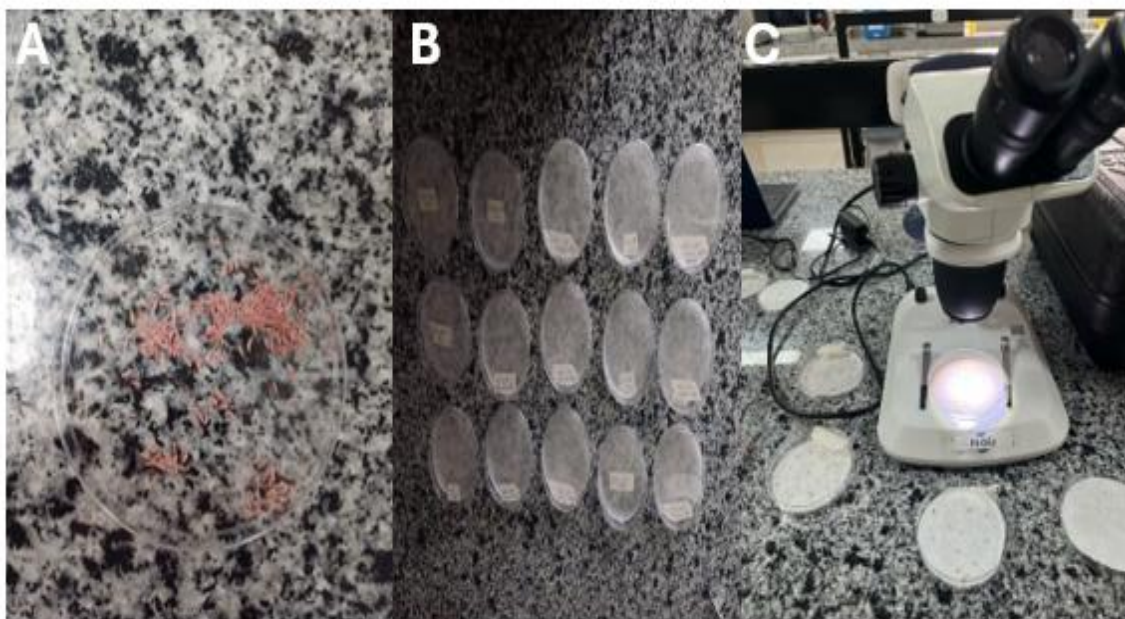
(A) Preparación de la suspensión de nanopartículas de TiO_2 en agua ultrapura y homogeneización de la solución. (B) Montaje y calibración del fotorreactor, asegurando las condiciones óptimas de reacción. (C) Exposición de la solución al tratamiento fotocatalítico bajo luz UV y agitación controlada.

III. Proceso de evaluación de toxicidad en *Daphnia magna*.



(A) Preparación de diluciones del efluente tratado. (B) Exposición de *Daphnia magna* en placas Petri bajo condiciones controladas. (C) Registro de inmovilización y análisis de toxicidad.

IV. Proceso de evaluación de toxicidad en *Lactuca sativa* L.



(A) Selección y distribución de semillas en placas Petri. (B) Exposición a diferentes concentraciones del efluente tratado. (C) Incubación y análisis del desarrollo radícula.

Anexo 13. Mapa de procesos del teñido de fibra natural en la industria textil

