

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LAURIL SULFATO
DE SODIO POR FOTOCATÁLISIS EN AGUAS SINTÉTICAS**

PRESENTADO POR:

Br. CESAR ROSALES ASTO.
Br. ANA HIDALIA OCON TTITO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO QUÍMICO**

ASESOR:

Dr. ANTONIO RAMIRO JESUS BUENO
LAZO

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Dr. ANTONIO RAMIRO JESÚS BUENO LOZO quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada:

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LAURIL SULFATO
DE SOPRO POR FOTOCATÁLISIS EN AGUAS
SINTÉTICAS

Presentado por: CESAR ROSALES AYO DNI N° 73780903;

presentado por: ANA HIDALGA OCON TITO DNI N° 48354046

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO QUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 21 de Septiembre de 2026


Firma

Post firma ANTONIO RAMIRO JESÚS BUENO LOZO

Nro. de DNI 23878046

ORCID del Asesor 0000-0002-6415-3028

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:626453296

Cesar Rosales Ana Ocon

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LAURIL SULFATO DE SODIO POR FOTOCATÁLISIS EN AGUAS SINTÉTICAS

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:626453296

116 páginas

Fecha de entrega

18 sep 2026, 6:45 p.m. GMT-5

25.149 palabras

Fecha de descarga

18 sep 2026, 7:15 p.m. GMT-5

141.940 caracteres

Nombre del archivo

TESIS REPOSITORIO 1.pdf

Tamaño del archivo

1.7 MB

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan con profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Sr. Decano y docentes de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del Jurado.

Según el Estatuto Universitario y el Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Facultad de Ingeniería de Procesos y con el anhelo de obtener el título profesional de Ingeniero Químico, se presenta el siguiente trabajo de investigación titulado:

“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LAURIL SULFATO DE SODIO POR FOTOCATÁLISIS EN AGUAS SINTÉTICAS”, con el fin de optar al título de Ingeniero Químico.

La presente tesis está orientada a determinar en qué medida las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), soportadas con poliepoxido, ejercen actividad fotocatalítica destruyendo contaminantes al exponerse a la luz ultravioleta, en aguas sintéticas.

Esperamos que la investigación presentada sea de base y apoyo a posteriores investigaciones; cuyos resultados y metodología presentada estamos seguros, constituirán nuevas alternativas para el tratamiento de aguas residuales.

DEDICATORIAS.

A Dios, por darme la vida, la salud y la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa profesional.

A mis queridos padres, Líder y Aurelia, quienes en todo momento me brindaron su apoyo incondicional, tanto en los momentos buenos como en los difíciles. Gracias por sus consejos, sacrificios, paciencia y amor, porque fueron el pilar fundamental para alcanzar este logro.

De manera especial, a mi compañero de vida Cesar, por su amor, comprensión, paciencia y apoyo constante a lo largo de este camino. Gracias por acompañarme en cada desafío y motivarme a seguir adelante.

Asimismo, a mis hermanos, Alex y William, por su cariño, confianza y palabras de aliento, que me impulsaron a no rendirme durante este proceso.

Ana Hidalia Ocon Ttito

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi amada madre Livia, por ser el pilar más importante, mi motivación y mi mayor orgullo por demostrarme siempre su cariño, fuerza de voluntad, esfuerzo y apoyo incondicional, este triunfo es tuyo. A mi padre José, por inculcarme que todo es posible en esta vida y que nada se logra sin dedicación, esfuerzo y sacrificio.

A Ana Hidalia, mi compañera de vida siendo la mayor motivación perfecta de cada día, por tu apoyo incondicional, tu amor, comprensión y paciencia, tu presencia en mi vida es un regalo invaluable, y este logro es nuestro, en equipo.

A mis hermanos Elian, Juan y Adalí, por ser parte indivisible de mí, por ser un ejemplo para ustedes.

Cesar Rosales Asto.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarnos, por mostrarnos la senda de la vida, cuidándonos en todo momento, brindándonos conocimientos, paciencia, y que el día a día es un reto de la cual debemos esforzarnos, aprender de las experiencias buenas y malas que nos enseñaron y nos condujeron a la culminación de esta maravillosa etapa profesional.

A nuestras familias, por su amor, su apoyo incondicional, sus consejos y experiencias de vida, que nos ayudaron, inspiraron y alentaron para la realización y la culminación de nuestro trabajo de investigación.

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional San Antonio Abad del cusco y al director de la Escuela de Ingeniería Química Dr. Antonio Ramiro Jesús Bueno Lazo, por habernos dado la oportunidad de culminar nuestro mayor anhelo académico.

A nuestro asesor, Dr. Antonio Ramiro Jesús Bueno Lazo por apoyarnos en todo momento en el ámbito personal y profesional del desarrollo del trabajo de investigación, con sus ocurrencias, experiencias y conocimientos adquirido y brindado a lo largo de su trayectoria como ingeniero Químico. Además de permitirnos el acceso a las instalaciones, equipos y materiales en el laboratorio de Hidrocarburos de nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Química.

A nuestro Co Asesor, Mgt. Washington Julio Lechuga Canal, por ser soporte, amigo y apoyarnos en la parte de nuestra investigación compartiendo sus conocimientos y experiencia en temas relacionados a tratamiento de aguas.

A las Dras. Leci Romero Peña y Carla Susan Sanchez Chávez por su valiosa contribución a la observación, corrección y culminación del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPITULO I	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.2.1. Descripción del problema	2
1.2.2. Formulación del problema.....	4
Problema General.....	4
Problemas Específicos.....	4
1.2.3. Objetivos.....	4
General.....	4
Específicos.....	4
1.2.4. Justificación	5
CAPITULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases Teóricas.....	14
2.2.1. Aguas Residuales Grises.....	14
2.2.2. Procesos de Oxidación Avanzada.....	15
2.2.3. Fotocatalizadores.....	20
2.2.4. Dióxido de Titanio (TiO ₂).....	20

2.2.5. Nanopartículas Soportadas.	25
2.2.6. Fotocatálisis.	26
2.2.7. Materiales Fotocatalíticos.	30
2.2.8. El Dióxido de Titanio (TiO ₂) en la Fotocatálisis Heterogénea.	30
2.2.9. Detergentes.	32
2.2.10. Tensioactivos.	33
2.3. Marco Conceptual.	41
2.4. Enfoque, tipo y alcance de la investigación.	42
2.5. Hipótesis	43
2.5.1. Hipótesis general.	43
2.5.2. Hipótesis Específicas.	43
CAPITULO III.	44
MATERIALES Y METODOS.	44
3.1. Población y muestra.	44
3.2. Materiales (reactivos, equipos e instrumentos).	44
3.3. Ámbito temporal y espacial	46
3.4. Diseño de investigación.	46
3.5. Variables y Operacionalización de variables (matriz).	47
3.6. Métodos.	49
3.6.1. Procedimientos.	49
A Efecto de la cantidad de catalizador soportado (TiO ₂)	54
B. Efecto de la cantidad de catalizador soportado (TiO ₂) y el oxidante (H ₂ O ₂).	57
C. Comparación entre sistemas de fotocatálisis (efecto con catalizador y efecto de la mezcla).	58
D. Comparación con el proceso de fotólisis que usa peróxido de hidrógeno.	58
CAPITULO IV	60
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	60
4.1. Efecto de la cantidad de dióxido de titanio (TiO ₂) en fotocatálisis.	60
4.2. Efecto de la cantidad de mezcla del dióxido de titanio (TiO ₂) y el peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂) en fotocatálisis.	62

4.3. Selección del proceso de fotocátalisis.....	65
4.4. Comparación de la remoción del lauril sulfato de sodio usando peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂) con el proceso de fotocátalisis.	69
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APENDICES	91
ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Potencial de oxidación de diferentes especies aplicados en los POAs.	18
Tabla 2. Área superficial de las nanopartículas de TiO_2	22
Tabla 3. Propiedades Fisicoquímicas del TiO_2	23
Tabla 4 Tensoactivos más utilizados según Palmer y Hatley.	37
Tabla 5. Propiedades de SDS.	39
Tabla 6 Clasificación de los detergentes aniónicos.....	39
Tabla 7 Lista de Materiales	44
Tabla 8 Lista de Reactivos.	45
Tabla 9 Equipos e Instrumentos.	45
Tabla 10 Variables independientes y dependientes.....	47
Tabla 11 Matriz de operacionalización de variables.....	48
Tabla 12. Plan Experimental para el dióxido de titanio.	54
Tabla 13 Plan experimental de la mezcla del catalizador y oxidante.....	57
Tabla 14 Plan Experimental para el proceso de fotólisis.	59
Tabla 15 Resultados para degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO_2).....	60
Tabla 16 Resultados para análisis de varianza de degradación del SDS con dióxido de titanio (TiO_2).....	61
Tabla 17 Resultados para degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2). 62	
Tabla 18 Resultados para análisis de varianza de degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2).....	64
Tabla 19 Resultados de degradación de tensoactivo para sistema 1, solo con dióxido de titanio (TiO_2) y para sistema 2, con dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).	66
Tabla 20 Resultados para análisis de varianza para sistemas de fotocatalisis.....	67
Tabla 21 Resultados de análisis Tukey para sistemas de fotocatalisis.....	67

Tabla 22 Resultados de degradación de tensoactivo para sistema 1, fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y sistema 2, fotólisis con peróxido de hidrogeno (H_2O_2).	69
Tabla 23 Resultados para análisis de varianza para los sistemas de fotocátalisis y fotólisis.	70
Tabla 24 Resultados de análisis Tukey para sistemas de fotocátalisis y fotólisis.....	70
Tabla 25 Determinación del % de titanio al inicio y al final de todos los tratamientos del primer sistema (efecto con TiO_2).	91
Tabla 26 Determinación del % de dióxido titanio al inicio y al final de todos los tratamientos del primer sistema (efecto con TiO_2).	92
Tabla 27 Barrido Espectrofotométrico UV-Vis del tensioactivo.	94
Tabla 28 Curva de Calibración para el Surfactante.....	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.	17
Figura 2 Celdas unitarias y estructuras cristalinas del a) Rutilo, b) Anatasa, c) Brookita	24
Figura 3 Diagrama del mecanismo de oxidación - reducción.....	31
Figura 4 Reacciones inducidas por la luz en sitios anódicos y catódicos para el TiO_2	32
Figura 5 Estructura simplificada de un surfactante (el grupo hidrófilo unido a un grupo hidrofóbico)	34
Figura 6 Algunas áreas importantes de impacto de aplicación surfactantes.	35
Figura 7 Clasificación de los Agentes tensioactivos en base a la naturaleza del grupo hidrófilo.	36
Figura 8 Producción mundial de Tensoactivos	36
Figura 9 Detergentes Comerciales.	37
Figura 10 Solubilización de las sustancias aceitosas.	40
Figura 11 Dimensiones de la resina con dióxido de Titanio (TiO_2).....	50
Figura 12 Diagrama de la instalación del Fotoreactor batch isotérmico.....	51
Figura 13 Sistema del Proceso Fotocatalítico	52
Figura 14 Preparación de la muestra sintética	53
Figura 15 Efectos en la degradación de tensoactivo de dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2)	64
Figura 16 Grafica de intervalos de porcentajes de degradación en sistemas de fotocatalisis	68
Figura 17 Determinación del % de Titanio (Ti) en el equipo XRF.....	92
Figura 18 Longitud de Onda del Surfactante.....	93
Figura 19 Curva de calibración.....	96
Figura 20 Registro Fotográfico del proceso de extracción con cloroformo.....	97
Figura 21 Proceso de extracción con cloroformo en laboratorio de Hidrocarburos.	98
Figura 22 Determinación de la absorbancia en el espectrofotómetro UV Vis.....	99

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar el grado de remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS) mediante un proceso de fotocátalisis, empleando TiO_2 y $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ en aguas sintéticas de 10 ppm, con lámparas UV-C de 32 W y una temperatura de 25 °C; los resultados mostraron una degradación de SDS entre 86.34 % y 93.28 % solo con catalizador soportado (TiO_2), mientras que el sistema combinado (TiO_2 y H_2O_2); alcanzó entre 97.39 % y 99.73 %, con un promedio de 98.87 % y el análisis estadístico evidenció efectos significativos de la cantidad de TiO_2 ($F = 80.09$; $p = 0.012 < 0.05$) y de H_2O_2 ($F = 6.37$; $p = 0.024 < 0.05$), así como diferencias significativas entre los sistemas ($F = 160.35$; $p = 0.000 < 0.05$); sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre la fotocátalisis con $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ (98.87 %) y la fotólisis con H_2O_2 (98.45 %) ($F = 1.18$; $p = 0.290 > 0.05$) y finalmente se concluye que, la fotocátalisis permitió una elevada remoción del SDS, alcanzando su mayor eficiencia con $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$, aunque la incorporación de TiO_2 no generó una mejora estadísticamente significativa frente al uso exclusivo de H_2O_2 .

Palabras clave: Lauril sulfato de sodio (SDS), Fotocátalisis, Dióxido de titanio (TiO_2), Peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

ABSTRACT

This study aimed to determine the removal efficiency of the surfactant sodium lauryl sulfate (SDS) using a photocatalytic process with TiO_2 and $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ in 10 ppm synthetic wastewater, utilizing 32 W UV-C lamps at a temperature of 25 °C. Results showed SDS degradation ranging from 86.34% to 93.28% with the supported catalyst (TiO_2) alone, whereas the combined system (TiO_2 and H_2O_2) achieved between 97.39% and 99.73% (average 98.87%). Statistical analysis revealed significant effects regarding the amount of TiO_2 ($F = 80.09$; $p = 0.012 < 0.05$) and H_2O_2 ($F = 6.37$; $p = 0.024 < 0.05$), as well as significant differences between the systems ($F = 160.35$; $p = 0.000 < 0.05$); however, no significant differences were found between photocatalysis with $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ (98.87%) and photolysis with H_2O_2 (98.45%) ($F = 1.18$; $p = 0.290 > 0.05$). Finally, it is concluded that photocatalysis enabled high SDS removal, achieving peak efficiency with $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$, although the addition of TiO_2 did not yield a statistically significant improvement compared to the use of H_2O_2 alone.

Keywords: Sodium lauryl sulfate (SDS), Photocatalysis, Titanium dioxide (TiO_2), Hydrogen peroxide (H_2O_2).

CAPITULO I

GENERALIDADES.

1.1. Introducción.

En la actualidad alrededor de 120.0 millones de toneladas de tensoactivos son producidos y empleados en el uso doméstico e industrial (Ayati, 2019). Los tensoactivos se caracterizan generalmente por su estructura anfifílica donde poseen una parte hidrofílica y otra parte hidrofóbica (Palmer & Hatley, 2018). Los tensoactivos aniónicos son el grupo más grande de surfactantes que poseen cadenas de carbono y sus respectivos isómeros en diferentes posiciones. De este grupo, los sintéticos más utilizados son los alquilbenceno sulfonatos lineales (SDS), los alcoholes etoxilados sulfatos (AES) y los alquil sulfatos (AS) (Zamudio, 2010). Y representan alrededor del 60% de la producción mundial.

Las aguas residuales generadas por los detergentes utilizados en labores de limpieza doméstica e industrial, y que son vertidas al alcantarillado, representan un problema ambiental significativo. Estos vertimientos constituyen una amenaza considerable tanto para la salud humana como para los ecosistemas (Echarri, 2018). Los detergentes constituyen un riesgo tanto para la salud humana como para el ambiente, debido a que generan eutrofización, toxicidad para organismos acuáticos, variaciones en el pH, aumento de la turbidez, interferencias en plantas de tratamiento y alteraciones en el microbiota del suelo, lo que afecta el crecimiento de los cultivos (Lechuga, 2005). También dañan las membranas celulares de algas y plantas acuáticas; así como, los tejidos branquiales de diversas especies. En las personas pueden causar irritación cutánea, alergias y trastornos gastrointestinales (Delgado, 2012). Por ello, es indispensable tratar las aguas residuales con surfactantes antes de su vertimiento, a fin de asegurar la sostenibilidad ambiental.

Una alternativa eficaz para tratar estos contaminantes son los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), reconocidos como tecnologías innovadoras capaces de eliminar una amplia

gama de compuestos orgánicos (Kanafin & Collinson, 2022) (Katwal & Kothari, 2021). Estos métodos se consideran soluciones verdes y eficientes debido a su capacidad para degradar sustancias de difícil eliminación, como compuestos aromáticos, pesticidas, hidrocarburos clorados, colorantes y compuestos orgánicos volátiles. Su efectividad se basa en la generación de especies reactivas de oxígeno, especialmente los radicales hidroxilos (OH), que destacan por su alta reactividad y con un tiempo de vida corta (Yang et al., 2023) (Priyadarshini et al., 2022) (Lyu et al., 2021) (Krystynik et al., 2021).

1.2. Planteamiento del problema.

1.2.1. Descripción del problema.

En la actualidad miles de toneladas de tensoactivos son producidos y empleados en el uso doméstico e industrial. Entre estos tensoactivos, los surfactantes aniónicos constituyen el tipo más grande e importante de los detergentes sintéticos (Ayati, 2019), aproximadamente el 60% de la contaminación en aguas grises es por el surfactante aniónico (SDBS) (Dai et al., 2024); y la liberación de estos componentes al medio ambiente provoca serios problemas ecológicos. El lauril sulfato de sodio (SDS), semejante al ácido dodecil benceno sulfónico lineal (SDBS), es un tipo de detergente aniónico biodegradable (sulfonatos de alquilbenceno lineales), que se adquiere a partir de un proceso que implica la sulfonación de alquilbenceno lineales, soluble en agua, humectabilidad, permeabilidad, emulsificación, dispensabilidad, solubilización, formación de espuma y detergencia de los tensioactivos aniónicos (Chi et al., 2020). La concentración de tensoactivos en aguas grises es de 1.0 a 10.0 mg/L; además que diferentes organismos reguladores ambientales limitan a los tensoactivos aniónicos a un valor de 0.5 mg/L (Dai et al., 2024). La presencia de surfactantes aniónicos en los cuerpos de agua ocasiona varios impactos sobre el ambiente como es la eutrofización, debido a los altos niveles de fosforo procedentes del tripolifosfato, ingrediente principal de las formulaciones de los detergentes; además de poder incrementar los niveles de cloro y compuestos organoclorados,

algunos posiblemente con carácter toxico y carcinógeno (Lechuga, 2005). Cabe añadir que su presencia disminuye mucho el poder auto depurador de los ríos al dificultar la actividad bacteriana (Echarri, 2018). Además; estos agentes ocasionan interferencia en el proceso de mezcla del oxígeno atmosférico con el agua y disminución del oxígeno disuelto, dificultando el proceso de floculación y disminuyendo la tensión superficial (Borja, 2016).

En la región del Cusco y en el mundo, el dodecilmecenosulfonato de sodio (SDBS), se emplea ampliamente en diferentes industrias como alimentos, pesticidas y productos farmacéuticos; además de ser los principales componentes de los detergentes; la contaminación de los recursos hídricos por los tensoactivos afecta la estética de los cuerpos de agua reduciendo la penetración del oxígeno y la luz, donde tal ausencia genera calidad ambiental escasa, impidiendo así que ocurra la fotosíntesis, lo cual afecta a la flora y fauna de los cuerpos de agua (Sanchez & Plazas, 2022).

Los métodos convencionales de tratamiento que se aplican en las aguas residuales grises con contenido de surfactantes no son eficaces, por ello los procesos de oxidación avanzada (POAs), constituyen una técnica prometedora para el tratamiento y la eliminación de contaminantes emergentes, debido a que operan a bajas temperaturas y presentan una alta capacidad para transformar y degradar diversos compuestos orgánicos de forma eficiente en H₂O y CO₂ (Hegazey et al., 2020); entre uno de los procesos de (AOP), la fotocátalisis heterogénea empleando al TiO₂ ,como semiconductor demostró ser una tecnología destructiva que conduce a la mineralización total de contaminantes orgánicos (Taghi et al., 2014).

1.2.2. Formulación del problema.

Problema General.

¿Cuál es el grado de remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS) en aguas sintéticas por fotocátalisis?

Problemas Específicos.

- ¿Cuál es el efecto de la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2); en un proceso de fotocátalisis usado en la remoción del lauril sulfato de sodio en aguas sintéticas?
- ¿Cuál es el efecto de la cantidad de mezcla del dióxido de titanio (TiO_2) y el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), en un proceso de fotocátalisis usado en la remoción del lauril sulfato de sodio en aguas sintéticas?
- ¿Cuál de los sistemas de fotocátalisis logran mayor remoción del lauril sulfato de sodio (SDS)?
- ¿Cuál es el grado de remoción del lauril sulfato de sodio en el proceso catalítico en comparación con el proceso de fotólisis usando peróxido de hidrogeno (H_2O_2)?

1.2.3. Objetivos.

General.

Determinar el grado de remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS) en aguas sintéticas por fotocátalisis.

Específicos.

- Establecer el efecto de la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2); en un proceso de fotocátalisis usado en la remoción del lauril sulfato de sodio en aguas sintéticas.

- Establecer el efecto de la cantidad de mezcla del dióxido de titanio (TiO_2) y el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), en un proceso de fotocátalisis usado en la remoción del lauril sulfato de sodio en aguas sintéticas.
- Determinar cuál de los sistemas de fotocátalisis logran mayor remoción del lauril sulfato de sodio (SDS).
- Determinar el grado de remoción del lauril sulfato de sodio en el proceso catalítico en comparación con el proceso de fotólisis usando peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

1.2.4. Justificación

La eliminación de los tensoactivos aniónicos vertidos indiscriminadamente en el agua es un problema significativo ya que tiene graves efectos sobre los seres vivos y el medio ambiente, en la región cusco, en el país y en todo el mundo (Sanchez & Plazas, 2022).

En los últimos años es más crítico debido al incremento de la demanda de agua potable (Srinivasan & Kumar, 2021). La actividad industrial y doméstico manipulan una gran cantidad de detergentes sintéticos que dan como resultado la descarga de aguas residuales grises (Li et al., 2022) (Mousavi & Khodadoost, 2019). Los tensoactivos aniónicos representan aproximadamente el 60% de todos los detergentes sintéticos utilizados en todo el mundo (Karray et al., 2016).

El ácido dodecibencenosulfónico lineal (SDBS), es un contaminante orgánico sintético frecuentemente encontrado en los efluentes domésticos e industriales, y su descarga a los cuerpos superficiales trae efectos negativos sobre el medio ambiente y salud pública (Phugare et al., 2011).

Los procesos de oxidación avanzada (AOP), tienen una demanda creciente en los últimos años debido al aumento de la contaminación del agua, ya que es difícil de tratar debido a su estructura compleja de los contaminantes. Este método se basa en el uso de óxidos

semiconductores con irradiación ultravioleta o solar para generar radicales hidroxilos altamente reactivos. Según pruebas realizadas a nivel laboratorio realizada por los investigadores (Oyetade et al., 2022); muestran la degradación eficiente de los surfactantes aniónicos mediante la fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2), logrando oxidación parcial y/o completa, sin crear subproductos secundarios.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1. Antecedentes

Dai et al. (2024), investigaron la fotodegradación del dodecilbenceno sulfonato de sodio (SDBS) en agua gris empleando una interfaz compuesta de TiO_2 inmovilizado sobre malla de acero inoxidable bajo irradiación UV y VUV, con el objetivo de evaluar la eficiencia de remoción del surfactante y analizar la cinética del proceso; metodológicamente, utilizaron un reactor cilíndrico discontinuo de vidrio borosilicato de 2.0 L con 1.0 L de solución, a concentración inicial de SDBS de 10 mg/L, pH 5.0, lámparas UV de 6 W y 60 minutos de exposición, con TiO_2 depositado mediante sol-gel; los resultados mostraron tasas de degradación del 53% con el sistema UV/ TiO_2 y del 74% con VUV/ TiO_2 , observándose además que el modelo cinético que mejor se ajustó fue el de pseudo-primer orden, evaluando también el efecto del pH y la formación de subproductos con tendencia estable o decreciente y como conclusión, los autores señalan que tanto el sistema UV/ TiO_2 como el VUV/ TiO_2 ofrecen una perspectiva favorable para la eliminación de surfactantes en aguas grises, destacando el VUV como una alternativa más eficiente.

Wysokowska et al. (2023), investigaron la degradación fotocatalítica de tres grupos de tensioactivos (catiónicos, aniónicos y no iónicos) utilizando nanopartículas de ZnO sintetizadas, con el objetivo de evaluar la eficiencia de remoción a distintas concentraciones iniciales y determinar el modelo cinético del proceso; metodológicamente, emplearon un reactor de laboratorio de 1.5 litros con 700 mg de ZnO suspendidos en 700 mL de solución, concentraciones de surfactante de 10, 100 y 1000 mg/L, pH 7.0, potencia de luz de 150 watts y tiempos de exposición de 60 minutos, extrayendo alícuotas a intervalos de 1 a 60 minutos, y determinaron la concentración de cada tipo de surfactante mediante métodos espectrofotométricos específicos (azul de metileno para aniónicos, disulfina para catiónicos y

iodobismutato para no iónicos). Los resultados mostraron eficiencias de degradación del 93-100% para 10 mg/L, 94-100% para 100 mg/L y solo del 15-66% para 1000 mg/L, ajustándose la cinética a modelos de pseudo-primer y segundo orden; en conclusión, el sistema ZnO/UV resultó altamente eficiente a bajas y medias concentraciones, pero su efectividad disminuye drásticamente a altas concentraciones, por lo que se recomienda su aplicación en efluentes con cargas moderadas de surfactantes.

Condori y Torres (2023), evaluaron la eficiencia del proceso de degradación fotocatalítica heterogénea del colorante Negro Remazol B (RB5); en soluciones sintéticas mediante el sistema UV/TiO₂, con el objetivo de determinar el efecto de la temperatura, tiempo de exposición y concentración inicial del colorante; metodológicamente, realizaron 27 pruebas experimentales variando la temperatura en 20, 30 y 40 °C, el tiempo de exposición de 100 a 240 minutos y la concentración de RB5 5.0, 10.0 y 15.0 ppm, empleando TiO₂ soportado en poliepoxido como catalizador; los resultados mostraron que la relación óptima catalizador/soporte fue de 0.32 mg TiO₂/mg poliepoxido, que la temperatura no resultó ser un factor significativo y que la mayor eficiencia se logró a 15 ppm de colorante, 20 °C y 4 horas de exposición. Alcanzando la degradación total del RB5 y como conclusión, los autores señalan que el sistema UV/TiO₂ constituye una alternativa viable y eficiente para la degradación del colorante RB5 en soluciones acuosas.

Silva y Nieto (2023), investigaron la degradación del tensoactivo aniónico alquil aril sulfato de sodio (SDS) en aguas residuales de una lavandería comercial mediante el sistema combinado Ozono/Luz UV/TiO₂, con el objetivo de determinar la eficiencia de remoción bajo diferentes condiciones operativas; metodológicamente, determinaron la concentración inicial de 150.616 mg/L de (SDS), aplicaron un tratamiento preliminar con antiespumante y evaluaron el efecto del flujo 3.0, 5.0 y 7.0 L/min, tiempo de exposición 60, 90 y 120 minutos y dosis de (TiO₂) de 20, 40 y 60 mg/L. Los resultados mostraron que la condición óptima fue flujo de 7

L/min, 20 mg TiO_2 /L y 120 minutos, alcanzando un 50% de degradación del surfactante. En conclusión, los autores señalan que el sistema Ozono/UV/ TiO_2 representa una técnica alternativa viable para la degradación de (SDS) en aguas residuales de lavanderías.

Rau y Suazo (2021), investigaron la reducción de DQO y DBO_5 en aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante fotocátalisis heterogénea con TiO_2 y H_2O_2 bajo irradiación UV, con el objetivo de evaluar el efecto de la variación de la dosis de TiO_2 y el tiempo de retención hidráulica sobre la eficiencia del proceso; metodológicamente, realizaron una caracterización fisicoquímica inicial de las muestras y desarrollaron experimentos con un sistema UV/ H_2O_2 / TiO_2 , variando el tiempo de retención de 30 y 45 minutos y la cantidad de TiO_2 1.0 y 2.0 gramos; los resultados mostraron que con 1.0 g de TiO_2 se alcanzaron reducciones del 87.40% para DQO y 89.39% para DBO_5 , mientras que al incrementar la dosis a 2.0 g los porcentajes de remoción disminuyeron; en cuanto al tiempo de retención, no se observaron diferencias significativas entre 30 y 45 minutos y como conclusión, los autores determinaron que las condiciones óptimas para el proceso fueron 1.0 g de TiO_2 y 45 minutos de retención, logrando una reducción significativa de la carga contaminante.

Nazari y Ayati (2019), investigaron la remoción del dodecibencenosulfonato de sodio (SDBS) comparando dos sistemas: electrocoagulación/flotación y fotocátalisis con TiO_2 , con el objetivo de evaluar y comparar la eficiencia de ambos procesos; metodológicamente, emplearon un reactor de laboratorio de $15 \times 7 \times 7$ cm, con 500 mL de solución, variando en el primer sistema la concentración inicial de SDBS (50-1000 mg/L), la intensidad de corriente (0.5-1.5 A) y el pH (3-11), mientras que en el segundo sistema variaron la concentración de SDBS (150-700 mg/L), el pH (3-11) y la dosis de TiO_2 (0.3-1.2 mg/L), con tiempos de retención de 24 horas para ambos; los resultados mostraron que el primer sistema alcanzó un 93.54% de remoción de SDBS y 90% de DQO, mientras que el segundo sistema logró un 98.7% de degradación del surfactante y 95% de DQO en 48 horas, ambos a pH 8.0. En conclusión, el

sistema fotocatalítico con TiO_2 resultó significativamente más eficiente que el sistema de electrocoagulación/flotación.

Mendoza Correa (2019), investigó la degradación de detergentes comerciales y aniónicos en aguas residuales de lavanderías mediante fotocatálisis con TiO_2 y Fe(II) como catalizadores y H_2O_2 como oxidante, con el objetivo de comparar la eficiencia de los sistemas UV/ TiO_2 , UV/ $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ y UV/ $\text{Fe(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$; metodológicamente, empleó un reactor batch UV de 125 Watts con 100 mL de muestra, concentración inicial de surfactante de 830 mg/L, variando la dosis de TiO_2 de 25 a 45 mg, Fe(II) 5.0 y 20.0 mM y H_2O_2 30 mL, con tiempo de exposición de 3 horas, evaluando además el efecto de la concentración de TiO_2 , H_2O_2 y pH; los resultados mostraron que la mejor concentración de TiO_2 fue de 35 mg/L, y que el sistema UV/ $\text{Fe(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$ alcanzó eficiencias superiores al 99.87% y 99.77% en la degradación del surfactante, superando ampliamente a los otros sistemas evaluados y como conclusión, el autor determina que el proceso fotocatalítico es eficiente y confiable, recomendando el sistema UV/ $\text{Fe(II)}/\text{H}_2\text{O}_2$ por su óptimo rendimiento en el tratamiento de aguas residuales con detergentes.

Jariyanorasade y Junyapoon (2017), investigaron la degradación fotocatalítica del alquilbencenosulfonato lineal (LAS); en soluciones sintéticas y aguas residuales de lavandería utilizando TiO_2 P25 Degussa bajo irradiación UV, con el objetivo de evaluar el efecto del pH, dosificación de TiO_2 , tiempo de exposición y concentración inicial del surfactante, así como determinar el modelo cinético del proceso; metodológicamente, emplearon un reactor discontinuo de 66×72×58 cm con 4 lámparas UV de 72 watts, realizando experimentos en solución sintética con 20 mg/L de TiO_2 , pH 5.5 y 60 minutos, y en agua residual con dosis de TiO_2 de 100-500 mg/L, pH de 2 a 7 y tiempos de 5 a 120 minutos; los resultados mostraron una degradación del 83.20% en solución sintética a los 60 minutos, mientras que en agua residual la eficiencia alcanzó entre 72.3% y 75%; el modelo cinético se ajustó a una cinética

de segundo orden con constante de velocidad de 0.0031 L/mg/min y vida media de 16.0 minutos y como conclusión, los autores atribuyeron la baja eficiencia en aguas reales a la formación de subproductos ácidos que interfieren en el proceso fotocatalítico, limitando la degradación del surfactante.

Masco (2017), realizó una investigación orientada a determinar la concentración del tensioactivo aniónico tipo ácido dodecilbenceno sulfónico lineal (SDBS) en aguas del río Huatanay (Cusco), con el objetivo de evaluar su presencia en diferentes temporadas y comparar los valores con los límites establecidos por la normativa ambiental; metodológicamente, empleó el método colorimétrico SMEWW-APHA-AWWA-WEF, obteniendo una curva de calibración lineal con pendiente de 0.2378 y R^2 de 0.9987, procesando 40 muestras tomadas en distintos puntos del río durante las temporadas seca y lluviosa, además de realizar una caracterización fisicoquímica complementaria (dureza, fosfatos, amoníaco, cloruros y materia orgánica). Los resultados mostraron concentraciones de detergente que variaron entre 0.2429 mg/L y 8.5301 mg/L en ambos periodos; en conclusión, el autor determinó que estos valores superan los límites permitidos por el MINAN para agua de riego y consumo animal, afectando las propiedades fisicoquímicas naturales del agua e inhibiendo el crecimiento de las plantas.

Wahyuni et al. (2016), desarrollaron una investigación centrada en la degradación fotocatalítica del surfactante aniónico dodecilbenceno sulfato (SDBS) presente en aguas residuales de lavandería, con el objetivo principal de comparar la eficiencia de dos procesos de oxidación avanzada UV/TiO₂/H₂O₂ y UV/Fe²⁺/H₂O₂, evaluando el efecto de variables operativas como la dosis de TiO₂, concentraciones de Fe(II) y H₂O₂, pH y tiempo de exposición; metodológicamente, emplearon un reactor discontinuo sin recirculación de 250 mL y determinaron la concentración del surfactante mediante espectrofotometría UV con azul de metileno, realizando experimentos para el primer sistema con dosis de TiO₂ entre 0 y 80 mg/100 mL, H₂O₂ de 0 a 80 mM, pH de 1.0 a 10.0 y tiempos de 2 a 24 horas, mientras que para

el segundo sistema variaron Fe(II) de 5 a 25 mM, H₂O₂ de 50 a 600 mM, pH de 1.0 a 10 y tiempos de 2 a 12 horas. Los resultados mostraron que el proceso UV/Fe²⁺/H₂O₂ logró una degradación del 90.15% del surfactante en condiciones óptimas (200 mM de H₂O₂, 5.0 mM de Fe (II), pH 3.0 y 3 horas de exposición, con una concentración inicial de 20.36 mg/L MBAS), mientras que el sistema UV/TiO₂/H₂O₂ alcanzó solo un 75.24% de remoción bajo sus mejores condiciones (40.0 mg de TiO₂, 30 mM de H₂O₂, pH 5.0 y 24 horas de exposición, con 50.8 mg/L iniciales). En conclusión, aunque ambos sistemas demostraron una influencia positiva y significativa en la remoción del surfactante, el proceso UV/Fe²⁺/H₂O₂ presentó una actividad más fuerte y rápida, logrando mayores porcentajes de degradación en mucho menor tiempo, por lo que se posiciona como una alternativa más eficiente para el tratamiento de aguas residuales con surfactantes aniónicos.

Taghi et al. (2014), desarrollaron una investigación centrada en evaluar la degradación fotocatalítica del surfactante dodecilsulfato de sodio (SDS) en soluciones acuosas mediante nano cristales de óxido de zinc (ZnO) y radiación ultravioleta (UV), con el objetivo principal de determinar la eficiencia de remoción del contaminante bajo distintas condiciones operativas y establecer el modelo cinético que rige el proceso; metodológicamente, emplearon un reactor fotocatalítico discontinuo (batch) de 2.0 L con 1000 mL de solución de SDS a 10.0 mg/L y 150 mg/L de ZnO suspendido, evaluando el efecto del pH entre 4.0 y 10.0, utilizando una lámpara de baja presión de 125 watts durante 40 minutos de reacción. Los resultados evidenciaron que, en condiciones óptimas, se logró el 98% de degradación del surfactante, aunque al incrementar el pH hasta 9.0 se observó una disminución significativa en la eficiencia del proceso, reduciéndose el porcentaje de remoción; además, el ajuste de los datos experimentales indicó que la cinética de degradación sigue un modelo de pseudoprimer orden. En conclusión, el sistema ZnO/UV demostró ser altamente efectivo para la degradación del SDS, alcanzando remociones superiores al 98% en condiciones controladas, pero el pH se identificó como un

factor crítico, ya que valores elevados de pH en una cantidad 9.0; afectan negativamente el rendimiento, por lo que se recomienda optimizar este parámetro para maximizar la eficiencia del tratamiento fotocatalítico.

Cubillos y Moncada (2006), investigaron la degradación de tensoactivos aniónicos (SDS) mediante procesos UV/H₂O₂ (homogéneo) y UV/H₂O₂/TiO₂ (heterogéneo), con el objetivo de comparar su eficiencia y evaluar su viabilidad técnica; metodológicamente, emplearon un reactor batch de recirculación de 3.5 litros con lámpara UV de longitud de onda 254 nm, variando concentraciones iniciales de SDS (20-500 mg SAAM/L), tiempos de hasta 120 min y dosificaciones de H₂O₂ de 400 a 800 veces el requerimiento estequiométrico; los resultados mostraron que el sistema homogéneo alcanzó remociones superiores al 90%, mientras que la adición de TiO₂ no mejoró la degradación e incluso la inhibió; en efluentes reales de lavandería e industria Unilever, se lograron remociones del 93-99% y 90-94% respectivamente, con cinética de primer orden; como conclusión, el proceso UV/H₂O₂ demostró viabilidad técnica, proponiéndose un diseño escalado con estimación de costos para su aplicación industrial.

Daneshvar et al. (2002), desarrollaron una investigación orientada a evaluar la degradación fotocatalítica del surfactante aniónico dodecilbenceno sulfonato de sodio (SDBS); mediante procesos de oxidación avanzada, con los objetivos principales de comparar la eficiencia de los sistemas de dos sistemas UV/TiO₂ y UV/H₂O₂, determinar las condiciones operativas óptimas y establecer el modelo cinético que gobierna la reacción; metodológicamente, emplearon un reactor discontinuo de vidrio Pyrex de 500 mL con 100 mL de solución a una concentración inicial de SDBS de 50 ppm, bajo irradiación UV (lámpara de 15 W) o luz solar, utilizando TiO₂ en suspensión o H₂O₂ como oxidantes, y evaluaron variables como la carga de TiO₂ (óptima de 75 ppm), la relación H₂O₂/SDBS (óptima de 5:1), el pH (óptimo alrededor de 6.8), la temperatura y la agitación (óptima de 30 rpm). Los resultados

evidenciaron que el proceso UV/H₂O₂ logró una degradación significativamente mayor, con una constante cinética de pseudo-primer orden de 0.132 min⁻¹, aproximadamente 6.5 veces superior a la del proceso UV/TiO₂ en condiciones óptimas, confirmando además que la cinética de degradación se ajusta a un modelo de pseudo-primer orden y como conclusión afirmaron que, si bien el sistema UV/H₂O₂ mostró una mayor velocidad de reacción, los autores confirmaron que la combinación de luz UV y solar con TiO₂ resulta ser el método más eficiente en términos globales, recomendando su uso para el tratamiento de aguas residuales con surfactantes, siempre que se optimicen los parámetros operativos para maximizar el rendimiento del proceso.

2.2. Bases Teóricas.

2.2.1. Aguas Residuales Grises.

- **Aguas grises domésticas:** Las aguas grises domésticas, se componen en un 49% de aguas de “baños, lavaderos y aseo personal”; un 27% se origina en las cocinas; y el 24% en los “lavaderos, fregaderos y lavadoras”. Aunque la disponibilidad ideal de agua potable es de 100 a 200 Litros/Habitante/día (OMS, 2023), de acuerdo con un modelo con efecto variado en (Lima – Perú), existen grupos que consumen menos de 150 Litros/día. y otros que superan ese nivel. El agua en un hogar promedio, las aguas grises domésticas constituyen entre el 40 – 70% del total de las aguas residuales.

La cantidad y calidad de las aguas grises domésticas dependen de factores como las características de los usuarios, la zona geográfica, la época del año y su composición química, elementos esenciales para su adecuada caracterización y tratamiento (Boano et al., 2020).

Las aguas grises domésticas se dividen en dos grupos: oscuras y claras. Las aguas grises oscuras provienen principalmente del lavadero de cocinas y contienen restos de alimentos,

aceites, grasas, detergentes, residuos de lejía y limpiadores, por lo que presentan altos niveles de nutrientes y sólidos suspendidos (Odeh, 2003). También se incluyen aquí las aguas generadas en el lavado de ropa, que contienen detergentes, sodio, fósforo, nitrógeno, tensioactivos y blanqueadores. Por otro lado, las aguas grises claras provienen de duchas y lavamanos, y están compuestas por jabones, champús, pasta dental, células de la piel, cabello y residuos de afeitado (Oteng-Peprah et al., 2018).

- **Composición química.**

Los principales componentes de las aguas grises provienen de los productos químicos usados en la limpieza, cocina, lavado y baño. Entre ellos destacan los surfactantes, que son los agentes activos más comunes en los productos de limpieza (Oteng-Peprah et al., 2018).

- **Composición Física.**

Mayormente estos componentes están asociados con la apariencia física e incluyen: temperatura, turbidez, conductividad eléctrica, y sólidos suspendidos (Golda et al., 2014).

2.2.2. Procesos de Oxidación Avanzada.

Los procesos de oxidación avanzada (POAs); son métodos prometedores e innovadoras de tratamiento químico para reducir cantidades bajas y altas de contaminantes orgánicos procedentes de cuerpos de agua residual de origen industrial y municipal (Kanafin & Collinson, 2022; Zhang et al., 2023; Katwal et al., 2021); por lo que se ha considerado como una tecnología químicamente verde más atractiva, favorable, eficiente y prometedora (Yang et al., 2023; Priyadarshini et al., 2022); además de ser una técnica amigable con el medio ambiente para la degradación de todo tipo de contaminante en el agua como: compuestos aromáticos, hidrocarburos clorados, pesticidas, insecticidas, compuestos orgánicos volátiles, tintes y otros compuestos orgánicos (Lyu et al., 2021).

Ahora los procesos de oxidación avanzada se basan en la creación de grupos reactivos de O_2 (oxígeno), como los radicales OH (hidroxilo) con un electrón (e^-) ausente, por lo que estas especies tienen breves periodos de vida (periodos cortos). Por lo tanto, interactúan de manera activa y sencilla con una serie de especies químicas, que de otra manera resultan muy complicadas de degradar.

Los procesos de oxidación avanzada presentan excelentes mejoras respecto a degradar en comparación con otros métodos convencionales, además de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes hasta mineralizarlos en compuestos como el H_2O y CO_2 , productos de oxidación termodinámicamente estables y compuestos orgánicos biodegradables (Dehghani et al., 2023; Priyadarshini et al., 2022; Sakkas et al., 2017; Krystynik et al., 2021).

Estos procesos también son muy reconocidos en el mundo por resolver los inconvenientes que presentan los tratamientos fisicoquímicos y biológicos tradicionales y los límites que cada día son más exigentes fijados por la normatividad ambiental (Dewil et al., 2017); los POAs comunes más utilizados son UV, UV/ H_2O_2 , UV/ Fe^{2+} , UV/ H_2O_2/Fe^{2+} , UV/ O_3 , UV/ S_2 , UV/ TiO_2 , UV/ Cl_2 y UV con algunos otros fotocatalizadores como son: Bi_2O_3 , CdSe, CdS, MnO_2 y SiO_2 (Wols & Hofman-Caris, 2012) (Taha & Daffalla, 2023). Ahora los POAs muestran mejores tasas de degradación debido a la producción de radicales hidroxilos (potencial de oxidación 2.8 eV) (Rodriguez et al., 2017). Los POAs sobresalen entre muchos procesos o técnicas de tratamiento y esto se da por presentar una tasa rápida de oxidación, alta tasa de mineralización, y la reducción de la biotoxicidad (Zhou & Smith, 2022).

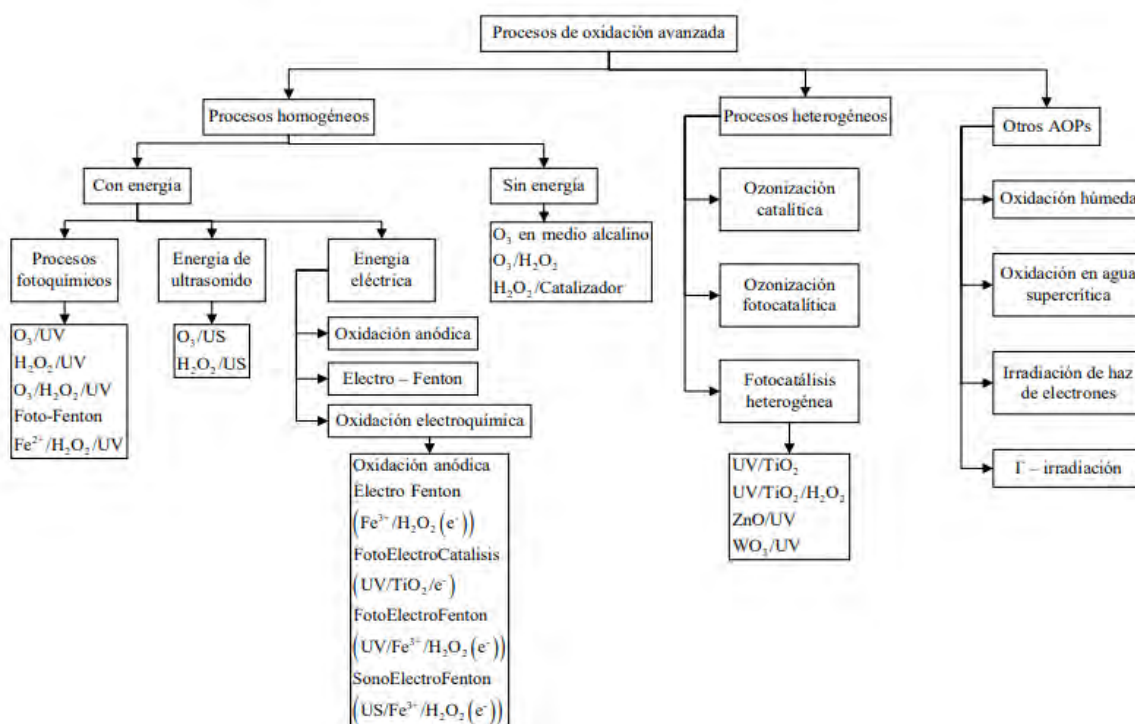
El principal mecanismo de los procesos de oxidación avanzada es la producción de radicales libres que son altamente reactivos. “Los radicales hidroxilos (OH) son eficaces para destruir sustancias químicas orgánicas porque son electrófilos reactivos que reaccionan de

manera rápida con casi todos los compuestos orgánicos ricos en electrones” (Gogate & Pandit, 2022).

En la Figura 1. Se presenta la clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POAs), según (Sciezynska et al., 2022); nos menciona que los POAs se distribuye en tres categorías “Procesos homogéneos, heterogéneos y otros también considerados como procesos de oxidación avanzada”. Donde se especifica a detalle el tipo de catalizador, energía, sustancia, medio y proceso utilizado para la degradación de un compuesto orgánico.

En la Figura 1. Se muestra la clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada.

Figura 1
Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.



Nota. Adaptado de Sciezynska et al. (2022)

Para que esta tecnología sea eficiente, se debe generar altas concentraciones del radical hidroxilo para oxidar los contaminantes existentes, el radical hidroxilo es capaz de atacar usualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar $10^6 - 10^{12}$ veces más rápido que otros oxidantes alternativos como el ozono (Bracamontes et al., 2022; Krystynik et al., 2021).

En la Tabla N° 1, se presenta los potenciales de oxidación electroquímica medida en unidades de voltios (V), de algunos agentes oxidantes que se vienen aplicando en los diferentes procesos de oxidación avanzada. Dónde el radical hidroxilo es el segundo mejor agente oxidante según su potencial de oxidación.

Tabla 1.

Potencial de oxidación de diferentes especies aplicados en los POAs.

Agente Oxidante	Potencial de oxidación electroquímica (EOP) (V)
Flúor	3.03 – 3.06
Radical hidroxilo	2.80
Oxígeno atómico	2.42
TiO ₂ + hv	2.35
Ozono	2.07
Persulfato	2.01
Perbromato	1.85
Peróxido de hidrógeno	1.78
Radical perhidroxilo	1.70
Ácido hipobromoso	1.59
Ácido hipocloroso	1.49
Bromato	1.48
Cloro	1.36
Bicromato	1.33
Dióxido de cloro	1.27
Permanganato	1.24
Oxígeno molecular	1.23
Perclorato	1.20
Bromo	1.09
Yodo	0.54

Nota. Adaptado de Ameta (2018); Parsons (2015).

Ventajas.

A continuación, se presenta algunas de las ventajas más importantes de los procesos de oxidación avanzada (POAs):

- Reducen la toxicidad y permiten la mineralización completa de contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- Degradan contaminantes a altas y bajas concentraciones, transformándolos principalmente en CO₂ e iones.
- No generan lodos, evitando procesos adicionales de tratamiento.
- Los reactivos oxidantes se descomponen en productos inocuos durante el proceso.
- Eliminan contaminantes refractarios que no pueden tratarse por métodos biológicos.
- Eficaces incluso con contaminantes en muy bajas concentraciones (ppb).
- Favorecen la producción de carbono orgánico disuelto biodegradable.
- Permiten la reutilización de catalizadores.
- Ofrecen alta eficacia de oxidación y no producen contaminantes secundarios.
- Presentan altas velocidades de reacción.
- Requieren menor energía que otros procesos.
- Mejoran notablemente las propiedades organolépticas del agua (sabor, olor, color) (Arifin et al., 2023; Bhambri et al., 2023; Brienza & Katsoyiannis, 2017; Kaswan & Kaur, 2023; Korpe et al., 2022; Kumar et al., 2021; Li et al., 2023; Pham et al., 2020; Saravanan et al., 2022).

Desventajas

A continuación, se presenta algunas desventajas que presentan los POAs:

- Es un proceso relativamente de alto costo debido al empleo de productos químicos costosos y al gran consumo de energía que esta tecnología requiere.

- La formación de subproductos recalcitrantes desconocidos, en algunos casos, pueden ser mucho más nefrotóxicos que el original, los compuestos pueden quedar sin resolver
- Requieren un elevado tiempo de reacción en algunos procesos.
- Elevado consumo de energía
- No existe una aplicación a gran escala en lo que respecta a TiO_2/UV .
- El uso de los POAs para tratar un volumen considerable de aguas residuales no es económicamente factible (Kumar et al., 2021; Torres et al., 2021; Lapchuk et al., 2023).

2.2.3. Fotocatalizadores.

El termino fotocatalizador es la combinación de dos palabras: Foto (relacionada con el fotón) y catalizador (sustancia que modifica la velocidad de reacción); por ende, los fotocatalizadores son materiales que modifican la velocidad de una reacción química al ser expuesta a la luz (Aribam et al., 2022)

Las características esenciales de un buen fotocatalizador incluyen una alta actividad fotoactiva, estabilidad estructural, abundancia, facilidad de producción y un bajo impacto ambiental, además de ser económicamente viable. Asimismo, es fundamental que el fotocatalizador posea un potencial redox adecuado del par $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$ dentro del rango de la banda prohibida del semiconductor. Diversos semiconductores cumplen con estos criterios al ofrecer energías de banda prohibida apropiadas para los procesos de fotocatálisis como SrTiO_3 , TiO_2 , ZnO , WO_3 , Fe_2O_3 , y ZnS (Tahir et al., 2020).

2.2.4. Dióxido de Titanio (TiO_2)

El dióxido de titanio (TiO_2) es un semiconductor abundante, inerte, orgánico, no tóxico, biocompatible, económico, con alta constante dieléctrica, con propiedades optoelectrónicas únicas, alta estabilidad química, elevada reactividad, buena estabilidad térmica, alto índice de

refracción, gran capacidad para absorber luz ultravioleta y cantidad disponible en comparación con otros fotocatalizadores de óxidos metálicos (Nguyen et al., 2022; Parrino et al., 2021; Pourghorbani et al., 2022; Sun et al., 2022).

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio se utiliza ampliamente en ciencia y tecnología (Ono et al., 2022); en procesos de oxidación avanzada, especialmente para la eliminación de diferentes contaminantes presentes en el agua (Zhang et al., 2017).

El dióxido de titanio es el fotocatalizador más común que se ha aplicado en la remediación ambiental (Nguyen et al., 2022). Es un fotosensibilizador que se activa solo por la radiación UV, en longitudes de onda inferiores a 390 nm debido a su banda de energía o banda prohibida de 3.2 eV para la polimorfa anatasa y 3.0 eV para la fase rutilo (Goulart et al., 2021); cuando la luz ultravioleta con una longitud de onda que oscila entre 200 nm y 400 nm ilumina el TiO_2 , los electrones dentro de los átomos de TiO_2 se fotoexcitan y se transfieren hacia la banda de conducción. En este proceso, se crean muchos pares de electrones, lo que lleva a reacciones en cadenas oxidativas – reductoras complejas (Devi & Chaturvedi, 2021).

Es ampliamente utilizado en el campo de la fotocatálisis debido a la efectividad que presenta y está relacionado con sus propiedades fotoconductoras, características texturales y su cristalinidad, en la naturaleza existen tres formas alotrópicas del TiO_2 las cuales en orden de abundancia son:

- Rutilo (estructura tetragonal, grupo espacial P_{42}/mmn)
- Anatasa (estructura tetragonal, grupo espacial I_{41}/AMD)
- Brookita (estructura ortorrómbica, grupo espacial (Pbca) (Gitrowski et al., 2014; Ren et al., 2013).

Las formas alotrópicas más usadas con frecuencia en los procesos fotocatalíticos son el rutilo y la anatasa, donde esta última forma presenta una mejor actividad fotocatalítica, debido

a que esta forma alotrópica presenta una menor velocidad de recombinación de los pares electrón – hueco (Gitrowski et al., 2014); la anatasa es el polimorfo de Titania más interesante, debido a su amplia gama de aplicación como fotocatalizador (Winnicki et al., 2021).

La anatasa es mejor catalizador que el rutilo al transporte masivo de electrones a la superficie. Para la forma alotrópica anatasa, la actividad aumenta para películas de hasta 5nm de espesor, mientras que las películas de rutilo alcanzan su actividad máxima para películas de 2.5 nm. Esto muestra que los portadores de carga excitados más profundamente en el bulto contribuyen a las reacciones superficiales en la anatasa que en el rutilo (Luttrell et al., 2014).

En la Tabla N° 2, se presenta el tamaño de partícula del dióxido de titanio y su respectiva área de superficie. Donde se puede deducir a partir de la tabla que las partículas de menor tamaño presentan un área superficial mayor, mientras que a mayor tamaño su área superficial es menor, son inversamente proporcionales.

Tabla 2.
Área superficial de las nanopartículas de TiO₂

Tamaño de partícula (nm)	Área de superficie (m²/g)	Tamaño de partícula (nm)	Área de superficie (m²/g)	Tamaño de partícula (nm)	Área de superficie (m²/g)
3.03	518	16	102.1	28.57	50
4.32	329.07	18.33	77.92	29	145
5-10	317	20	50	30	55
5	250	25	45-55	34	50
6	253.9	26	61.5	38	41.2
6.8	162	27	57.4	53	29.7
10.1	140.9	27.4	52.1	65-75	10

Nota. Adaptado de Kumar et al., (2021); Allen, et al., (2021); Bui et al., (2020)

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio genera especies reactivas de oxígeno (radicales hidroxilos, los aniones superóxido, el oxígeno singulete y el peróxido de hidrogeno), que oxidan una amplia gama de compuestos orgánicos (Ono et al., 2022).

Sin embargo, debido a la pequeña superficie específica, el material de dióxido de titanio tiene una cinética lenta para los procesos catalíticos, lo que reduce la velocidad de reacción catalítica. Esto dificulta seriamente su aplicación práctica en el campo de la catálisis. Para resolver estos problemas y mejorar la eficiencia del catalizador, los investigadores han adoptado varias estrategias, desde la modulación de la estructura intrínseca hasta la incorporación de metales preciosos (Yue et al., 2020).

La mayoría de los procesos fotocatalíticos tienen una eficiencia baja, con frecuencia menor al 10%, esto se da por pérdidas por reflexión y dispersión, además de la recombinación de huecos de electrones a las intensidades de luz que normalmente se encuentran en los fotoreactores (Fujishima et al., 2000; Hoffman et al., 1995).

Sin embargo, la ventaja clave de la fotocatalisis sobre otros POAs, es que no requiere de adición química para generar radicales (OH) (Linden & Mohseni, 2014).

- **Propiedades Físicas y Químicas.**

En la Tabla N°3, se muestran las propiedades físicas y químicas del dióxido de titanio (TiO₂).

Tabla 3.
Propiedades Fisicoquímicas del TiO₂.

Parámetro	Valor
Aspecto	Forma: Polvo
Color	Blanco
Olor	Inodoro
Punto de fusión/ Punto de congelación	Punto/intervalo de fusión: 1850°C
Punto de ebullición inicial e intervalo de ebullición	2500 – 3000 °C
Inflamabilidad (sólido, gas)	El producto no es inflamable
Densidad	4.26 g/cm ³ a 25°C
Solubilidad en agua	0.001 g/L a 20°C
Propiedades comburentes	Ningún
Densidad aparente	Aprox. 850 kg/m ³

Fuente: Adaptado de Sigma – Aldrich (2024).

- **Estructuras de TiO_2 .**

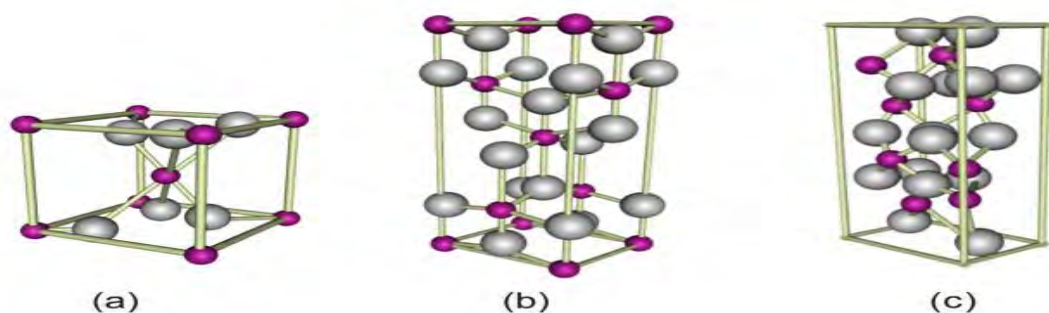
En general, la aplicación de TiO_2 depende fuertemente de la fase cristalina presente, así como de la cristalinidad, morfología, área superficial y la reactividad fotoquímica en el medio de reacción (Mamun et al., 2019) (Akpan & Hameed, 2009). El TiO_2 se encuentra principalmente en una de sus tres fases cristalinas: anatasa, rutilo, brookita y mezclas de ellas. En la Figura 2., podemos apreciar las tres estructuras cristalinas de la anatasa, rutilo y brookita que están formadas por octaedros de TiO_2 , unidos de forma diferente, compartiendo vértices y aristas, lo que les confiere propiedades fisicoquímicas muy interesantes.

Respecto a la síntesis de fases de TiO_2 , la fase anatasa generalmente muestra mayor eficiencia para sus diferentes propiedades y aplicaciones en comparación con las fases rutilo y brookita (Pelaez, et al., 2012; Chalastara et al., 2020). Sin embargo, el rutilo presenta algunas ventajas sobre la anatasa como su mayor estabilidad química, mayor índice de refracción y menor costo de producción, mientras que la fase brookita es la menos estudiada debido a las dificultades en la obtención en la fase pura

Por esta razón, las fases anatasa y rutilo se presentan frecuentemente como las más utilizadas y estudiadas (Mamun et al., 2019; Tran et al., 2017).

Figura 2

Celdas unitarias y estructuras cristalinas del a) Rutilo, b) Anatasa, c) Brookita



Nota. (Khataee & Mansoori, 2012)

2.2.5. Nanopartículas Soportadas.

Las nanopartículas soportadas (SNPs); son partículas ancladas o integradas en un material sólido, lo que mejora su estabilidad y funcionalidad (Lau et al., 2015). Controlar su distribución en el soporte incrementa la estabilidad del catalizador al evitar el crecimiento y la desactivación de las partículas (Prieto et al., 2012). Asimismo, las interacciones electrónicas entre nanopartículas metálicas y óxidos del soporte son determinantes para su rendimiento catalítico, y su tamaño puede regularse mediante métodos de síntesis asistidos por ligandos (Lykhach et al., 2015; Rossi et al., 2009).

Aunque las partículas en suspensión ofrecen una mayor área superficial y mayores rendimientos foto catalíticos, su aplicación a gran escala no es viable debido a procesos posteriores como la filtración, especialmente en el caso del TiO_2 , lo que incrementa significativamente los costos (McCullagh et al., 2011). Por ello se emplean catalizadores inmovilizados, que permiten operar de forma continua y se adaptan a distintos tipos de reactores, como batch, CSTR, PFR, PBR, tanques agitados o tubulares.

Entre los materiales usados como soporte destacan el vidrio, polímeros, arena de cuarzo, sílice gel, metales, cerámicas, fibras, arcillas, zeolitas, alúmina y carbón activado.

Al diseñar un proceso basado en el uso de fotocatalizadores soportados se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El material o matriz que soporta al catalizador debe ser inerte durante todo el proceso de reacción.
- El TiO_2 soportado debe mantener su utilidad y vida útil por varios ciclos, evitando envejecimiento o envenenamiento prematuro.

- La superficie expuesta del catalizador es menor que en suspensión, por lo que debe garantizarse una buena eficiencia de remoción mediante velocidades de operación moderadas.

Debe existir una fuerte adherencia entre el TiO_2 y el soporte, para evitar desprendimiento por abrasión y la consecuente reducción de la actividad fotocatalítica.

2.2.6. Fotocatálisis.

La fotocatálisis es un proceso donde asocia a la fotoquímica y catálisis. Este hecho implica que la luz y un catalizador son importantes para llevar a cabo o acelerar una transformación química (Moura & Picao, 2022).

La fotocatálisis es una reacción de oxidación que se da o produce cuando una fuente de luz ya sea natural o artificial activa un catalizador en presencia de oxígeno. Es un proceso de oxidación avanzada que se aplica en muchos tratamientos debido a la alta eficiencia en la degradación y mineralización de contaminantes orgánicos (Ji et al., 2022); contaminación gaseosa, incluidos los asociados con compuestos orgánicos, compuestos fenólicos, colorantes, antibióticos y productos farmacéuticos, desinfectantes, además de contaminantes del aire como tolueno, benceno, formaldehído, NO_x , SOX, ozono y CO (Yuan et al., 2021). Todos los fotocatalizadores son básicamente semiconductores (Ameta et al., 2018).

Según Solanki et al., (2018); la fotocatálisis es un fenómeno en el que se genera un par electrón (e^-) hueco (h^+) al exponer un material semiconductor a la luz.

La fotocatálisis constituye una herramienta muy prometedora para la limpieza medioambiental. Es muy eficaz en el tratamiento de contaminantes ambientales debido a su propiedad redox única (Sadeghfar & Ghaedi, 2021).

Las reacciones fotocatalíticas se clasifican en dos tipos según el estado físico de los reactivos: fotocatálisis homogénea y fotocatálisis heterogénea.

- **Fotocatálisis Homogénea.**

Según Solanki et al., (2018) una fotocátalisis homogénea se da cuando el semiconductor y el reactivo están en la misma fase, es decir: se da en fase gaseosa, solida, o liquida; a estas reacciones fotocatalíticas se les denomina fotocátalisis homogénea.

Los complejos de metales de transición son fotocatalizadores homogéneos comunes, porque presentan una estabilidad y banda prohibida electrónica; adecuada para realizar fotocátalisis homogénea, los procesos más utilizados por fotocatalizadores homogéneos contienen ozono y proceso foto – fenton (Tahir et al., 2020).

- **Fotocatálisis Heterogénea.**

La fotocátalisis heterogénea es un tipo de catálisis basada en la absorción de energía radiante por un sólido, normalmente un semiconductor de banda ancha. De esta manera, en la región entre las fases del solido excitado y la solución, tienen lugar reacciones redox que pueden propiciar la remoción de los contaminantes, las cuales pueden darse de dos maneras:

- Por acción directa sobre el semiconductor.
- Por acción sobre moléculas absorbidas en la superficie de este (colorantes o moléculas orgánicas) (Gaya, 2014; Hakki et al., 2022).

En el primer caso, el semiconductor interactúa directamente con los fotones que inciden en su superficie, mientras que en el segundo la excitación se lleva a cabo sobre las moléculas adsorbidas que transportan electrones al catalizador (Madriz et al., 2018). Los grandes beneficios de la fotocátalisis heterogénea dependen de su capacidad para generar especies reactivas de oxígeno bajo irradiación de luz visible (Karim et al., 2022).

El principio de la fotocátalisis heterogénea se basa en la promoción de electrones de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) a través de la iluminación de un semiconductor con fotones de energía igual o mayor que su energía de brecha (Moura & Picao,

2022); durante la fotocatalisis heterogénea ocurre varias reacciones, como la oxidación, la deshidrogenación, la transferencia de hidrogeno y la deposición de metales entre otras. El proceso de la fotocatalisis heterogénea ocurre mediante:

- Transferencia de los reactivos en la fase fluida.
- Adsorción de los reactivos en la superficie del catalizador.
- Reacción fotocatalitica en la fase adsorbida.
- Absorción de fotones por el catalizador (sin reacción fotoquímica)
- Formación de electrones (e^-) y huecos (h^+) foto inducidos
- Las cargas fotogeneradas se transfieren a la superficie del catalizador e inicia las reacciones de transferencia de electrones (Iono sorción, neutralización de carga, formación de radicales, reacciones superficiales)
- Desorción de los productos finales de la fotocatalisis
- Transferencia de masa de los productos de la fotocatalisis de la fase fluida
- Parámetros que influyen en la fotocatalisis heterogénea.

Según Garces et al., (2020) los parámetros que influyen tanto cualitativamente como cuantitativamente en el proceso de oxidación – reducción fotocatalizado son:

pH: El pH es uno de los parámetros con influencia en las reacciones fotocataliticas, su efecto en el proceso afecta significativamente en la carga superficial, potencial de oxidación/reducción y posiciones de las bandas de energía. Según Ayati (2019); este proceso es eficaz en medio acido en un pH de 5.5 a 6.5.

Característica y concentración del catalizador: En el procedimiento de reacción de fotocatalisis, es beneficioso si la sustancia catalizadora posee un área superficial elevada, una distribución del tamaño de las partículas uniforme, una forma esférica de las partículas y la

falta de porosidad interna. El rango de concentraciones ideal para el dióxido de titanio (TiO_2), se sitúa entre 0.1 - 5.0 g/L (Garces et al., 2020).

Temperatura: La variación de la temperatura del sistema no modifica apreciablemente la velocidad de las reacciones (Purnawan, et al., 2023).

Intensidad de la radiación: Según Wahyuni et al. (2016); la modificación de un orden parcial de 1 a 0.5 implica que la recombinación de ebv^- (energía de banda de valencia) y hbc^+ (hueco positivo en la banda de conducción); empieza a restringir la utilización de los fotones existentes, mientras que la transición a un orden cero señala que el sustrato no puede producir más pares, incluso si la intensidad de la radiación se incrementa.

Diseño del reactor: Elementos como la geometría, la distribución óptica de la luz, el tipo de flujo, entre otros, participan en el desempeño final del procedimiento. Los parámetros derivados del diseño y clase del reactor son esenciales para el resultado final de la reacción (Mamun et al., 2019).

Tiempo: Cuanto mayor tiempo transcurre una reacción se acerca a la reacción total, los picos mayores de reacción ocurren dentro de 120 minutos para la obtención del valor óptimo de degradación (Shahrezaei et al., 2012).

Aditivos: Cuanto más efectivo es el oxidante en la captura de huecos, mayor será la velocidad del proceso entre el oxidante más estudiado es el peróxido de hidrogeno.

Características del catalizador: A menudo se utilizan polvos de radios micrómetros para aprovechar mayor área superficial del catalizador. Se ha demostrado que la estructura anatasa del óxido de titanio tiene mayor capacidad catalítica como tratamiento fotocatalítico, así como una buena actividad fotoactividad (Zhang et al. 2017).

2.2.7. *Materiales Fotocatalíticos.*

Los materiales semiconductores que se aplican como fotocatalizadores son los óxidos metálicos o sulfuros tales como: ZnO, TiO₂, Fe₂O₃, CdS, MgO, WO₃ y el ZnS. Sin embargo, el que procese las siguientes propiedades como la fotoactividad, inercia biológica y química, estabilidad hacia la fotocorrosion, idoneidad para la luz visible o cercana a la luz ultravioleta, bajo costo y falta de toxicidad es el fotocatalizador ideal (Maury, 2006).

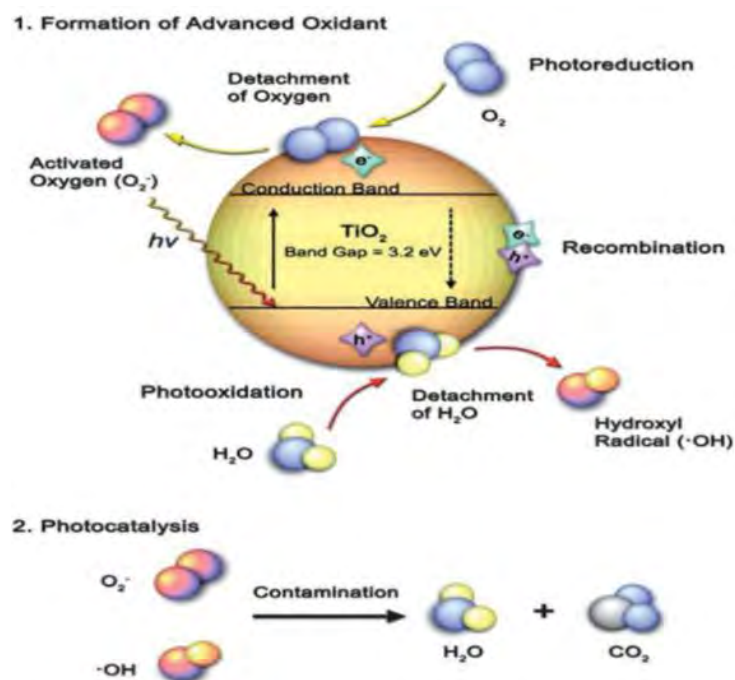
2.2.8. *El Dióxido de Titanio (TiO₂) en la Fotocatálisis Heterogénea.*

El proceso fotocatalítico heterogéneo que involucra el uso de dióxido de titanio (TiO₂) ha sido ampliamente investigada y aprobado como un proceso limpio y ecológico, además, de atractivo para el tratamiento de muchos contaminantes en el agua (Cunha et al., 2018).

Existen múltiples semiconductores como: TiO₂, ZnO, Al₂O₃ y Fe₂O₃. Pero el fotocatalizador más usado es el dióxido de titanio (TiO₂) del tipo anatasa y rutilo, debido a que presenta una mayor actividad fotocatalítica (Giraldo et al., 2004).

En la Figura N°3, se presenta el mecanismo de fotocatálisis según Pant et al., (2019); aquí el fotosensibilizador se irradia con fotones cuya energía supera al ancho de brecha ($h\nu > E_g$), donde la absorción de los fotones promueve el paso del electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, creando un par electrón/hueco (e^-/h^+).

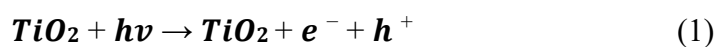
Figura 3
Diagrama del mecanismo de oxidación - reducción



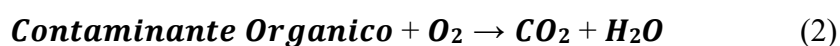
Nota. Adaptado de Pant et al. (2019)

Durante la fotocatalisis del TiO_2 , se somete a una radiación de longitud de onda menor a 400 nm, formando pares de electrón – hueco (e^-/h^+) que reaccionan con moléculas de agua, el oxígeno presente en dicho cuerpo genera radicales hidroxilo y superóxido que oxidan las moléculas orgánicas hasta mineralizarlas (Galvez et al., 2015)

- Reacción del TiO_2 sometida a radiación:



- Reacción global de fotocatalisis Heterogénea.

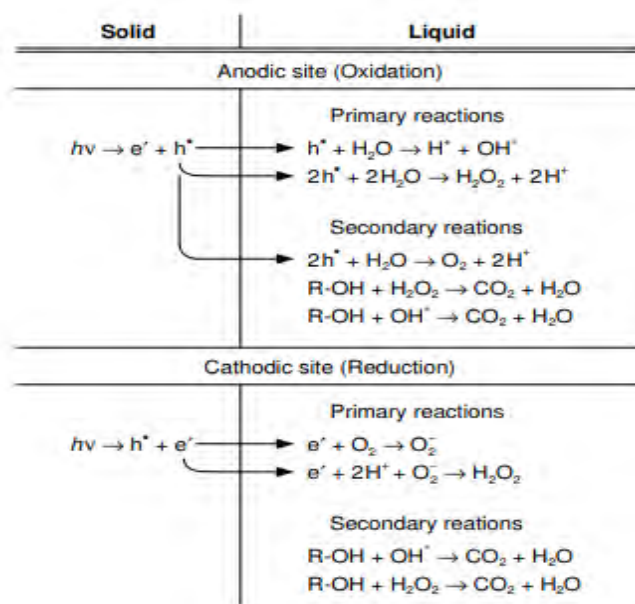


En presencia de un semiconductor, $h\nu$ (energía de un fotón).

A continuación, en la Figura N° 4, se observa el proceso de oxidación y reducción en el proceso TiO_2/UV y las diferentes reacciones primarias y secundarias que se generan durante la reacción.

Figura 4

Reacciones inducidas por la luz en sitios anódicos y catódicos para el TiO_2 .



Nota. (Bak et al., 2010)

Cuando la luz ya sea artificial o natural incide en la superficie del fotosensibilizador se libera un electrón (e^-) desde la banda de valencia (BV), hacia la banda de conductividad (BC); este electrón ataca al oxígeno molecular (O_2) transformándolo en un super anión (O_2^*). Por lo tanto, el espacio o hueco (h^+) dejado por el electrón ataca la molécula del agua convirtiéndolo en un radical hidroxilo (OH^*) (Salcedo, 2017).

2.2.9. Detergentes.

Los detergentes son compuestos orgánicos sintéticos que poseen propiedades limpiadoras, usados mayormente en el lavado doméstico, lavado de ropa y en productos de limpieza personal. Se caracterizan por no formar fácilmente sales insolubles con metales tales como el calcio y el magnesio. El tensoactivo es el ingrediente básico de limpieza del detergente, mientras que el constructor (generalmente compuestos de fosfato) ayuda al tensoactivo a trabajar eficientemente. Los detergentes contienen más de 25 ingredientes diferentes que se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Tensoactivos (aniónicos, catiónicos, no iónicos, anfóteros).

- Constructores (polifosfatos, silicatos, EDTA, carbonatos, zeolitas, etc.).
 - Agentes blanqueadores (perborato de sodio, hipoclorito de sodio).
 - Aditivos (enzimas, perfumes, polímeros, colorantes, inhibidores de corrosión, etc.)
- (Smulders, 2002).

Función y Clasificación.

Para poder comprender como actúan los detergentes se debe recordar la propiedad de tensión superficial del agua.

La tensión superficial es la propiedad donde la superficie del líquido se comporta como una película elástica, pues las moléculas en la superficie poseen fuerzas intermoleculares que las empujan hacia abajo y hacia los lados, pero no hacia arriba. En consecuencia, las moléculas están siendo atraídas hacia el líquido ocasionando que la superficie se tense como si fuera una película fina elástica. Esta tensión produce el acumulamiento de agua en las superficies dificultando el proceso de limpieza (Association, 2004).

El cambio que presentan en la tensión superficial se debe a la presencia de una sustancia activa denominada surfactante.

2.2.10. Tensioactivos.

Los tensoactivos o surfactantes, o agentes de actividad superficial, son moléculas orgánicas grandes disueltos en otro solvente. Los tensoactivos son ampliamente utilizados para bajar la tensión superficial entre dos líquidos o entre un sólido y un líquido. Esto los hace adecuados para la producción de detergentes, agentes humectantes, emulsionantes, agentes espumantes y dispersantes (Lara et al., 2011). Estos compuestos provienen de la descarga de los detergentes domésticos, lavanderías industriales y otras operaciones de limpieza (Sanderson et al., 2006); que terminan desembocando en las estaciones/plantas de tratamiento de agua residual a través de las redes domésticas e industriales (Carvajal, 2011).

Las características surfactantes de los detergentes se deben principalmente a su estructura anfifílica, esto significa que tienen en su estructura química:

Un grupo hidrofílico: denominado polar (con afinidad al agua), la parte hidrofílica corresponde a la parte polar de la molécula, que puede ser iónico o no iónico. La parte polar es soluble en agua; mientras que la cadena hidrocarbonada es soluble en aceites o grasas (Palmer & Hatley, 2018).

Un grupo hidrofóbico: denominado no polar (con afinidad a las grasas), el grupo hidrofóbico es un radical hidrocarburo que contiene de 10 a 20 átomos de carbono en una cadena recta o ligeramente ramificada (Palmer & Hatley, 2018).

En la Figura N° 5, se muestra la estructura simplificada del surfactante, en el grafico se puede visualizar la parte hidrofílica (1) la que presenta afinidad con el agua y la parte hidrofóbica (2) el grupo con afinidad a las grasas.

Figura 5
Estructura simplificada de un surfactante (el grupo hidrófilo unido a un grupo hidrofóbico)

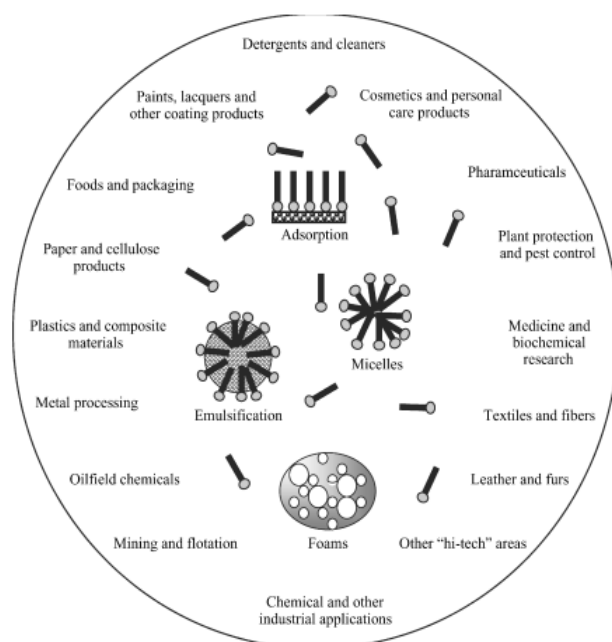


Nota. (Myers, 2006)

La Figura N° 6., muestra las principales áreas de aplicación de alto impacto para tensoactivos y otras sustancias anfifílicas, entre las que se puede observar los detergentes y materiales de limpieza.

Figura 6

Algunas áreas importantes de impacto de aplicación surfactantes.



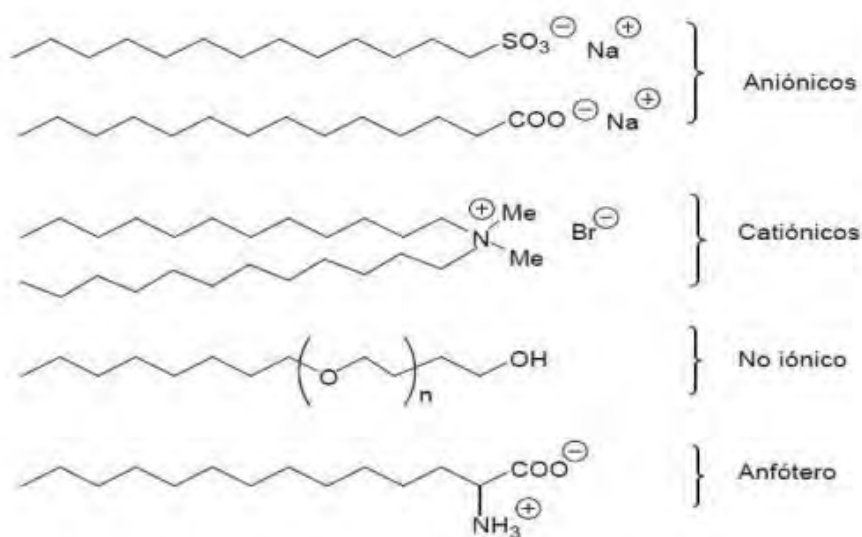
Nota. (Myers, 2006)

Los agentes tensioactivos se clasifican en base a la naturaleza del grupo hidrófilo, con subgrupos basados en su naturaleza hidrófoba o cola, como sigue (Myers, 2006); además, que se puede observar en la Figura N° 7:

- **Aniónico**, el grupo hidrófilo está cargado negativamente tal como carboxilo ($\text{RCOO}^- \text{M}^+$), sulfonato ($\text{RSO}_3^- \text{M}^+$), sulfato ($\text{ROSO}_3^- \text{M}^+$) o fosfato ($\text{ROPO}_3^- \text{M}^+$).
- **Catiónico**, el grupo hidrófilo lleva una carga positiva como, por ejemplo, en los haluros de amonio cuaternario ($\text{R}_4\text{N}^+\text{X}^-$), los cuatro grupos R- pueden no ser todos iguales (rara vez lo son), pero generalmente serán de la misma familia general.
- **No iónicos**, el grupo hidrófilo no tiene carga, su solubilidad en agua se deriva a partir de grupos altamente polares tales como polioxietileno (POE o $\text{R-OCH}_2\text{CH}_2\text{O}-$) o grupos poliol R incluyendo azúcares.
- **Anfóteros**, (zwitterionico) contienen, tanto una carga negativa como una carga positiva, tales como las sulfobetainas $\text{RN}^+(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3^-$

Figura 7

Clasificación de los Agentes tensioactivos en base a la naturaleza del grupo hidrófilo.

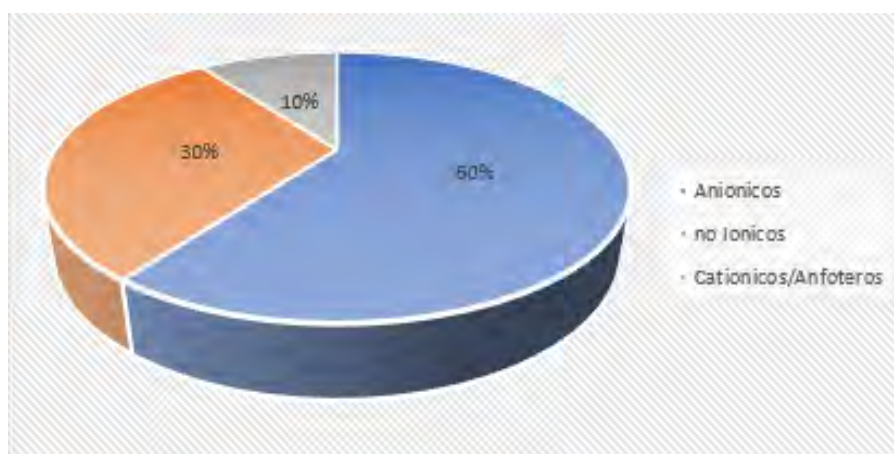


Nota. (Myers, 2006)

En la Figura N° 8, Los tensioactivos más comunes son los aniónicos y se encuentran presentes alrededor del 60% de la producción mundial de tensioactivos mientras que los no iónicos representan el 30% los anfóteros y catiónicos un 10% (Palmer & Hatley, 2018).

Figura 8

Producción mundial de Tensioactivos



Nota. Adaptado a Palmer y Hatley (2018).

Tabla 4

Tensoactivos más utilizados según Palmer y Hatley.

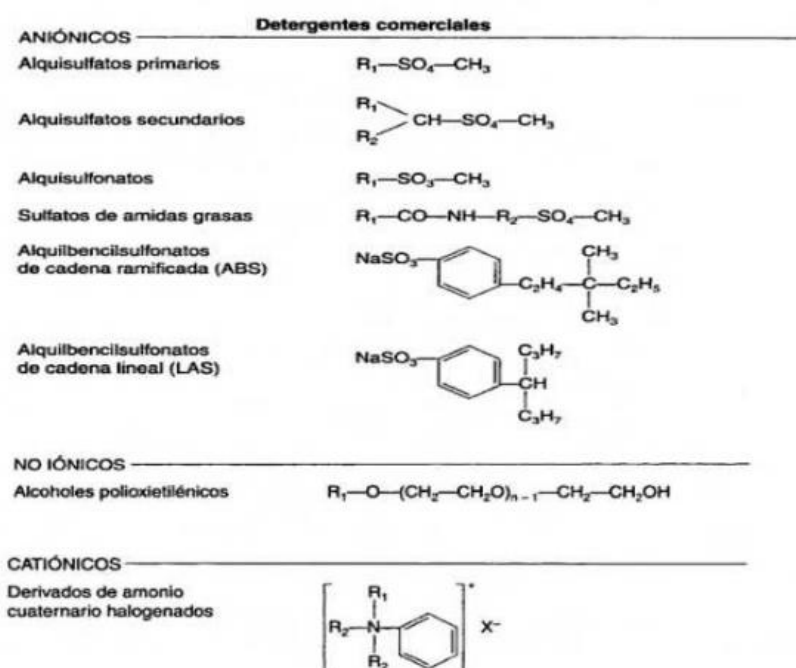
Clase de Tensoactivos	Nombre del Tensoactivo
Aniónico	• Sulfonatos de alquilbenceno lineal (SDS) • Sulfonatos de alcanos secundarios (SAS) • Sulfatos de Éter de alcohol (Alquil Etoxi) (AES)
Catiónico	• Compuestos a base de amonio cuaternario (QAC) • Haluros de alquiltrimetilamonio (TMAC) • Haluros de alquildimetilamonio (DMAC)
No iónico	• Etoxilatos de alquifenol (APE o APEO) • Etoxilatos de alcohol (AE o AEO)

Nota. Palmer y Hatley (2018).

En la Tabla N°4, según Palmer y Hatley (2018); nos presenta los tipos de tensoactivos de uso frecuente y el nombre de cada uno de ellos correspondiente a su respectiva clase.

Figura 9

Detergentes Comerciales.



Nota. Adaptado Myers (2006).

Los tensoactivos constituyen la materia activa de los detergentes. La familia más utilizada de los tensoactivos son los de tipo aniónico. De este grupo, los sintéticos más utilizados son los alquilbenceno sulfonatos lineales (SDBS), los alcoholes etoxilados sulfatos (AES) y los alquil sulfatos (AS) (Zamudio, 2010).

Los alquilbencensulfonatos lineales (SDBS) son los más importantes tensoactivos o surfactantes sintéticos empleados en los detergentes domésticos. La producción mundial es de aproximadamente 4.0 millones de toneladas por año (Garcia & Pezo, 2011).

En tanto los (SDBS); es una mezcla de compuestos lineales que tienen cadenas de 10 a 14 átomos de carbono y sus respectivos isómeros en las diferentes posiciones. En promedio una muestra comercial de detergente contiene moléculas de SDBS en aproximadamente las siguientes proporciones: C₁₀ 3.9%, C₁₁ 37.4%, C₁₂ 35.7%, C₁₃ 23.1%, y C₁₄ 0.2%.

El C₁₂ (SDBS), es uno de los componentes representativos en las formulaciones de los detergentes domésticos y presenta propiedades físicas, químicas y toxicológicas intermedias entre los componentes de SDBS de cadena corta C₁₀, C₁₁ y los de cadenas largas C₁₃ y C₁₄ (Visitacion & Gamboa, 2006). Los detergentes comerciales contienen una mezcla de diferentes isómeros, con cadenas alquílicas de 10 a 14 átomos de carbono. En total se puede encontrar 26 isómeros del alquilbencensulfonato lineal. Al igual que otros tensoactivos (Tolls et al., 2022).

En la Tabla N°5. se muestran características de algunos alquilbencensulfonatos lineales de 12 carbonos (C₁₂), el más común, y de algunos de cadena lineal entre 10 y 13 carbonos "C₁₀ – C₁₃".

Tabla 5.
Propiedades de SDS.

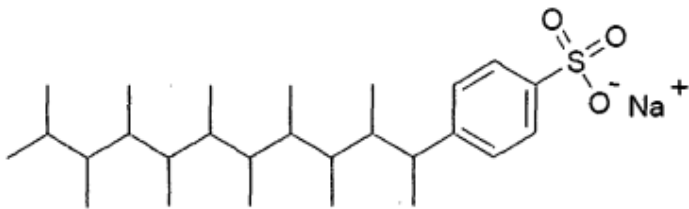
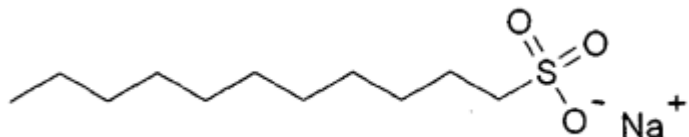
Aspecto físico	Solido
Peso molecular de "C ₁₀ – C ₁₂ "	338 – 356 g/mol
Densidad C ₁₂	1.06 g/cm ³
Solubilidad C ₁₂	250 g/L

Nota. Programme UNEP (2022).

- **Clasificación.**

Los detergentes utilizados en los diferentes procedimientos de lavado, de acuerdo a su estructura y capacidad de biodegradación se clasifican en (ver Tabla N° 6):

Tabla 6
Clasificación de los detergentes aniónicos.

Nombre	Estructura
SDBS	
SDS	

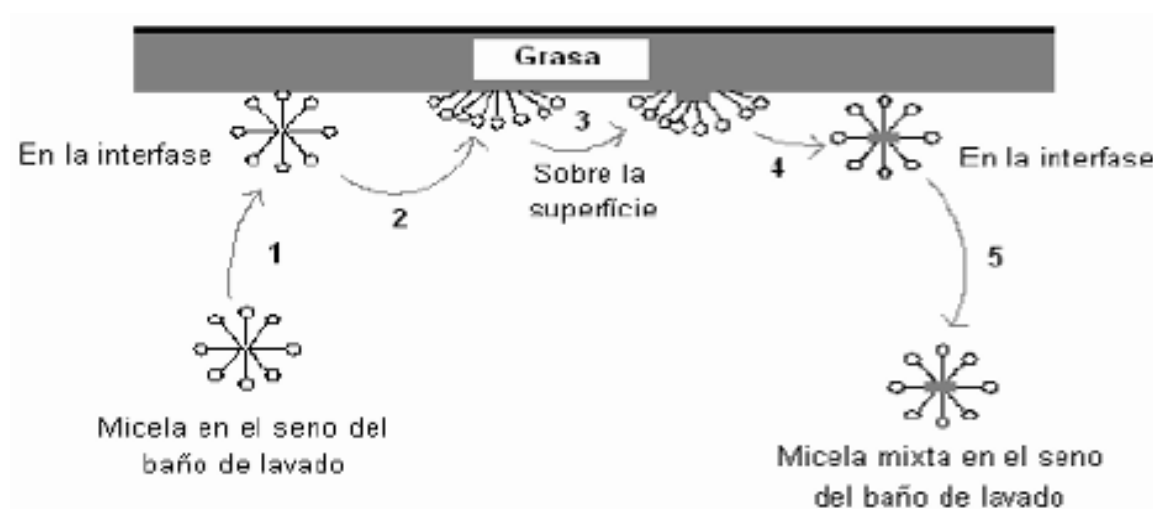
Nota. Visitacion y Gamboa (2006).

Los surfactantes que contienen laurilsulfato de sodio son biodegradables, aunque su uso en el hogar es limitado (Myers, 2006).

En el proceso de lavado intervienen dos mecanismos importantes, la solubilización y la emulsificación.

En el primer mecanismo es la solubilización o disolución de las grasas. Las sustancias con contenido de grasas o aceitosas (suciedad) no se disuelven fácilmente en agua, por lo tanto, es necesario la acción de los detergentes para la eliminación. Al combinar detergente con agua, los tensoactivos forman una dispersión de micelas. Estas son asociaciones de moléculas que orientan sus cabezas polares hacia la superficie en contacto con el agua y sus colas hidrofóbicas hacia adentro (Chan et al., 2021).

Figura 10
Solubilización de las sustancias aceitosas.



Nota. Chan et al. (2021).

En la Figura N° 10, (paso 1, 2 y 3), se observa que las micelas se difunden en el agua, se fijan sobre la superficie a limpiar y se mezclan con la suciedad. En ese momento, la tensión interfacial se reduce y el conjunto micela – suciedad, se libera de la superficie y difunde en el lavado.

En cambio, la emulsificación viene a ser el segundo mecanismo. Esta se genera o se da en la interfase suciedad/agua y sustrato/agua.

En la Figura N° 10, (paso 4 y 5), se observa que una vez que la superficie de la grasa está rodeada por varias micelas de tensoactivos se forma una micela grande con la grasa en el centro. Dicha grasa se suspende fácilmente en el agua ya que está rodeada de los grupos polares

del tensoactivo, es decir, emulsiona. Con estos dos mecanismos de limpieza logran separar la suciedad del sustrato (Rocha et al., 2020).

2.3. Marco Conceptual.

- **Agua Residual.** El agua residual es el agua cuya calidad ha sido alterada por actividades domésticas, comerciales, industriales o agrícolas y que contiene contaminantes físicos, químicos o biológicos, por lo que requiere tratamiento antes de su descarga o reutilización (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2023).
- **Agua Residual Grises.** Son las aguas residuales domésticas provenientes de duchas, bañeras, lavamanos y lavanderías, excluyendo las aguas negras procedentes de los inodoros. Generalmente representan entre el 50 % y el 80 % del volumen total de las aguas residuales domésticas y, debido a su menor carga de patógenos, constituyen una fuente potencial para su tratamiento y reutilización en usos no potables (Filali et al., 2022).
- **Tensoactivo.** Un tensoactivo o surfactante es una molécula anfifílica constituida por una parte hidrofílica (afinidad por el agua) y una parte hidrofóbica (afinidad por compuestos no polares). Al adsorberse en la interfaz entre dos fases, como agua-aire o agua-aceite, disminuye la tensión superficial e interfacial, facilitando procesos como la humectación, emulsificación, dispersión, detergencia y formación de espuma (Ghosh et al., 2020).
- **Radical Hidroxilo.** Es una especie reactiva del oxígeno (ROS) con un elevado potencial de oxidación, considerada uno de los oxidantes más potentes en los procesos avanzados de oxidación y la fotocatálisis (Hassaan et al., 2023).
- **Catalizador.** Es una sustancia que aumenta o reduce la velocidad de una reacción química sin consumirse ni alterarse permanentemente en el proceso (Piraque & Parroquiano, 2021).

- **Reacción fotocatalítica.** La reacción fotocatalítica es un proceso en el que un semiconductor absorbe luz y genera pares electrón-hueco ((e-/h+)), los cuales producen especies reactivas, como los radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$). Estas especies participan en reacciones de oxidación y reducción que permiten degradar contaminantes orgánicos y eliminar microorganismos (Ren et al., 2021).
- **Material soportado.** Los materiales soportados son sustratos utilizados para inmovilizar fotocatalizadores, mejorando su dispersión, estabilidad, recuperación y reutilización. Soportes como vidrio, zeolitas, sílice, alúmina y materiales carbonosos pueden favorecer la eficiencia fotocatalítica en aplicaciones ambientales, especialmente en el tratamiento de aguas (Li et al., 2022).

2.4. Enfoque, tipo y alcance de la investigación.

2.4.1. Tipo de investigación.

Siguiendo lo mencionado por Hernández et al. (2014); el tipo de investigación es básica, debido a que se evaluó el efecto de las variables independientes (cantidades de soportado y oxidante) en la variable dependiente (degradación de SDS), y además se manipularon las variables independientes para analizar los efectos que tiene la manipulación sobre la variable dependiente (% de degradación de SDS); todo ello con la finalidad de generar información científica sobre el fenómeno de interés.

2.4.2. Alcance de la Investigación.

Al realizar la pregunta: “¿Cuál es la influencia de la cantidad de catalizador TiO_2 y la cantidad de oxidante H_2O_2 en la degradación del surfactante?”, se realizó una relación de causa y efecto en las variables las cuales buscaron observar el efecto de la degradación del contaminante con el método colorimétrico; debido a esto, el alcance de la investigación fue explicativa (Hernández et al., 2014).

2.4.3. Enfoque de la Investigación.

Al recolectar datos de los experimentos propuestos y realizar los análisis de estos datos haciendo uso de recursos numéricos y estadísticos para responder las preguntas de la investigación, el estudio realizado fue considerado cuantitativo (Hernández et al., 2014).

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general.

La aplicación de un proceso de fotocátalisis permite obtener un grado significativo de remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS) presente en aguas sintéticas, debido a la generación de especies reactivas capaces de degradar el contaminante.

2.5.2. Hipótesis Específicas.

- La cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) influye significativamente en el grado de remoción del lauril sulfato de sodio (SDS) mediante un proceso de fotocátalisis en aguas sintéticas, de manera que una cantidad adecuada de TiO_2 favorece una mayor degradación del contaminante.
- La cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) y del peróxido de hidrogeno (H_2O_2), en la mezcla tienen efecto sobre la remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio por fotocátalisis en aguas sintéticas.
- Los sistemas de fotocátalisis presentan diferencias significativas en el grado de remoción del lauril sulfato de sodio (SDS) en aguas sintéticas, siendo el sistema que combina TiO_2 y H_2O_2 bajo irradiación UV el que logra una mayor remoción del contaminante.
- El proceso catalítico presenta un mayor grado de remoción del lauril sulfato de sodio (SDS) en aguas sintéticas en comparación con el proceso de fotólisis utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS.

3.1.Población y muestra

Para la presente investigación se utilizó agua sintética como población de estudio. Debido a que la población fue de tamaño reducido, la muestra estuvo conformada por la totalidad de las unidades experimentales. El agua sintética fue preparada utilizando agua destilada y Lauril Sulfato de Sodio (SDS), en las concentraciones establecidas para el desarrollo de los tratamientos experimentales.

3.2.Materiales (reactivos, equipos e instrumentos)

En las tablas N° 07, 08 y 09 se muestran la lista de materiales, reactivos, equipos e instrumentos utilizados en el presente trabajo de investigación.

Tabla 7
Lista de Materiales

Materiales	Marca
Peras de decantación de 250 mL	Pyrex
Anillos metálicos.	Instrumentos Metal
Soportes universales.	Instrumentos Metal
Fiolas de 100 mL y 1.0 L	Germany LMS y Pyrex
Vasos precipitados de 500, 250 y 100 mL	Pyrex
Agitadores magnéticos	Hanna HI731319
Luna de reloj	Pyrex
Pipetas de 5, 10 y 25 mL	Hirschmann
Pipeteador o propipeta.	DUAB Levo Plus 3M PE FOAM
Goteros de vidrio.	Ambar Laboratorio
Pliegos de papel filtro.	Filter Lab
Pliegos de papel tisú	Elite ultra suave
Espátulas de laboratorio	ALUTECS

Tabla 8
Lista de Reactivos.

Reactivos	Marca
Lauril sulfato de sodio (SDS), $C_{12}H_{25}NaO_4S$ al 99% de pureza.	Chemilab
Agua destilada	Alkofarma
Dióxido de Titanio (TiO_2)	EMSURE REAG.PH EUR
Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2), 30%	Merck Millipore
Solución indicadora de Fenolftaleína, alcohólica	Merck Millipore
Hidróxido de sodio (NaOH), 99%	Merck Millipore
Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), 99%	Chemilab
Solución de Cloroformo ($CHCl_3$) $\geq 99.8\%$	AR® ACS, Macron Fine Chemicals™
Fosfato dihidrógeno de sodio hidratado ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$)	Merck Millipore
Azul de Metileno, 0.1%	Merck Millipore
Poliepoxido	Atenea.

Tabla 9
Equipos e Instrumentos.

Equipos. e Instrumentos	Marca/ Modelo.
01 cámara de fotocálisis 95 cm x 30 cm x 40 cm con revestimiento interno de espejos, con espesor de 3.0 mm.	Propiedad del Lab. de Hidrocarburos UNSAAC.
Espectrofotómetro UV-VIS GENESYS™	THERMO SCIENTIFIC
02 lámparas de luz UVC de 32W	OPALUX modelo OP-UV4A32-01
01 agitador magnético.	CAT M-6, Platillo: Ceran® o Acero inoxidable.
01 balanza analítica.	OHAUS modelo EX224, weighing capacity 220 g, precision: 0.1 mg, AC/DC input 230 V AC (universal plugs)
01 analizador XRF	Olympus Vanta XRF C series.
Baño isotérmico	AMETEK Brookfield - TC-102
Centrifuga de laboratorio	MPW M-UNIVERSAL

Pipeteador o Propipeta	Levo Plus BIOBASE
01 termómetro versión comercial	WOREN TP-101, Rango de temperatura: -50 a 300°C

3.3. Ámbito temporal y espacial

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de Hidrocarburos de la Escuela Professional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, seleccionado por su disponibilidad de equipos e instrumentos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos para el tratamiento de la muestra; el periodo considerado para la ejecución del estudio fue el comprendido entre los años 2025 y 2026.

3.4. Diseño de investigación.

El diseño general de la investigación fue experimental, ya que, este diseño permitió estudiar las cantidades del catalizador soportado con TiO_2 y el oxidante H_2O_2 ; como variables independientes para analizar sus efectos en la espectrofotometría UV mediante la determinación al azul de metileno del surfactante eliminado como variable dependiente; además, la manipulación de variables tomó en cuenta una metodología preestablecida de investigación aplicada a la práctica de laboratorio (Hernández et al., 2014).

3.5. Variables y Operacionalización de variables.

Tabla 10

Variables independientes y dependientes.

Variables en el Proceso Fotocatalítico.	
Variables Independientes.	• Cantidad de catalizador soportado, (TiO_2). • Cantidad de oxidante, (H_2O_2). • Cantidad de la mezcla del soportado y el oxidante (TiO_2) / (H_2O_2).
Variables dependientes.	• Porcentaje de remoción del tensoactivo (SDS).

Tabla 11

Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones o subvariables	Indicadores	Unidades	Tipo de variable
Cantidad de (TiO ₂).	El dióxido de titanio (TiO ₂) es un material semiconductor utilizado como fotocatalizador, capaz de generar especies oxidantes al ser activado mediante radiación adecuada.	Cantidad de TiO ₂ incorporada a la solución de SDS durante el tratamiento fotocatalítico, de acuerdo con los niveles establecidos en el diseño experimental.	Cantidad de fotocatalizador	Masa de TiO ₂	g	Razón
Cantidad de (H ₂ O ₂).	El peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) es un agente oxidante que puede generar especies altamente reactivas, como los radicales hidroxilos (OH), favoreciendo la degradación de contaminantes	Cantidad de H ₂ O ₂ al 30 % adicionada a la solución de SDS durante el proceso fotocatalítico, según los niveles establecidos experimentalmente.	Cantidad de oxidante	Volumen de H ₂ O ₂	mL	Razón
Cantidad de la mezcla de (TiO ₂) / (H ₂ O ₂).	La combinación del TiO ₂ y H ₂ O ₂ constituye un sistema de oxidación avanzada que favorece la generación de especies reactivas para la degradación de contaminantes orgánicos.	Combinación de las cantidades de TiO ₂ y H ₂ O ₂ establecidas en los tratamientos del diseño experimental.	Interacción de factores	Combinación TiO ₂ /H ₂ O ₂	g/mL	Razón
Remoción del tensoactivo (SDS)	La remoción es la disminución de la concentración de un contaminante presente en una solución como consecuencia de un proceso de tratamiento.	Porcentaje de disminución de la concentración de SDS después de someter la solución al proceso fotocatalítico TiO ₂ /H ₂ O ₂ .	Eficiencia de remoción	Porcentaje de remoción de SDS	%	Razón

3.6.Métodos.

3.6.1. Procedimientos.

Para la parte experimental del proceso de fotocátalisis se tomó como base las propuestas por diferentes investigadores Cruz & Sanchez (2024); Mendoza (2019); Masco (2017); Zarate & Torres (2023); Álvarez (2016); Taghi et al., (2014); Cubillos & Moncada (2006); Visitacion & Gamboa (2005); y Oyama et al., (2004).

El procedimiento experimental se dio inicio con la preparación de catalizador soportado del dióxido de titanio (TiO_2) con poliepoxido, seguidamente con el montaje del fotoreactor; posteriormente con la parte experimental del proceso de fotocátalisis y por último con la medición de la concentración del SDS en el equipo de espectrofotometría.

Elaboración del catalizador soportado dióxido de titanio (TiO_2), con poliepoxido.

Tomando en base la investigación realizada por Zarate & Mirano (2023), el material que se optó para soportar el TiO_2 fue el poliepoxido.

Preparación del Catalizador soportado.

La preparación del catalizador (nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y el poliepoxido se llevó acabo de la siguiente manera:

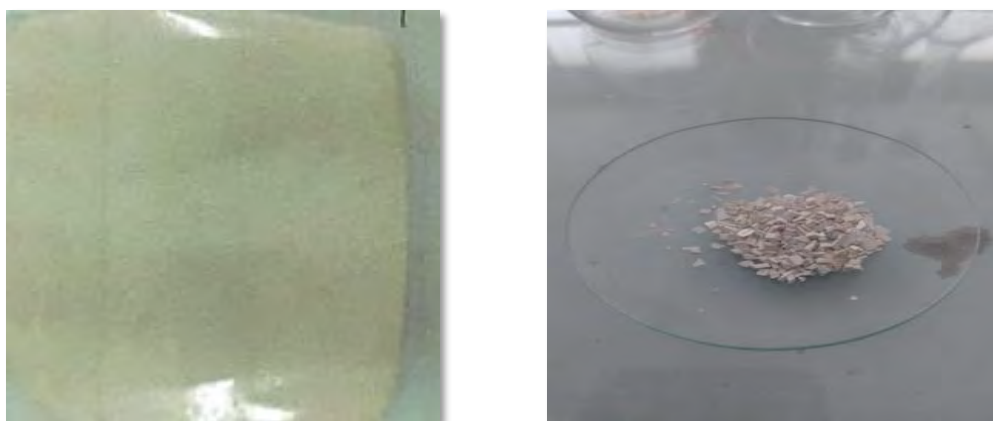
- Se mezclo del poliepoxido y el dióxido de titanio (TiO_2); relación en 1.2 gramos de TiO_2 / 3mL de poliepoxido.
- Se procedió al secado del molde durante 24 hrs a temperatura ambiente. Donde el tamaño del molde 4cm x 4cm x 0.20 cm.
- Se realizo la reducción por acción mecánica en el rango de 0.070 – 0.1 cm de diámetro.

Características de los catalizadores.

El material soportado se elaboró en forma de placas con dimensiones promedio de 4 cm × 4 cm y un espesor de 0.2 cm, con un peso entre 2.5 y 3.0 gramos cada una; posteriormente, estas placas fueron reducidas a fragmentos de tamaño entre 0.070 y 0.1 cm.

Figura 11

Dimensiones de la resina con dióxido de Titanio (TiO₂).



En la figura N°11, (derecha) se observa la mezcla del catalizador (Resina epoxica con el dióxido de titanio (TiO₂) en una base de plástico; mientras en la figura N° 11, (izquierda); se observa la obtención del material soportado reducido a porciones pequeñas (tamaño aproximado de 0.070 a 0.1 cm).

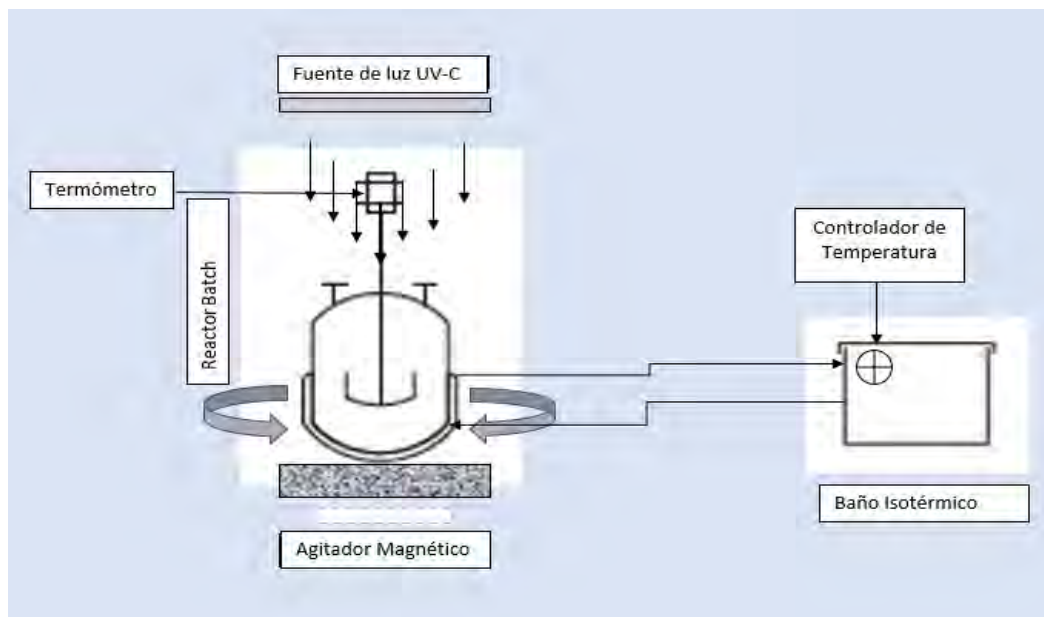
Se llevó a cabo la trituración de la estructura resultante previamente preparada, en unidades pequeñas con el propósito de prevenir su deposición en el reactor.

Montaje del fotoreactor batch isotérmico.

En la figura N°12, se observa la imagen del diagrama de instalación del fotoreactor empleado en el presente trabajo de investigación, estuvo constituido de un reactor batch, dentro de una caja refractaria recubierto de vidrio la cual estuvo expuesta a una fuente de radiación UV-C.

Figura 12

Diagrama de la instalación del Fotoreactor batch isotérmico



Nota. En la Figura N° 12, se menciona el diagrama donde se llevará a cabo el proceso de fotocatalisis.

Modulo del sistema del fotoreactor.

El sistema foto reactor empleado en este trabajo de investigación está compuesto por una caja refractaria de vidrio, que en su interior almacena el reactor batch con una capacidad de 2.0 litros, como fuente de radiación UV-C una lampara de 32 watts, un termómetro digital y un agitador magnético, donde este último tuvo como finalidad la homogenización de la muestra tanto con el soportado, oxidante y ambos componentes; de esta manera se garantiza el buen contacto entra la luz y la solución expuesta, esto con la finalidad de evitar la suspensión y generar mayor cantidad de iones OH^- . Además, el sistema también se compone de un equipo de baño isotérmico con el fin de mantener la temperatura de la solución a $(25 \pm 2^\circ\text{C})$. El set point del equipo está dirigido por un controlador en la parte superior de la caja que contiene el serpentín. El sistema está diseñado para realizar pruebas experimentales mediante condiciones controladas lo que permitió evaluar la degradación del surfactante (SDS), mediante el proceso de fotocatalisis.

En la figura N°13, se presenta el equipo de fotocátalisis instalado en el laboratorio de Hidrocarburos de la Facultad de Ingeniería de Procesos.

Figura 13
Sistema del Proceso Fotocatalítico



Nota. En la Figura N°13, se menciona el sistema donde se llevará a cabo el proceso de fotocátalisis, además de indicar cada una las partes del sistema: (1) reactor batch isotérmico, (2) agitador magnético, (3) lámpara UV (4) caja refractaria, (5) termómetro digital y (6) baño isotérmico.

Preparación de la muestra sintética.

La muestra en estudio que corresponde al lauril sulfato de sodio (SDS), en una concentración de 10 ppm se preparó de la siguiente manera: Daneshvar et al. (2002).

- 1) En un vaso de precipitados de 250 mL, se pesó 10 mg del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS).
- 2) Seguidamente se agregó agua destilada de preferencia a temperatura de 25°C, y se mezclaron estas dos sustancias con ayuda de una bagueta de vidrio hasta obtener la homogeneidad de la solución.
- 3) Luego se trasvasó a una fiola de 1000 mL y se agregó agua hasta el aforo.
- 4) Se agitó bien la solución, procurando descomprimir cada cierto tiempo para evitar la formación de exceso de espuma, una vez obtenida la solución, el recipiente se mantuvo cerrado herméticamente y de la exposición de la luz solar.

Figura 14

Preparación de la muestra sintética



Nota: En la figura 14 (derecho), se observa el pesado del tensoactivo; mientras que en el lado (izquierdo), se presenta la muestra sintética homogenizado y aforado.

Proceso de Fotocatálisis con dióxido de titanio.

El proceso de fotocatálisis con dióxido de titanio se realizó en el reactor fotocatalítico y consto de lo siguiente:

- Se encendió el reactor fotocatalítico 15.0 minutos antes con la finalidad de su acondicionamiento.
- Seguidamente se encendió el baño isotérmico, 20.0 minutos antes y se dejó setear a 25°C.
- Se encendió el equipo de espectrofotometría UV 45.0 minutos antes de iniciar las lecturas
- Una vez de haber tenido los equipos acondicionados para realizar las pruebas se procedió con la experimentación, en el cual se vertió la muestra en el reactor de paredes refractantes en la cantidad de 400 mL.
- Seguidamente se agregaron cantidades diferentes de nanopartículas de dióxido de titanio soportado en poliepoxydo (0.5, 1.0 y 2.0) gramos y se agitaron durante todo el proceso a 300 rpm por un promedio de 120 minutos.

- Cada tratamiento se realizó por duplicado.

A. Efecto de la cantidad de catalizador soportado (TiO₂)

Para la evaluación individual de la cantidad de catalizador, se realizaron 3 tratamientos experimentales, correspondientes a los tres niveles establecidos (0.5, 1.0 y 2.0) gramos, manteniendo constantes las demás variables del proceso y cada tratamiento se ejecutó con una réplica experimental, con la finalidad de reducir la variabilidad experimental y aumentar la confiabilidad de los resultados; en consecuencia, esta etapa comprendió un total de 6 tratamientos; en la tabla 12 se presenta el plan experimental para el dióxido de titanio.

Tabla 12.
Plan Experimental para el dióxido de titanio.

Bloque	Tratamiento	A: Cantidad de catalizador (g)	% D (SDS)
B1	T1	0.5	-
	T2	1	-
	T3	2	-
B2	T1	0.5	-
	T2	1	-
	T3	2	-

El porcentaje de remoción de la muestra (%D SDS), se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ DSDS} = \left(\frac{Ci - Cf}{Ci} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

% DSDS = Porcentaje de remoción del tensoactivo SDS.

Ci = Concentración inicial SDS (ppm).

Cf = Concentración final SDS (ppm).

Curva de Calibración.

Para medir el SDS, se construyó una curva de calibración, según Method Standards APHA (2019); para la curva de calibración se preparó una solución madre de 1000 mL del surfactante (SDS) a 10 ppm y a partir de esta solución se realizó diluciones de 0.5 a 10 ppm de (SDS). Se procedió a dar lectura a las diluciones del surfactante a la longitud de onda máxima obtenida, culminando las lecturas de todas las diluciones a la longitud de onda máxima; permitió obtener la ecuación de la recta mediante el método de mínimos cuadrados, para conocer las concentraciones desconocidas en ppm de las diferentes alícuotas.

Para la construcción de la curva de calibración del surfactante, se prepararon soluciones diluidas en un rango de 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 5.0 mg MBAS/L a partir de una solución patrón de 10 mg MBAS/L, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis para medir la absorbancia en la longitud de onda de 652 nm. Los datos obtenidos se utilizaron para generar la curva de calibración, la cual establece la relación entre la concentración del surfactante y su absorbancia, facilitando así la cuantificación precisa del surfactante en futuras muestras.

Medición de la cantidad de Sulfato lauril Sulfato (SDS).

- Se vertió la solución tratada foto catalíticamente a las peras de decantación, se agregaron 3.0 gotas de indicador de fenolftaleína, se adicionó gota a gota hidróxido de sodio NaOH 1N, hasta obtener un viraje de color rosado persistente, a continuación, se agregó gota a gota ácido sulfúrico H₂SO₄ 1N justo hasta la desaparición del viraje de color rosado.
- Se agregaron 3.0 gotas de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) al 30%, para evitar la decoloración del azul de metileno por sulfuros, en esta parte se tuvo que agitar el recipiente.

- Seguidamente se añadió 25 mililitros de Methylene blue reagent y 25 ml de CHCl_3 . Se agitó continuamente sin mucha fuerza por 30 segundos, abriendo la llave para liberar la presión acumulada en la pera de decantación, después de cada separación y se dejó separar las fases.
- Seguidamente se separó la fase clorofórmica pasando a una nueva pera de decantación o a un recipiente de 100 ml. Enjuagando la punta de la primera pera de decantación con un poco de cloroformo (CHCl_3); se repitió la separación por 2.0 veces más y empleando la cantidad de 25 mL de CHCl_3 en cada separación.
- Se combinaron todas las soluciones clorofórmicas en una segunda pera de decantación. Seguidamente se añadió 50 ml de solución de lavado y se movió continuamente durante 3.0 minutos. Se dejó reposar durante 5 minutos; y se extrajo la fase clorofórmica a través de un embudo de vástago delgado que contenía un tapón de algodón en un material de vidrio de 100 ml clase A. Se extrajo una vez más la solución de lavado con 25 ml de cloroformo.
- Seguidamente se recogieron todos los extractos clorofórmicos en el balón de 100 ml, y se completó a volumen aforo con cloroformo y se mezcló bien
- Luego se vertió en la celda de cuarzo unas $\frac{3}{4}$ partes el volumen de la solución, antes se tuvo que verificar que la celda no presentaba rayaduras, suciedad ni pelusas.
- Posterior a esto se hizo la lectura de las muestras en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 652 nm.
- Se registraron los resultados de absorbancia, para su posterior análisis.

B. Efecto de la cantidad de catalizador soportado (TiO₂) y el oxidante (H₂O₂).

El procedimiento para determinar el porcentaje de remoción del surfactante se basó en el método SMEWW–APHA–AWWA–WEF Part 5540 C, 24th Ed. (2022), Anionic Surfactants as MBAS y se siguió el mismo protocolo detallado en el anterior ítem (A), con la única modificación de que se incorporó cantidades de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% como agente oxidante durante el proceso de fotocátalisis; además, de ajustar el tiempo de exposición final de la muestra a 30 minutos.

Posteriormente, se evaluó el efecto conjunto de los factores (cantidad de catalizador) y (dosis de H₂O₂) mediante un diseño factorial de 3², considerando tres niveles para cada factor y la combinación de ambos factores dio lugar a 9 tratamientos experimentales; cada tratamiento se realizó con una réplica, con el propósito de garantizar la reproducibilidad de los resultados y disminuir el error experimental. En consecuencia, esta etapa comprendió un total de 18 tratamientos (ver tabla 13).

Tabla 13

Plan experimental de la mezcla del catalizador y oxidante.

Bloque	Tratamiento	A: Cantidad de catalizador (g)	B: Cantidad de oxidante (H₂O₂) (mL).
B1	T1	0.5	0.05
	T2	0.5	0.10
	T3	0.5	0.15
	T4	1	0.05
	T5	1	0.10
	T6	1	0.15
	T7	2	0.05
	T8	2	0.10
	T9	2	0.15
B2	T1	0.5	0.05
	T2	0.5	0.10
	T3	0.5	0.15

T4	1	0.05
T5	1	0.10
T6	1	0.15
T7	2	0.05
T8	2	0.10
T9	2	0.15

C. Comparación entre sistemas de fotocátalisis (efecto con catalizador y efecto de la mezcla).

Para el cumplimiento de este objetivo, se compararon los dos sistemas de fotocátalisis respecto al porcentaje de degradación del SDS, seleccionando el tratamiento en el cual se ha logrado mayor remoción y caracterizado la dosis correspondiente de dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Para determinar si existen diferencias entre los sistemas, se usó la prueba de t de student para muestras independientes, con ello se evaluó si el porcentaje promedio de remoción de tensoactivo presentaba diferencias estadísticamente significativas entre los mejores tratamientos de ambos sistemas de fotocátalisis, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

D. Comparación con el proceso de fotolisis que usa peróxido de hidrógeno.

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos con procesos de fotolisis que considero diferentes dosis de peróxido de hidrogeno (H_2O_2). El plan experimental se detalla en la tabla 14:

Tabla 14

Plan Experimental para el proceso de fotolisis.

Bloque	Tratamiento	B: Cantidad de H ₂ O ₂ (mL)
B1	T1	0.05
	T2	0.10
	T3	0.15
B2	T1	0.05
	T2	0.10
	T3	0.15

Para determinar si existieron diferencias significativas entre las dosis de H₂O₂, se aplicó un ANOVA de un factor, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$; en caso de que se obtuvieran diferencias significativas, se empleó la prueba de Tukey para identificar la dosis que presentó el mayor porcentaje de remoción.

Los resultados de los procesos de fotocátalisis y fotolisis se compararon, utilizando la prueba t de student para muestras independientes, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, a fin de determinar si existieron diferencias significativas en el porcentaje de remoción del tensoactivo SDS y establecer cuál de los dos procesos presentó un mejor desempeño en la degradación del tensoactivo.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Efecto de la cantidad de dióxido de titanio (TiO₂) en fotocátalisis.

La tabla 15, muestra los resultados de la degradación del SDS con dióxido de titanio (TiO₂).

Tabla 15
Resultados para degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO₂).

Bloque	Tratamiento	A: Cantidad en gramos de catalizador (g)	% D (SDS)
B1	T1	0.5	86.34
	T2	1	90.26
	T3	2	92.59
B2	T1	0.5	86.83
	T2	1	89.63
	T3	2	93.28

La tabla muestra que la degradación del tensoactivo SDS aumentó al incrementar la cantidad de dióxido de titanio (TiO₂) ya que, con 0.5 g se alcanzaron valores de 86.34 % y 86.83 %, mientras que con 2.0 g la degradación aumentó hasta 92.59 % y 93.28 % en los bloques B1 y B2, respectivamente; esto indica que, bajo las condiciones evaluadas, una mayor cantidad de TiO₂ favoreció la degradación del SDS, alcanzándose con 2.0 g una degradación superior al 92 %.

En la presente investigación, el incremento de TiO₂ de 0.5 g a 2.0 g aumentó la degradación del SDS de 86 % a 93 %, debido a que una mayor cantidad de catalizador proporciona más sitios activos para captar la radiación UV y generar especies que degradan el contaminante (Garces et al., 2020; Pant et al., 2019); Este comportamiento coincide parcialmente con Wysokowska et al. (2023), quienes reportaron degradaciones de 93–100 %; Sin embargo, dosis excesivas pueden disminuir la eficiencia por la dispersión de la luz y la recombinación de electrones y huecos, como señalaron Rau y Suazo (2021) y Mendoza Correa (2019), mientras que Wahyuni et al. (2016) obtuvo 75.24

% con 40 mg de TiO₂ en 24 horas; en este caso, los 2.0 g aún favorecieron la degradación, lo que indica que no se habría alcanzado una sobredosis y que el sistema se mantiene dentro de un rango favorable, considerando el intervalo de 0.1 a 5.0 g/L señalado por Garces et al. (2020), en concordancia con Fujishima et al. (2000) y Hoffman et al. (1995).

La tabla 16, presenta los resultados de la prueba ANOVA de la degradación del SDS con dióxido de titanio (TiO₂)

Tabla 16

Resultados para análisis de varianza de degradación del SDS con dióxido de titanio (TiO₂)

RESUMEN	Tratamientos	Suma	Promedio	Varianza
B1	3	269.208672	89.7362239	9.96839586
B2	3	269.7487	89.9162333	10.4660545
0.5	2	173.18118	86.5905899	0.11713783
1	2	179.8953	89.94765	0.19926984
2	2	185.880892	92.940446	0.23619621

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas(bloques)	0.04860511	1	0.04860511	0.1928779	0.70342536	18.5128205
Columnas(tratamientos)	40.364902	2	20.182451	80.0892866	0.01233209	19
Error	0.50399877	2	0.25199939			
Total	40.9175058	5				

El análisis de varianza de la tabla 16, muestra que los bloques B1 y B2 presentaron resultados similares, con promedios de degradación de 89.74 % y 89.92 %, respectivamente, y una diferencia que no fue significativa ($F = 0.193$; $p = 0.703 > 0.05$); en cambio, la cantidad de TiO₂, sí produjo diferencias significativas en la degradación del SDS ($F = 80.09$; $p = 0.012 < 0.05$), observándose un aumento del promedio desde 86.59 % con 0.5 g, hasta 89.95 % con 1 g y 92.94 % con 2.0 g; por tanto, la cantidad de TiO₂ influyó significativamente en la degradación del SDS, siendo 2.0 g la cantidad que alcanzó el mayor promedio de degradación.

Los resultados expuestos anteriormente coinciden con Wysokowska et al. (2023) y Taghi et al. (2014), quienes también identificaron la dosis del catalizador como un factor importante; asimismo, mantener estables las condiciones de operación favoreció la consistencia de los resultados, aunque en aguas residuales reales la materia orgánica y otros compuestos pueden reducir la eficiencia del proceso (Jariyanorasade y Junyapoon, 2017; Cubillos y Moncada, 2006); por tanto, bajo las condiciones evaluadas, la dosis de TiO_2 constituye el principal factor a optimizar para mejorar la degradación del SDS.

4.2. Efecto de la cantidad de mezcla del dióxido de titanio (TiO_2) y el peróxido de hidrogeno (H_2O_2) en fotocatalisis.

La tabla 17, muestra los resultados de la degradación del SDS con dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Tabla 17

Resultados para degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2)

Bloque	Tratamiento	A: Cantidad de catalizador (g)	B: Cantidad de oxidante (H_2O_2) (mL).	% D (SDS)
B1	T1	0.5	0.05	98.7244
	T2	0.5	0.1	99.63321
	T3	0.5	0.15	99.56463
	T4	1	0.05	98.4324
	T5	1	0.1	99.6331
	T6	1	0.15	99.5997
	T7	2	0.05	98.9660
	T8	2	0.1	99.6998
	T9	2	0.15	99.7331
B2	T1	0.5	0.05	97.9255
	T2	0.5	0.1	98.9645
	T3	0.5	0.15	99.0252
	T4	1	0.05	97.6111
	T5	1	0.1	98.7359
	T6	1	0.15	99.2854
	T7	2	0.05	97.3872
	T8	2	0.1	98.8557
	T9	2	0.15	97.9164

La tabla 17 muestra que la degradación del tensoactivo SDS fue muy alta en todos los tratamientos, con valores superiores al 97 %; en el bloque B1, los mayores valores se obtuvieron con 2.0 g de TiO_2 y 0.15 mL de H_2O_2 , alcanzando 99.73 %, mientras que en B2 el valor más alto fue 99.29 % con 1.0 g de TiO_2 y 0.15 mL de H_2O_2 ; en general, el aumento de H_2O_2 de 0.05 a 0.10 y 0.15 mL estuvo asociado con mayores porcentajes de degradación, mientras que las diferencias entre las cantidades de TiO_2 fueron pequeñas y esto indica que la combinación de TiO_2 y H_2O_2 permitió alcanzar una degradación cercana al 100 % del SDS.

Los resultados muestran que la incorporación de H_2O_2 mejoró notablemente la degradación del SDS, superando el 97 % en todos los tratamientos y alcanzando hasta 99.73 % y a diferencia del TiO_2 solo, donde aumentar de 1.0 g a 2.0 g; generaba diferencias importantes, con H_2O_2 esta variación fue mínima, lo que indica que el oxidante se convirtió en el principal factor del proceso y esto se debe a que el H_2O_2 favorece la generación de radicales hidroxilo ($\text{OH}^\bullet$) y reduce la recombinación de los pares electrón–hueco (e^-/h^+), además de producir $\text{OH}^\bullet$ mediante la radiación UV (Garces et al., 2020; Daneshvar et al., 2002); estos resultados superan lo reportado por Dai et al. (2024), quienes obtuvieron 53 % con UV/ TiO_2 sin oxidante, y son consistentes con Wahyuni et al. (2016) y Mendoza Correa (2019), quienes también alcanzaron remociones superiores al 99 % con oxidantes adicionales, por tanto, el aumento de H_2O_2 de 0.05 a 0.15 mL evidencia que, bajo las condiciones estudiadas, la cantidad de oxidante es más determinante que la dosis de TiO_2 para mejorar la degradación del SDS.

La tabla 18, presenta los resultados del análisis de varianza del dióxido de titanio (TiO_2) y el peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Tabla 18

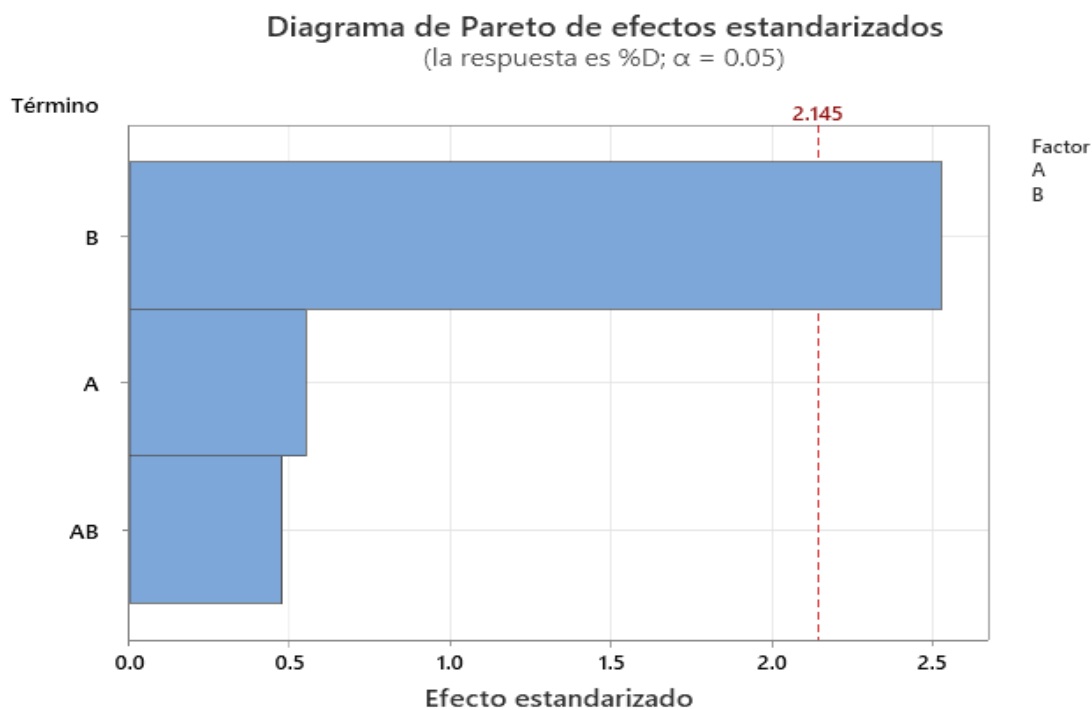
Resultados para análisis de varianza de degradación de tensoactivo con dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3.3155	1.1052	2.44	0.107
Lineal	2	3.0158	1.5079	3.34	0.065
A (TiO_2)	1	0.1361	0.1361	0.30	0.592
B (H_2O_2)	1	2.8797	2.8797	6.37	0.024
Interacciones de 2 términos	1	0.1010	0.1010	0.22	0.644
A*B	1	0.1010	0.1010	0.22	0.644
Error	14	6.3284	0.4520		
Falta de ajuste	5	1.5983	0.3197	0.61	0.697
Error puro	9	4.7301	0.5256		
Total	17	9.6439			

En la figura 15, se describe los efectos de degradación del SDS, mediante el diagrama de Pareto.

Figura 15

Efectos en la degradación de tensoactivo de dióxido de titanio (TiO_2) y (H_2O_2)



Nota: A (TiO_2); B (H_2O_2)

Los resultados del análisis de varianza y el diagrama de Pareto Estandarizado muestran que el modelo general no presentó diferencias estadísticamente significativas en la degradación del SDS ($F = 2.44$; $p = 0.107 > 0.05$) y al evaluar cada factor por separado, la cantidad de TiO_2 (A) no tuvo un efecto significativo ($p = 0.592$), mientras que la cantidad de H_2O_2 (B) sí presentó un efecto significativo sobre la degradación ($F = 6.37$; $p = 0.024 < 0.05$); asimismo, la interacción entre TiO_2 y H_2O_2 no fue significativa ($p = 0.644$), lo que indica que el efecto de uno no dependió directamente del nivel del otro, en consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, la cantidad de H_2O_2 fue el factor que influyó significativamente en la degradación del SDS, mientras que la cantidad de TiO_2 y su interacción con H_2O_2 no mostraron un efecto significativo.

Los resultados coinciden con Daneshvar et al. (2002), quienes reportaron una constante cinética 6.5 veces mayor para UV/ H_2O_2 que para UV/ TiO_2 , y con Cubillos y Moncada (2006), quienes observaron que el TiO_2 podía aportar poco o incluso inhibir el proceso en presencia de H_2O_2 ; por tanto, en el sistema combinado, el H_2O_2 se presenta como el factor más importante para mejorar la degradación del SDS, mientras que la cantidad de TiO_2 pierde relevancia dentro de las condiciones evaluadas.

4.3. Selección del proceso de fotocatalisis.

La tabla 19, muestra los resultados de la degradación del SDS para sistema 1, solo con dióxido de titanio (TiO_2) y para sistema 2, con dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Tabla 19

Resultados de degradación de tensoactivo para sistema 1, solo con dióxido de titanio (TiO_2) y para sistema 2, con dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Sistema	Detalle	% D(SDS)
1	TiO_2	86.34
1	TiO_2	86.83
1	TiO_2	90.26
1	TiO_2	89.63
1	TiO_2	92.59
1	TiO_2	93.28
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.7244
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	97.9255
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.63321
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.9645
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.56463
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.0252
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.4324
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	97.6111
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.6331
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.7359
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.5997
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.2854
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.966
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	97.3872
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.6998
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	98.8557
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	99.7331
2	$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	97.9164

En la tabla se observa una diferencia clara entre ambos sistemas: el sistema 1, con TiO_2 , presentó valores de degradación entre 86.34 % y 93.28 %, mientras que el sistema 2, con $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$, alcanzó valores mucho mayores, entre 97.39 % y 99.73 % y esto indica que la incorporación de H_2O_2 mejoró notablemente la degradación del SDS, permitiendo alcanzar valores cercanos al 100 %, superiores a los obtenidos utilizando únicamente TiO_2 .

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de H_2O_2 mejoró notablemente la degradación del SDS, pasando de 86.34 % a 93.28 % con TiO_2 solo a 97.39 % y 99.73 % con el sistema combinado y esta mejora se debe a que el H_2O_2 favorece la formación de radicales hidroxilos ($\text{OH}^\bullet$), reduce la recombinación de los pares

electrón–hueco y permite una oxidación más eficiente en la solución (Daneshvar et al., 2002; Garces et al., 2020); además, Daneshvar et al. (2002) reportaron que UV/H₂O₂ presenta una constante cinética 6.5 veces superior a UV/TiO₂; por ello, el sistema combinado supera el límite cercano al 93 % alcanzado con TiO₂ solo y permite obtener degradaciones cercanas al 100 %, en concordancia con Wahyuni et al. (2016) y Mendoza Correa (2019).

En la tabla 20, se visualiza el análisis de varianza para los dos sistemas de fotocátalisis.

Tabla 20

Resultados para análisis de varianza para sistemas de fotocátalisis

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Sistema	1	368.58	368.576	160.35	0.000
Error	22	50.57	2.299		
Total	23	419.14			

El análisis de varianza muestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos sistemas de fotocátalisis, ya que se obtuvo un valor $F = 160.35$ y $p = 0.000 < 0.05$ y esto indica que el tipo de sistema utilizado influyó de manera significativa en la degradación del SDS; por tanto, los resultados obtenidos con TiO₂ + H₂O₂ fueron significativamente diferentes y superiores a los obtenidos únicamente con TiO₂, confirmando que la incorporación de H₂O₂ mejoró el proceso de degradación del tensoactivo.

Los resultados de la prueba tukey para los dos sistemas se muestran en la tabla 21.

Tabla 21

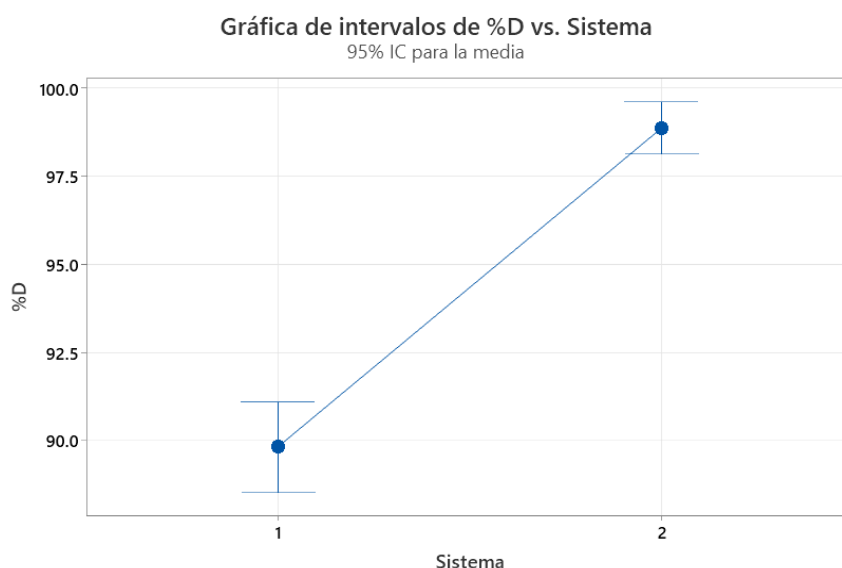
Resultados de análisis Tukey para sistemas de fotocátalisis

Sistema	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
1	6	89.82	2.86	(88.54; 91.11)
2	18	98.872	0.753	(98.131; 99.613)

La prueba de Tukey muestra que el sistema 2 ($\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$) presentó una degradación promedio de 98.87 %, claramente superior al 89.82 % obtenido con el sistema 1 (TiO_2); además, los intervalos de confianza del 95 % son diferentes y no se superponen (88.54 – 91.11 % para el sistema 1 y 98.13 – 99.61 % para el sistema 2), lo que confirma que el sistema con H_2O_2 tuvo un mejor desempeño en la degradación del SDS.

Figura 16

Grafica de intervalos de porcentajes de degradación en sistemas de fotocatalisis



La Figura 16 evidencia que el sistema 2 ($\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$) alcanzó una degradación promedio de 98.87 %, superior al 89.82 % del sistema 1 (TiO_2); asimismo, los intervalos de confianza presentan una separación clara, lo que respalda la mayor eficiencia del sistema combinado; en conjunto, los resultados confirman que la incorporación de H_2O_2 potencia significativamente la degradación del SDS respecto al uso exclusivo de TiO_2 .

El análisis estadístico muestra una diferencia altamente significativa entre ambos sistemas ($F = 160.35$; $p = 0.000$), con una mayor degradación para $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ (98.87 %) frente a TiO_2 solo (89.82 %) confirmando la superioridad del sistema combinado y este resultado coincide con Nazari y Ayati (2019) y supera lo reportado por Dai et al.

(2024), quienes alcanzaron 74 % con VUV/TiO₂; por tanto, bajo condiciones controladas, la incorporación de H₂O₂ mejora significativamente la eficiencia del proceso y permite alcanzar valores cercanos al 99 % de degradación del SDS.

4.4. Comparación de la remoción del lauril sulfato de sodio usando peróxido de hidrogeno (H₂O₂) con el proceso de fotocátalisis.

La tabla 22, resume los resultados de la degradación del tensoactivo para sistema 1, fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO₂) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y sistema 2, fotólisis con peróxido de hidrogeno (H₂O₂).

Tabla 22

Resultados de degradación de tensoactivo para sistema 1, fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO₂) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y sistema 2, fotólisis con peróxido de hidrogeno (H₂O₂).

Sistema	Detalle	Dosis de TiO ₂ (g)	Dosis de H ₂ O ₂ (mL)	% D(SDS)
1	TiO ₂ + H ₂ O ₂	2	0.15	99.7331
2	H ₂ O ₂	-	0.5	98.56125
2	H ₂ O ₂	-	1	99.49811
2	H ₂ O ₂	-	1.5	99.53157
2	H ₂ O ₂	-	0.5	96.7594
2	H ₂ O ₂	-	1	97.9916
2	H ₂ O ₂	-	1.5	98.3561

En la tabla se observa que ambos sistemas lograron una alta degradación del tensoactivo SDS, aunque el sistema de fotocátalisis con TiO₂ + H₂O₂ presentó valores entre 97.39 % y 99.73 %, mientras que el sistema de fotólisis con H₂O₂ presentó valores entre 96.76 % y 99.53 %; en general, ambos tratamientos alcanzaron porcentajes cercanos al 100 %, observándose una ligera ventaja del sistema combinado TiO₂ + H₂O₂, aunque la diferencia entre los valores obtenidos es relativamente pequeña.

En la tabla 23, se visualiza el analisis de varianza para los sistemas de fotocátalisis y fotolisis.

Tabla 23

Resultados para análisis de varianza para los sistemas de fotocátalisis y fotólisis.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Sistema	1	0.8020	0.8020	1.18	0.290
Error	22	15.0016	0.6819		
Total	23	15.8037			

El análisis de varianza muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el sistema de fotocátalisis ($\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$) y el sistema de fotólisis (H_2O_2), debido a que se obtuvo un valor $F = 1.18$ y $p = 0.290 > 0.05$ y esto indica que, aunque los dos sistemas alcanzaron altos porcentajes de degradación del SDS, la presencia de TiO_2 no produjo una mejora estadísticamente significativa frente al uso de H_2O_2 por sí solo bajo las condiciones evaluada.

En la tabla 24, se resume los resultados del analisis tukey para los sistemas de fotocátalisis y fotólisis.

Tabla 24

Resultados de análisis Tukey para sistemas de fotocátalisis y fotólisis

Sistema	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
1	18	98.872	0.753	(98.468; 99.275)
2	6	98.450	1.035	(97.751; 99.149)

Nota. 1: Fotocátalisis; 2: Fotólisis

La prueba de Tukey muestra que el sistema de fotocátalisis ($\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$) alcanzó una degradación promedio de 98.87 %, ligeramente superior al 98.45 % obtenido mediante fotólisis (H_2O_2); sin embargo, los intervalos de confianza del 95 % se superponen, por lo que la diferencia entre ambos sistemas es pequeña y en consecuencia, ambos sistemas presentan un desempeño similar en la degradación del SDS, siendo la fotocátalisis ligeramente superior en términos de promedio, pero sin una diferencia estadísticamente significativa.

La comparación estadística mostró que la fotocatalisis $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ y la fotólisis con H_2O_2 presentaron un desempeño equivalente ($F = 1.18$; $p = 0.290 > 0.05$), con medias de 98.87 % y 98.45 %, respectivamente y esto indica que, bajo las condiciones evaluadas y con 0.15 mL de H_2O_2 , la presencia de TiO_2 no genera una mejora significativa, debido a que el H_2O_2 produce directamente radicales hidroxilos ($\text{OH}\bullet$) mediante la radiación UV y domina el proceso de oxidación (Daneshvar et al., 2002); además, este comportamiento coincide con Cubillos y Moncada (2006) y con los fundamentos descritos por Garces et al. (2020) y Pant et al. (2019), confirmando que la fotólisis con H_2O_2 puede alcanzar una alta eficiencia sin requerir el semiconductor.

CONCLUSIONES.

1. Se concluye que el proceso de fotocátalisis alcanza un grado elevado de remoción del tensoactivo lauril sulfato de sodio (SDS) en aguas sintéticas, con porcentajes de degradación que varían desde 86.34 % utilizando únicamente TiO_2 hasta 99.73 % al combinar TiO_2 con H_2O_2 ; además, el sistema que mostró el mejor desempeño fue el que incorpora ambos agentes, alcanzando un promedio de degradación de 98.87 %, lo que confirma la efectividad del proceso fotocatalítico para la remoción de SDS.
2. Se concluye que la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) influye significativamente en el proceso de fotocátalisis para la remoción del lauril sulfato de sodio (SDS), dado que el análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre las dosis evaluadas ($F = 80.09$; $p = 0.012 < 0.05$); además, se observó un incremento en el porcentaje de degradación al aumentar la cantidad de catalizador, pasando de 86.59 % con 0.5 g a 92.94 % con 2.0 g de TiO_2 , lo que evidencia que, bajo las condiciones ensayadas, una mayor cantidad de TiO_2 favorece la remoción del contaminante.
3. Se concluye que en la mezcla de dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la cantidad de H_2O_2 es el factor que influye significativamente en la degradación del SDS ($F = 6.37$; $p = 0.024 < 0.05$), mientras que la cantidad de TiO_2 ($p = 0.592$) y su interacción con el oxidante ($p = 0.644$) no mostraron un efecto significativo y esto indica que, dentro del sistema combinado, el H_2O_2 es el principal responsable de la alta eficiencia alcanzada, superando el 97 % en todos los tratamientos evaluados.
4. Se concluye que el sistema de fotocátalisis que combina dióxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) logra una mayor remoción del SDS en comparación con el sistema que utiliza únicamente TiO_2 y el análisis estadístico evidenció

diferencias significativas entre ambos sistemas ($F = 160.35$; $p = 0.000 < 0.05$), con un porcentaje de degradación promedio de 98.87 % para el sistema combinado frente al 89.82 % obtenido con TiO_2 solo, confirmando la superioridad del sistema con H_2O_2 .

5. Se concluye que el proceso de fotocátalisis con $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ y el proceso de fotólisis con H_2O_2 presentan un grado de remoción del SDS estadísticamente similar, ya que el análisis de varianza no mostró diferencias significativas ($F = 1.18$; $p = 0.290 > 0.05$); además, ambos sistemas alcanzaron degradaciones cercanas al 98 % (98.87 % y 98.45 %, respectivamente), lo que indica que, bajo las condiciones evaluadas, la adición de TiO_2 al sistema con H_2O_2 no representa una mejora sustancial frente al uso exclusivo del oxidante.

RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda partir de la carga más elevada de catalizador evaluada como referencia operativa cuando no se empleen oxidantes complementarios; no obstante, resulta pertinente explorar dosis intermedias en futuros ajustes, con el fin de identificar el punto exacto donde el incremento en la remoción deje de justificar el mayor consumo de semiconductor, prestando atención a la transparencia de la suspensión para no afectar la transmisión de la radiación.
2. Se recomienda fijar la cantidad de dióxido de titanio en el nivel mínimo dentro de los esquemas que incorporen ambos agentes, y concentrar todo el esfuerzo de control operativo en la dosificación precisa del peróxido de hidrógeno; esta práctica reduce la carga de sólidos en el sistema y simplifica el manejo posterior de los efluentes, sin que ello comprometa la alta eficiencia alcanzada.
3. Se recomienda emplear la combinación con oxidante únicamente cuando la exigencia de calidad del agua tratada demande una remoción prácticamente total; por el contrario, si los límites permisibles son menos estrictos, el sistema con solo semiconductor resulta más ventajoso, al evitar la manipulación de reactivos oxidantes y reducir la complejidad del proceso.
4. Se recomienda realizar ensayos complementarios con aguas reales que permitan evaluar el comportamiento del sistema $\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ frente a la presencia de materia orgánica, sales y otros compuestos que puedan interferir con la generación de especies oxidantes, comparando su desempeño con el obtenido en aguas sintéticas y determinando la necesidad de realizar ajustes en las condiciones de operación.
5. Se recomienda desarrollar estudios de escalamiento del proceso mediante la evaluación de variables como el tiempo de tratamiento, intensidad y distancia de la fuente de radiación, volumen de agua tratado y concentración inicial de SDS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Akpan, U., & Hameed, B. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: A review. (J. o. Materials, Ed.) 170(2-3), pages 520 - 529. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.039
- Allen, N. S., Edge, M., Sandoval, G., Verran, J., Catalina, F., Bygott, C., & Kerrod, J. (2021). Research perspectives on the photocatalytic activity of titanium dioxide: Catalytic assessment methods in solution and solid-state in relation to particle surface activity. (P. D. Stability, Ed.) 190. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109624
- Ameta, S. C. (Febrero de 2018). Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment. *sciencedirect*, 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00001-2
- Andrade, Y. R. (2020). Evaluacion de la Eficiencia en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Distrito de Macusani, Region Puno - 2020. pag 24. Obtenido de <https://acortar.link/HFz32z>
- Aribam, B., Konthoujam, B., Singh, P., & Thokchom, B. (2022). Chapter 2 - Municipal water treatment with special emphasis on biosorption and nanoparticles. (W. a. Environmental Sustainability and Industries "Technologies for Solid Waste, Ed.) paginas 55 - 83. doi:10.1016/B978-0-323-90034-8.00003-8
- Arifin, M., Jusoh, R., Abdullah, H., & Ainirazali, N. (2023). Recent advances in advanced oxidation processes (AOPs) for the treatment of nitro- and alkyl-phenolic compounds. *Environmental Research*, 229. doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115936
- Association, t. S. (2004). *"Soap & Detergent: History*. Obtenido de <https://www.cleaninginstitute.org/understanding-products/why-clean/soaps-detergents-history>
- Ayati B, M. N. (2019). Removing Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate Using a Hybrid Electrocoagulation/Flotation and Photocatalytic System. (4. J. Water Environ. Nanotechnol., Ed.) pag: 236 - 243. doi: 10.22090/jwent.2019.03.006

- Bak, T., Norby, T., Nowotny, J., Nowotny, M. K., & Sucher, N. (2010). Titanium Dioxide Photocatalyst Unresolved Problems. *Solid State Chemistry and Photocatalysis of Titanium Dioxide*, 162(77 - 92), 1 - 15, pag 3. doi:doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.162.77
- Bhambri, A., Singh, P., Kumar Karn, S., & Dey, A. (2023). Chapter 8 - Agriculture pesticide and their remediation. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes Advances in Industrial Wastewater Treatment Technologies: Removal of Contaminants and Recovery of Resources*, 145-162. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95684-0.00010-5
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology* (Third Edition ed.). (G. F. Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, Ed.) Obtenido de <https://acortar.link/69RF8z>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., . . . Rizzo, A. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. (S. o. Environment, Ed.) 711. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134731
- Borja, K. J. (2016). Evaluacion de la incidencia de variables Analiticas en la Determinacion de la Biodegradabilidad de Tensoactivos Anionicos y no Ionicos. (L. L. Universitaria", Ed.) pag:3-6. Obtenido de <https://acortar.link/YcFeix>
- Bracamontes Ruelas, A. R., Ordaz Diaz, L. A., Bailon Salas, A. M., & Vidal Reyes, Y. (10 de 2022). Emerging pollutants in wastewater, Advanced Oxidation Processes as an Alternative Treatment and Perspectives. (A. E. Martin, Ed.) *ResearchGate*, 24 . doi:10.3390/pr10051041
- Brienza, M., & Katsoyiannis, I. A. (08 de setiembre de 2017). Sulfate Radical Technologies as Tertiary Treatment for the Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. *Sustainability*, 2-18. doi:10.3390/su9091604
- Bui, V. K., Tran, V. V., Moon, J. Y., Park, D., & Lee, Y. -C. (2020). Titanium Dioxide Microscale and Macroscale Structures: A Mini-Review. (Nanomaterials, Ed.) doi:10.3390/nano10061190
- Carvajal, J. S. (15 de Noviembre de 2011). Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales. *Produccion mas Limpia*, 16. Recuperado el 17 de junio de 2024,

de file:///C:/Users/User/Documents/Antecedentes%20tesis/Dialnet-FotocatalisisHeterogeneaParaElAbatimientoDeTensoac-4331007%20(1).pdf

Chalastara, K., Guo, F., Elouatik, S., & Demopoulos, G. (2020). Nanocristales de TiO₂ de fase mixta sintetizados en agua y de composición modulable para la descontaminación de agua asistida por fotones: comparación de fotocatalizadores de anatasa, brookita y rutilo. (Catalysis, Ed.) pag 407. doi:10.3390/catal10040407

Chi, J., Cotua, L., Duran, R. J., Lobo, G., & Martinez, J. (2020). Analisis del Proceso de produccion y sintesis del acido sulfonico de Brinsa S.A. (U. d. Programa de ingenieria Quimica, Ed.) pag: 16-32. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/483783845/AVANCE-2-REACTORES>

CPI. (2012). CONSUMO DE PRODUCTOS EN LOS HOGARES DE LIMA METROPOLITANA. I, 22. Recuperado el 02 de Agosto de 2024, de https://cpi.pe/images/upload/paginaweb/archivo/23/200806_Productos_Hogar_21lineas.pdf

Cubillos, D. R., & Moncada, J. E. (2006). Evaluacion a Nivel Laboratorio de un Sistema de Remocion Fotocatalitico de Tensoactivos Anionicos. 186. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/ab6b3e5c-1e87-4f4e-a0df-b453975f4a23/content>

Dai, Y., Yang, Y., Li, X., Wang, N., Zhou, Z., Feng, J., . . . Li, H. (2024). Degradation of sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) and high efficiency treatment of real grey water by TiO₂-loaded stainless steel mesh under VUV irradiation. (J. o. Engineering, Ed.) pag: 64. doi:10.1016/j.jwpe.2024.105698

Daneshvar, N., Salari, D., & Bennisuady, M. A. (2002). Descomposition of Anionic Sodium Dodecylbenzene Sulfonate by UV/TiO₂ and UV/H₂O₂ Processes a - comparison of Reaction Rates. *Iran J. Chem & Chem. Eng.*, 21, 8. Obtenido de https://ijcce.ac.ir/article_9551_67ad4113ae200c56e74d7177b37d9469.pdf

- Dehghani, M. H., Karri, R. R., Koduru, J. R., Manickam, S., Tyagi, I., & Mubarak, N. M. (2023). Recent trends in the applications of sonochemical reactors as an advanced oxidation process for the remediation of microbial hazards associated with water and wastewater: A critical review. (U. Sonochemistry, Ed.) *94*. doi:10.1016/j.ultsonch.2023.106302
- Delgado, B. V. (2012). DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN LETAL MEDIA (CL50) DE CUATRO DETERGENTES DOMÉSTICOS BIODEGRADABLES EN *Laeonereis culveri* (WEBSTER 1879) (POLYCHAETA: ANNELIDA). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 137 - 144. doi:http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023178004
- Devi, K. P., & Chaturvedi, H. (2021). Chapter 9 - An overview of nanotechnology in water treatment applications and combating climate change. (ELSEVIER, Ed.) *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*, 5, 191 - 212. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00004-X
- Dewil, R., Mantzavinos, D., Poulios, I., & Rodrigo, M. A. (2017). New perspectives for Advanced Oxidation Processes. (J. o. Management, Ed.) *195*(2), pag 93-99. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.010
- Donaldson, D., & Wren, S. (2015). Chemistry of the Atmosphere. (D. Donaldson, Ed.) *Laboratory Kinetics*, 3, 1090 - 1097. doi:10.1016/B978-0-12-382225-3.00475-8
- Echarri, L. (2018). Substancias contaminantes del agua. (C. d. Ambiente., Ed.) Obtenido de <https://acortar.link/v3Rncp>
- Fogler, H. S. (2001). *Elementos de Ingenieria de las Reacciones Quimicas* ("Tercera Edicion" ed.). (G. T. Mendoza, Ed.) Obtenido de <https://acortar.link/9MFgh4>
- Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (10 de 03 de 2000). Titanium dioxide photocatalysis. (Elsevier, Ed.) *Journal of Photochemistry and Photobiology C*, 1-21. doi:https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2

- Garcia, J. F., & Pezo, R. (2011). *Efectos Toxicos del detergente domestico "Magia Blanca", sobre las especies de peces Piaractus brachipomus (cuvier, 1818) PACO Y Colossoma macropomum (cuvier, 1818) GAMITAMA (Piscis, CHARACIFORMES), EN AMBIENTES CONTROLADOS*. Tesis para optar el titulo profesional de Biologo., Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Iquitos - Peru. Recuperado el 26 de junio de 2024, de <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/2014/T-577.2753-G25.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gaya, U. I. (2014). *Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids*. (springer, Ed.) 222. doi:10.1007/978-94-007-7775-0
- Gitrowski, C., Al-Jubory, A. R., & Handy, R. D. (25 de febrero de 2014). Uptake of different crystal structures of TiO₂ nanoparticles by Caco-2 intestinal cells. (ELSEVIER, Ed.) *Toxicology Letters*, 226, 264 - 276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.02.014>
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (4 de Abril de 2022). A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research*, 553-597. doi:[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00031-5)
- Golda, A., Gopalsamy, P., & Muthu, N. (2014). Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. (A. W. Science, Ed.) 4, pag 39-49. doi:10.1007/s13201-013-0128-8.
- Goulart, S., Jaramillo Nieves, L. J., Gonçalves Dal Bo, A., & Bernardin, A. (12 de Julio de 2021). Sensitization of TiO₂ nanoparticles with natural dyes extracts for photocatalytic activity under visible light. (ELSEVIER, Ed.) *Dyes and Pigments*, 1 - 6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108654>
- Hegazey, R., Abdelrahman, E. A., Kotp, Y. H., Hameed, A. M., & Subaihi, A. (2020). Facile fabrication of hematite nanoparticles from Egyptian insecticide cans for efficient photocatalytic degradation of rhodamine B dye. (J. o. Technology, Ed.) 9(2), Pages 1652-1661. doi:10.1016/j.jmrt.2019.11.090

- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (04 de 2014). *Google Academico*. (McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, Ed.) Recuperado el 19 de abril de 2024, de Google Academico: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Hernandez, N., & Ramirez, Y. (2015). EVALUACION DE LA FOTODEGRADACION DEL COLORANTE NARANJA II REUTILIZANDO SULFURO DE CADMIO OBTENIDO COMO RESIDUO. *UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA " FACULTAD DE TECNOLOGIA ESCUELA DE TECNOLOGIA QUIMICA PEREIRA"*, 73, pg 9.
- Hoffman, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (10 de 1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. (Elsevier, Ed.) *W. M. Keck Laboratories, California Institute of Technology*, 69-96. doi:<http://dx.doi.org/10.1021/cr00033a004>
- Hurtado Castillo, C. (abril de 2022). Lanzamiento de FASTY: Una nueva marca de productos de limpieza. *Researchgate*, 57. Recuperado el 02 de agosto de 2024, de https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16317/Hurtado-Castillo_Lanzamiento-Fasty-Marca.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jariyanorasade, A., & Junyapoon, S. (2017). Factors Affecting the Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate by TiO₂ Assisted Photocatalysis and Its Kinetics. (E. ". Environment", Ed.) pag 2-17. doi:10.14456/ea.2018.4
- Jimenez, M. (13 de Mayo de 2015). Desarrollo de nuevas estrategias basadas en fotocatalisis solar para la regeneracion de aguas de una industria agro - alimentaria. *Dialnet*, 2-290. Recuperado el 14 de 09 de 2024, de https://www.psa.es/es/unidades/tsa/docs/Tesis_Margarita_Jimenez.pdf
- Kanafin, Y. N., & Collinson, S. R. (2022). Advanced Technologies in Water Treatment. (C. W. Sanitation, Ed.) pag 24 - 35. doi:10.1007/978-3-319-70061-8_161-1

- Karray, F., Mezghani, M., Mhiri, N., Djelassi, B., & Sayadi, S. (2016). Scale-down studies of membrane bioreactor degrading anionic surfactants wastewater: Isolation of new anionic- surfactant degrading bacteria. (I. B. Biodegradation, Ed.) *114*, pag 14 - 23. doi:10.1016/j.ibiod.2016.05.020
- Kaswan, V., & Kaur, H. (2023). A comparative study of advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Water Practice & Technology*, *18*(5), 2-22. doi:https://doi.org/10.2166/wpt.2023.061
- Katwal, R., Kothari, R., & Pathania, D. (2021). Chapter 10 - An overview on degradation kinetics of organic dyes by photocatalysis using nanostructured electrocatalyst. (D. L.-C. Recovery, Ed.) pag 195 - 213. doi:10.1016/B978-0-12-821841-9.00005-0
- Katwal, R., Kothari, R., & Pathania, D. (2021). Chapter 10 - An overview on degradation kinetics of organic dyes by photocatalysis using nanostructured electrocatalyst. (D. L.-C. Recovery, Ed.) pag: 195 - 213. doi:10.1016/B978-0-12-821841-9.00005-0
- Khataee, A., & Mansoori, G. (2012). Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation and Applications. (ELSEVIER, Ed.) *Nanostructured Titanium Dioxide Materials*, 1-4. doi:10.1142/9789814374736_0001
- Korpe, S. A., Landge, V., Hakke, V. S., Venkateswara, P. R., Sonawane, S. H., & Sonawane, S. s. (2022). Chapter 14 - Advanced oxidation processes for tannery industry wastewater treatment. *Novel Approaches Towards Wastewater Treatment and Resource Recovery Technologies* , *6*, 253 - 276. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90627-2.00002-2
- Krystynik, P. (2021). Advanced Oxidation Processes (AOPs) – Utilization of Hydroxyl Radical and Singlet Oxygen. (R. O. Species, Ed.) doi:10.5772/intechopen.98189
- Krystynik, P. (08 de 06 de 2021). Advanced Oxidation Processes (AOPs) – Utilization of Hydroxyl Radical and Singlet Oxygen. (R. Ahmad, Ed.) *ResearchGate*, 126. doi:10.5772/intechopen.98189

- Kumar, V., Singh, K., & Shah, M. P. (2021). Advanced oxidation processes for complex wastewater treatment. *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*, 1-31. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821011-6.00001-3>
- Lapchuk, I., Shyichuk, A., & Tatarchuk, T. (2023). 8 - Application of hybrid advanced oxidation and adsorption processes for pharmaceutical wastewater treatment. (ELSEVIER, Ed.) *The Treatment of Pharmaceutical Wastewater Innovative Technologies and the Adaptation of Treatment Systems*, 16(2), 247 - 275. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99160-5.00008-4>
- Lechuga, V. M. (2005). Biodegradacion y Toxicidad de Tensioactivos Comerciales. (U. d. Quimica, Ed.) Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/46589477_Biodegradacion_y_toxicidad_de_tensioactivos_comerciales
- Li, M., Song, J., Han, W., Yeung, K. L., Zhou, S., & Mo, C.-H. (2023). Iron-organic frameworks as effective fenton-like catalysts for peroxymonosulfate decomposition in advanced oxidation processes. (ResearchGate, Ed.) *Clean Water*, 2-12. doi:10.1038/s41545-023-00251-z
- Linden, K., & Mohseni, M. (2014). 2.8 - Advanced Oxidation Processes: Applications in Drinking Water Treatment. (ELSEVIER, Ed.) *Comprehensive Water Quality and Purification*, 2, 148-172. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00031-1>
- Low, I., Albetran, H., De la Prida, P. V., & Yam, F. (2021). Nanostructured Titanium Dioxide in Photocatalysis. (J. S. Pte, Ed.) pag 335. Obtenido de <https://acortar.link/yeVbzS>
- Luttrell, T., Halpegamage, S., Tao, J., & Kramer, A. (11 de agosto de 2014). Why is Anatase a Better Photocatalyst Than Rutile? - Model Studies on Epitaxial TiO₂ Films. *Scientific Reports*, 1-9. doi:10.1038/srep04043

- Lyu, S., Hao, H., Li, X., & Lang, X. (2021). Cooperative TiO₂ photocatalysis with TEMPO and N-hydroxysuccinimide for blue light-driven selective aerobic oxidation of amines. (*Chemosphere*, Ed.) 262. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127873
- Mamun, M. A., Kader, S., Islam, M., & Khan, M. (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. (*J. o. Engineering*, Ed.) doi:10.1016/j.jece.2019.103248
- Maury, A. (2 de 07 de 2006). Fotocatálisis de TiO₂ Materiales de Construcción más durables. *Prospectiva " Una Nueva vision para la ingenieria"*, 4(2), 1 - 7. Recuperado el 19 de 09 de 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251108003.pdf>
- Mendoza Correa, W. A. (20 de marzo de 2019). *ALICIA CONCYTEC*. Recuperado el 16 de Abril de 2024, de ALICIA CONCYTEC: [file:///C:/Users/User/Documents/Antecedentes%20tesis/Mendoza_Correa_Wilson_Alfredo%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/User/Documents/Antecedentes%20tesis/Mendoza_Correa_Wilson_Alfredo%20(2).pdf)
- Montgomery. (2020). *Diseño y Analisis de Experimentos*. LIMUSA WILEY. Obtenido de <https://es.slideshare.net/slideshow/diseo-y-analisis-de-experimentos-montgomery-ocr/55532757>
- Moura, L., & Picao, R. C. (2022). Capítulo 23 - Eliminación de los determinantes de resistencia a los antimicrobianos de las aguas residuales: una perspectiva de riesgo en las tecnologías convencionales y emergentes. (D. C.-Y. Hemen Sarma, Ed.) *Contaminantes emergentes en el medio ambiente*, 603 - 642. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85160-2.00023-8>
- Mousavi, S. A., & Khodadoost, F. (2019). Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review. (*E. S. Research*, Ed.) pag 4 - 6. doi:10.1007/s11356-019-05802-x
- Myers, D. (2006). *SURFACTANT SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Vol. tercer). New Jersey, United States: Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street,. Recuperado el 17 de junio de

- 2024, de <http://press.crosa.com.tw/wp-content/uploads/2016/11/Surfactant-Science-and-Technology-Third-Edition.pdf>
- Nazari, M., & Ayati, B. (2019). Removing Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate Using a Hybrid. (J. W. Nanotechnol., Ed.) 4(3), pag 236 - 243. doi:10.22090/jwent.2019.03.006
- Nguyen, T. H., Hoang, N. H., Tran, C. V., Nguyen, P., Dun Dang, T., Chung, W., . . . Kumar, P. (Noviembre de 2022). Green synthesis of a photocatalyst Ag/TiO₂ nanocomposite using *Cleistocalyx operculatus* leaf extract for degradation of organic dyes. (ELSEVIER, Ed.) *Chemosphere*, 306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135474>
- Nieto, N. (22 de junio de 2011). La gestion del agua:Tensiones Globales y latinoamericanas. *Scielo*, 1-20. Recuperado el 27 de mayo de 2024, de <https://www.scielo.org.mx/pdf/polcul/n36/n36a7.pdf>
- Odeh, A.-J. (2003). Greywater reuse: Towards sustainable water management. (Desalination, Ed.) 156(Issues 1-3), pag 181-192. doi:10.1016/S0011-9164(03)00340-0
- OMS, O. M. (2023). Agua para consumo humano. pag 56. Obtenido de <https://acortar.link/0jSHp>
- Ono, Y., & Iwahashi, H. (2022). Titanium dioxide nanoparticles impart protection from ultraviolet irradiation to fermenting yeast cells. (B. a. Reports, Ed.) 30. doi:10.1016/j.bbrep.2022.101221
- Ono, Y., & Iwahashi, H. (febrero de 2022). Titanium dioxide nanoparticles impart protection from ultraviolet irradiation to fermenting yeast cells. *Biochem Biophys Reports*, 30, 1-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2022.101221>
- Oteng-Peprah, M., de Vries, N., & Acheampong, M. (2018). Greywater characterization and generation rates in a peri urban municipality of a developing country. (J. o. Management, Ed.) 206, paginas 498 - 506. doi:10.1016/j.jenvman.2017.10.068
- Oyetade, J. A., Machunda, R. L., & Hilonga, A. (2022). Photocatalytic degradation of azo dyes in textile wastewater by Polyaniline composite catalyst-a review. (S. African, Ed.) 17, pag 6. doi:10.1016/j.sciaf.2022.e01305

- Palmer, M., & Hatley, H. (25 de septiembre de 2018). The role of surfactants in wastewater treatment: impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 65. doi:10.1016/j.watres.2018.09.039
- Pant, B., Park, M., & Soo, J. P. (2019). Recent Advances in TiO₂ Films Prepared by Sol-Gel Methods for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Antibacterial Activities. (Coatings, Ed.) doi:10.3390/coatings9100613
- Parrino, F., & Palmisano, L. (2021). Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications. (U. o. Francesco Parrino Department of Industrial Engineering, & D. o. Leonardo Palmisano“Schiavello-Grillone” Photocatalysis Group, Edits.) *Metal Oxides Series*, 1 -708, pag 36- 42. Recuperado el 15 de 09 de 2024, de <https://dokumen.pub/titanium-dioxide-tio2-and-its-applications-0128199601-9780128199602.html>
- Parsons, S. (2015). *Advanced Oxidation Processes for water and wastewater Treatment* (Vol. 1). (S. Parsons, Ed.) London: IWA publishing. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://scihub.se/10.2166/9781780403076>
- Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G., . . . Dionysiu, D. D. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. (A. C. Environmental, Ed.) *I25*, pag 331 - 349. doi:10.1016/j.apcatb.2012.05.036
- Pham, H. T., Bui, H. M., & Bui, T. X. (2020). Chapter 13 - Advanced oxidation processes for the removal of pesticides. (ELSEVIER, Ed.) *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Emerging Organic Micro-pollutants*, 309 - 330. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819594-9.00013-9>
- Phugare, S. S., Kalyani, D. C., Surwase, S. N., & Jadhav, J. P. (2011). Ecofriendly degradation, decolorization and detoxification of textile effluent by a developed bacterial consortium. (E. a. Safety, Ed.) *74(5)*, Pages 1288-1296. doi:10.1016/j.ecoenv.2011.03.003

- Pourghorbani Dinachali, K., Fadavieslam, M., & Zavareh, S. (2022 de Mayo de 2022). A study of the effect of the synthesis conditions of titanium dioxide on its morphology and cell toxicity properties. (ELSEVIER, Ed.) *Arabian Journal of Chemistry*, 2-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104022>
- Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Blaney, L. (20 de 02 de 2022). Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. *Journal of Environmental Management*, 316, 1 - 19. doi:doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115295
- Programme.(UNEP), U. N. (2022). SULFONATES, LINEAR ALKYL BENZENE. *Researchgate*, 23. Recuperado el 20 de 08 de 2024, de <https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/2022-01/EVA00065%20-%20Evaluation%20statement%20-%2014%20January%202022%20%5B1803%20KB%5D.pdf>
- Purnawan, C., Heru, A., Wahyuningsih, S., Hastuti, P., Masykur, A., Martini, T., & Timur, W. (2023). Photodegradation of sodium dodecyl sulfate and sodium dodecylbenzene sulfonate with hydrothermally synthesized PbTiO₃ catalyst. *Groundwater for Sustainable Development*, 21. doi:[10.1016/j.gsd.2023.100909](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100909)
- Rau Leiva, M. A., & Suazo Cerron, J. E. (21 de marzo de 2021). *ALICIA CONCYTEC*. Recuperado el 16 de abril de 2024, de ALICIA CONCYTEC: file:///C:/Users/User/Documents/Antecedentes%20tesis/Rau_LMA-Suazo_CJE-SD.pdf
- Rodriguez Narvaez, O. M., Peralta Hernandez, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala R., E. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 361 - 380. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.106>
- Romero, J. A. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales "Teoría y principios de diseño"*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Obtenido de <https://acortar.link/TFb53t>

- Sadeghfar, F., & Ghaedi, M. (19 de marzo de 2021). Capítulo 12 - Tratamiento fotocatalítico de contaminantes en medios acuosos. *Interfaz Ciencia y Tecnología*, 32, 725 - 759. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-818806-4.00011-5
- Sakkas, V., Sarro, M., Kalaboka, M., Santoro, V., Albanis, T., & Calza, P. (2017). Evaluating the photocatalytic treatment of stevioside by TiO₂ in different aqueous matrices and identification of transformation products. (S. o. Environment, Ed.) 607-608, pag 568 - 577. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.016
- Salcedo, C. M. (2017). “DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZOICO TEXTIL NARANJA II POR EL MÉTODO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA”. 1 - 84, pag 33. Recuperado el 19 de 09 de 2024, de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/64776e81-a60b-413b-9d6f-9a2057a91d4c/content>
- Sanchez, V. S., & Plazas, T. J. (2022). Remocion de Naranja de Metilo disuelto por medio de fotocatalisis con nanoparticulas de TiO₂ y radiacion solar. (D. d. Ambiental, Ed.) pag: 2-3. Obtenido de <https://acortar.link/QEOCNS>
- Saravanan, A., Deivayanai, V., Kumar, P., Rangasamy, G., & Hemavathy, R. (2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. (Chemosphere, Ed.) 308. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136524
- Saravanan, A., Deivayanai, V., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., Hemavathy, R.V, . . . Alagumalai, K. (15 de setiembre de 2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook . (ELSEVIER, Ed.) *Chemosphere* , 308(3), 2-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>
- Shahrezaei, F., Mansouri, Y., Lorestani, A. A., & Akhbari, A. (2012). Process modeling and kinetic evaluation of petroleum refinery wastewater treatment in a photocatalytic reactor using TiO₂ nanoparticles. (P. Technology, Ed.) vol 221, pag 203 - 212. doi:10.1016/j.powtec.2012.01.003

- Silva Guillen, D. M., & Nieto Ugarte, R. (21 de mayo de 2023). *ALICIA CONCYTEC*. Recuperado el 16 de abril de 2024, de ALICIA CONCYTEC: file:///C:/Users/User/Documents/Antecedentes%20tesis/TESIS-SILVA-NIETO.pdf
- Smulders, E. (2002). "Laundry Detergentes". *Researchgate*, 38-60. Recuperado el 31 de 07 de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/348756048_DETERMINACION_ANALITICA_D_E_DETERGENTES_EN_LAS_AGUAS_DE_LOS_PANTANOS_DE_VILLA
- Srinivasan, S., & Kumar, S. S. (2021). Biodegradation of textile azo dyes by textile effluent non-adapted and adapted *Aeromonas hydrophila*. (E. Research, Ed.) *194*, pag 5 - 8. doi:10.1016/j.envres.2020.110643
- Sun, Z., Huang, X., & Zhang, G. (25 de 12 de 2022). TiO₂-based catalysts for photothermal catalysis: Mechanisms, materials and applications. (Elsevier, Ed.) *Journal of Cleaner Production*, *381*(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135156>
- Taghi, S. M., Dorraji, M. S., Atashi, Z., & Rahmani, A. R. (2014). Photo Catalytic Removal of Sodium Dodecyl Sulfate From Aquatic Solutions With Prepared ZnO Nanocrystals and UV Irradiation. (A. J. Eng, Ed.) pag 2- 4. doi:10.5812/ajehe.166
- Taha, A., & Daffalla, S. (2023). Biochar Derived from Palm Waste Supported Greenly Synthesized MnO₂ Nanoparticles as a Novel Adsorbent for Wastewater Treatment. (N. f. Pollutants), Ed.) *13*(2), pag 451. doi:10.3390/catal13020451
- Torres Pinto, A., T.Silva, A., Ribeiro, R. S., & Bengoa, C. (2021). Manual Tecnico sobre Procesos de oxidacion avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales. (T. P. Andre, Ed.) *CYTED "Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo"*, 2-61. Recuperado el 29 de 08 de 2024, de file:///C:/Users/User/Downloads/Manual-sobre-oxidaciones-avanzadas.pdf
- Tran, H. T., Kosslick, H., Ibad, M. F., Fischer, C., Bentrup, U., Vuong, T. H., & Nguyen, ., L. (2017). Photocatalytic Performance of Highly Active Brookite in the Degradation of Hazardous

- Organic Compounds Compared to Anatase and Rutile. (A. C. Environmental, Ed.) pag 647 - 658. doi:10.1016/j.apcatb.2016.07.017
- Visitacion, L., & Gamboa, N. (2006). Degradación fotocatalítica de detergentes en. *Elsevier* - , XIX, 9. Recuperado el 26 de junio de 2024, de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/91>
- Wahyuni, E. T., Roto, R., Sabrina, M., Anggraini, V., Leswana, N., & Vionita, A. (2016). Photodegradation of Detergent Anionic Surfactant in Wastewater Using UV/TiO₂/H₂O₂ and UV/Fe²⁺/H₂O₂ Processes. (A. J. Chemistry, Ed.) Pag 6-8. doi:10.11648/j.ajac.20160405.13
- Winnicki, M., Latka, L., Jasiorski, M., & Baszczuk, A. (15 de junio de 2021). Mechanical properties of TiO₂ coatings deposited by low pressure cold spraying. (ELSEVIER, Ed.) *Surface and Coatings Technology*, 405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126516>
- Wols, B., & Hofman-Caris, C. (2012). Review of photochemical reaction constants of organic micropollutants required for UV advanced oxidation processes in water. (S. ScienceDirect, Ed.) Pag 2815 - 2827. doi:10.1016/j.watres.2012.03.036
- Wysokowska, K., Cupial, Z., Staszak, M., Zgola-Grzeskowiak, A., Koziol, J., Lawniczak, L., . . . Wyrwas, B. (2024). "Photocatalytic degradation of non-ionic, anionic, and cationic". (". Paper", Ed.) pag 2-17. doi:10.1007/s11696-023-03117-3
- Yang, W., Dou, Z., Liu, Y., Zhao, Y., & Huang, R. (2023). Gaseous mercury capture using seaweed biochars modified by clean ultraviolet/hydrogen peroxide advanced oxidation process. (J. o. production, Ed.) 389. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136121
- Yue, Y., Wang, X., Wu, Q., Han, J., & Jiang, J. (22 de 03 de 2020). Highly recyclable and super-tough hydrogel mediated by dual-functional TiO₂ nanoparticles toward efficient photodegradation of organic water pollutants. (ELSEVIER, Ed.) *Journal of Colloid and Interface Science*, 564, 99-112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.069>

- Zanatta, A., Scoca, D., & Alvarez, F. (2019). Influence of the Anatase and Rutile phases on the luminescent properties of rare-earth-doped TiO₂ films. (J. o. Compounds, Ed.) 780, pag 491 - 497. doi:10.1016/j.jallcom.2018.11.401
- Zelenakova, M. (2020). Methodology for environmental assessment of proposed activity using risk analysis. (E. I. Review, Ed.) pag 199. doi:10.1016/j.eiar.2019.106333
- Zhang, G., Xu, Y., Zhu, J., Li, Y., He, C., Ren, X., . . . Mi, H. (2023). Enhanced photocatalytic H₂ production independent of exciton dissociation in crystalline carbon nitride. (A. C. B:Environmental, Ed.) 338(5). doi:doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123049
- Zhang, Y. L., Yang, J., & Jin-yu, X. (2017). Preparation, characterization, and adsorption-photocatalytic activity of nano TiO₂ embedded in diatomite synthesis materials. (R. Metals, Ed.) 36, pag 987 - 991. doi:10.1007/s12598-014-0290-7
- Zhou, H., & Smith, D. (02 de 2022). Advanced technologies in water and wastewater. (J.Environ.Eng, Ed.) *ResearchGate*, 247-264. doi: 10.1139/S02-020

APENDICES

APENDICE A.

Determinación del porcentaje del dióxido de titanio en la matriz soportada, al inicio y final de los tratamientos del primer sistema (efecto con TiO₂).

En la tabla 25, se observa los valores del titanio en porcentajes; dichos valores fueron determinados en el equipo de XRF (analizadores de rayos X fluorescentes de alta precisión).

Tabla 25

Determinación del % de titanio al inicio y al final de todos los tratamientos del primer sistema (efecto con TiO₂).

Pruebas	% Ti (Inicial)	% Ti (Final)
1	36.19	19.97
2	36.90	20.06
3	36.22	20.30
4	36.38	19.91
5	36.10	19.92
6	36.51	19.64

Según la Tabla N° 25, se presenta la cantidad de titanio en las muestras de soportado.

- **Cálculo del % TiO₂ en la matriz.**

- Masa Atómica del dióxido de titanio (TiO₂): 79.88 g/mol
- Masa Atómica del Titanio (Ti): 47. 867 g/mol
- Relación del TiO₂/Ti: 1.6684

Tabla 26

Determinación del % de dióxido titanio al inicio y al final de todos los tratamientos del primer sistema (efecto con TiO_2).

Pruebas	% TiO_2 (Inicial)	% TiO_2 (Final)
1	60.38	33.0
2	61.57	34.0
3	60.43	33.0
4	60.70	33.0
5	60.23	33.0
6	60.92	33.0

En la tabla 26, se presenta los valores de dióxido de titanio calculadas a partir de la cantidad inicial de titanio.

Figura 17

Determinación del % de Titanio (Ti) en el equipo XRF



En la Figura 17. En el lado derecho, se presenta la medición del titanio en las muestras del catalizador soportado; mientras que en el lado izquierdo se presenta la captura de la pantalla del analizador XRF, donde se visualiza el elemento a detectar la concentración y el margen de medición.

APENDICE B

- **Resultados del barrido espectral.**

En la Figura N°18, se muestra el resultado de la longitud de onda máxima del surfactante aniónico, en la cual se observa a 652 nm la longitud de onda máxima del (SDS). Esta longitud de onda máxima determinada se usó para realizar la curva de calibración y para dar las lecturas de las alícuotas extraídas de la reacción fotocatalítica. La Figura N° 18, se construyó con los datos proporcionados por el equipo.

Figura 18

Longitud de Onda del Surfactante.

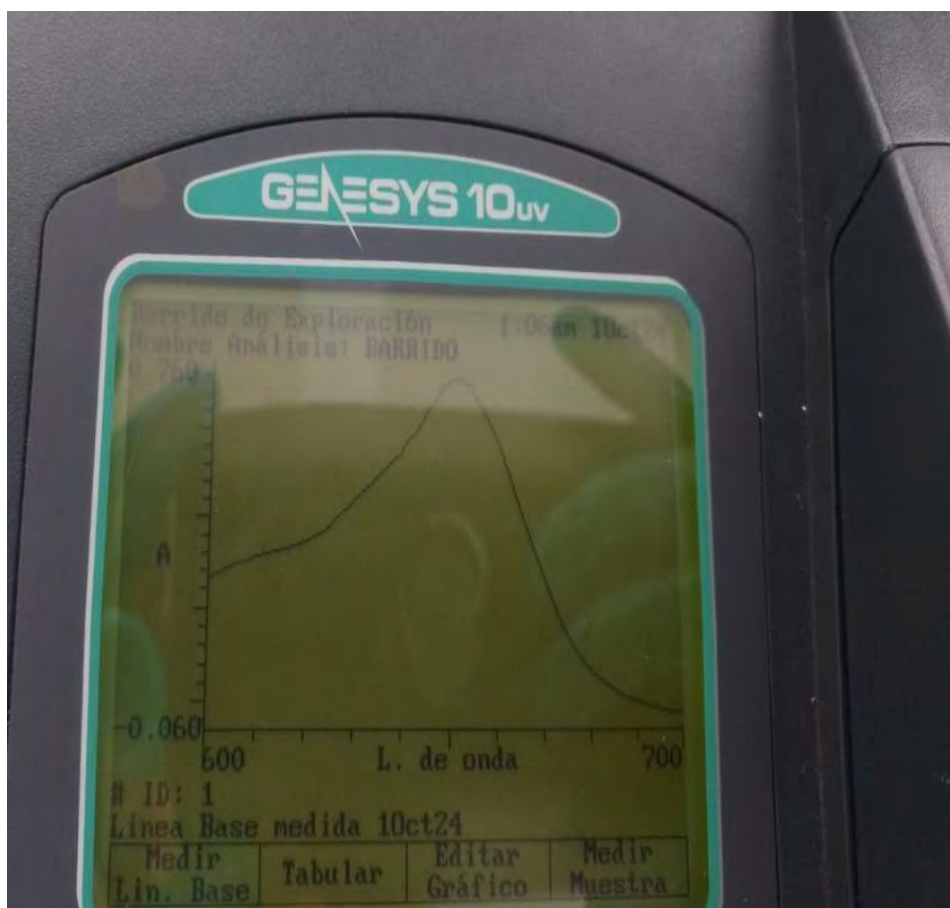


Tabla 27

Barrido Espectrofotométrico UV-Vis del tensioactivo.

Valores del barrido espectrofotométrico para el tensioactivo.									
x	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
600	0.266	620	0.345	640	0.548	660	0.625	680	0.079
602	0.278	622	0.357	642	0.579	662	0.569	682	0.057
604	0.289	624	0.371	644	0.608	664	0.504	684	0.038
606	0.297	626	0.391	646	0.645	666	0.437	686	0.024
608	0.305	628	0.412	648	0.68	668	0.366	688	0.013
610	0.313	630	0.433	650	0.71	670	0.302	690	0.003
612	0.317	632	0.457	652	0.727	672	0.243		
614	0.324	634	0.48	654	0.725	674	0.19		
616	0.33	636	0.5	656	0.703	676	0.144		
618	0.337	638	0.523	658	0.667	678	0.107		

Donde:

X: longitud de onda en nm.**Y:** Absorbancia

Como se observa en la figura N° 18 y en la tabla N°27, la longitud de onda máxima determinada es a 652 nm, a esta longitud de onda se trabajó todas las pruebas experimentales. Lo cual se confirma que el valor obtenido de la longitud es adecuado.

APENDICE C

- **Curva de Calibración.**

Tabla 28

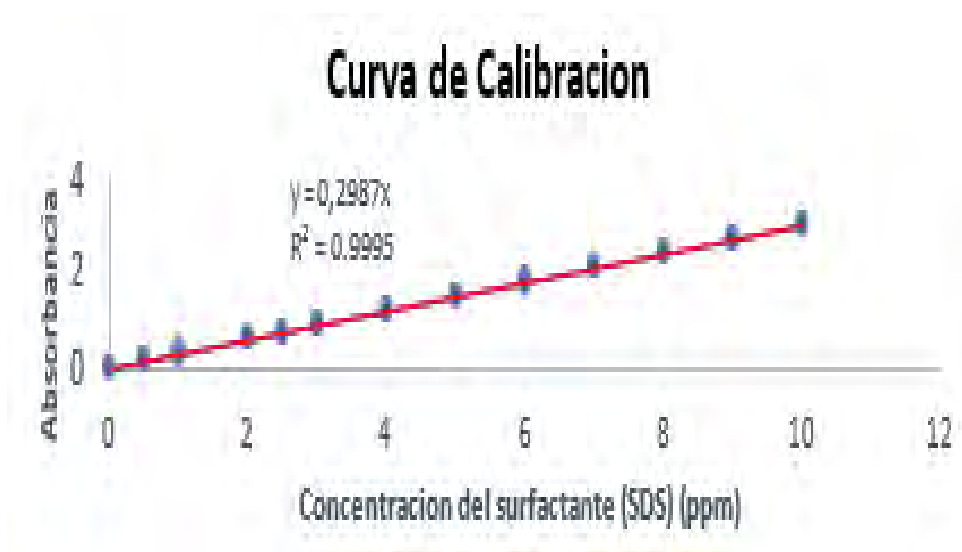
Curva de Calibración para el Surfactante.

Nombre / Código	Concentración (ppm)	Absorbancia
Bk- cal	0	0
Std-Cal N°1	0.5	0.15
Std-Cal N°2	1.0	0.29
Std-Cal N°3	2.0	0.59
Std-Cal N°4	2.5	0.74
Std-Cal N°5	3.0	0.903
Std-Cal N°6	4.0	1.1948
Std-Cal N°7	5.0	1.4935
Std-Cal N°8	6.0	1.7922
Std-Cal N°9	7.0	2.0909
Std-Cal N°10	8.0	2.3896
Std-Cal N°11	9.0	2.6883
Std-Cal N°12	10.0	2.9887

Nota. Donde: (SDS) (ppm) es la concentración del colorante tensoactivo aniónico en partes por millón.

En la Tabla 28. se muestra los datos de la curva de calibración del Surfactante aniónico Lauril sulfato de sodio ($C_{12}H_{25}NaO_4S$) al 99% de pureza.

Figura 19
Curva de calibración



Donde:

$$Y = 0.2987X$$

X: Concentración del tensoactivo SDS (ppm).

Y: Absorbancia del tensoactivo (SDS)

Despejando de la ecuación el valor de “X”, la ecuación es la siguiente.

$$\text{concentracion del tensoactivo (SDS)} = \frac{\text{absorbancia}}{0.2987} \quad (4)$$

En la figura N° 19 se presenta un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9995, lo que indica que existe una relación casi perfecta entre la concentración conocida del surfactante (SDS) y las lecturas de absorbancia obtenidas; en otras palabras, el 99.95% de los cambios en la absorbancia se explican por la variación en la concentración, lo que demuestra que ambas variables están fuertemente relacionadas y siguen un comportamiento lineal muy preciso, por lo tanto, la curva de calibración es altamente confiable y permite estimar con gran exactitud la concentración del surfactante en una muestra a partir de su absorbancia.

APENDICE D

Proceso de Determinación del tensoactivo (SDS) en el laboratorio de Hidrocarburos.

Figura 20

Registro Fotográfico del proceso de extracción con cloroformo.



En la Figura 20: se observa en cada uno de los cuadros (1) la instalación de los materiales, (2) el vaciado de la muestra a las peras de decantación, (3) el acondicionamiento de las muestras, (4) la agregación del azul de metileno.

Figura 21

Proceso de extracción con cloroformo en laboratorio de Hidrocarburos.



En la figura 21: en los cuadros (5) y (6) se observa la extracción con cloroformo de la primera pera de decantación a la segunda, ahí se observa la disminución de la intensidad de la coloración del azul de metileno; mientras que en los cuadros (7) y (8) se realiza la tercera extracción a la fiola de 100 ml para pasar a la determinación de la absorbancia en el espectrofotómetro.

Figura 22

Determinación de la absorbancia en el espectrofotómetro UV Vis.



En la figura 22: se observa en el cuadro (9) el aforo de la muestra con cloroformo; mientras que en el (10) se procede a llenar la muestra a la cubeta, en el cuadro (11) se limpia con papel tisú tratar de rayar o manchar ya que nos brindaría una lectura errónea; en el cuadro (12) se presenta la lectura en el espectrofotómetro para los respectivos cálculos.

ANEXOS.

FICHAS TECNICAS DE LOS PRODUCTOS QUIMICOS.

CHEMILAB

SOLUCIONES Y REACTIVOS

FICHA TECNICA DEL LAURIL SULFATO DE SODIO

ESPECIFICACIONES:

APARIENCIA: SOLIDO BLANCO EN POLVO O CRISTALES PEQUEÑOS

PRESENTACION: FRASCO X 250 GRS PLASTICO NATURAL

USO: EXCLUSIVO PARA LABORATORIO

FECHA DE FABRICACION: 02/04/2024

FECHA DE VENCIMIENTO: 02/04/2026

FORMULA: $C_{12}H_{25}NaO_4S$ P.M: 288.38g/mol

ESPECIFICACIONES DEL REACTIVO.

. PUREZA: 99%

. VALOR DE PH (SOLUCION ACUOSA 1%) 9-10

. PUNTO DE FUSION: 204-207°C

. SOLUBILIDAD: EN AGUA (1:10) CON OPALESCENCIA

. PESO ESPECIFICO: 0.4@ 15°C

· REACTIVO ESTABLE BAJO CONDICIONES NORMALES DE ALMACENAMIENTO

· REACTIVO DE FABRICACION NACIONAL

Guantes. Bata de laboratorio. Respirador de vapor. Asegúrese de que utiliza un respirador certificado / aprobado o equivalente.

CHEMILAB

SOLUCIONES Y REACTIVOS

FICHA TECNICA DEL DIOXIDO DE TITANIO

ESPECIFICACIONES:

APARIENCIA: SOLIDO EN POLVO BLANCO

PRESENTACION: FRASCO X 250 GRS PLASTICO LECHOSO

USO: EXCLUSIVO PARA LABORATORIO

FORMULA: TiO_2 P.M: 79.87g/mol

FECHA DE FABRICACION: 13/03/2024

FECHA DE VENCIMIENTO: 13/03/2026

ESPECIFICACIONES DEL REACTIVO.

· PUREZA: 99%

· REACTIVO DE OLOR INODORO

· PH SUSPENSION ACUOSA: 1% APROX. 8.00

· GRAVEDAD ESPECIFICA: 3.84

· PUNTO DE FUSION: 1.855°C

· SOLUBILIDAD EN AGUA: PRACTICAMENTE INSOLUBLE

· REACTIVO ESTABLE BAJO CONDICIONES NORMALES DE
ALMACENAMIENTO

· MANTENER EL REACTIVO EN LUGAR SECO Y FRESCO

FICHA TECNICA DEL AZUL DE METILENO EN SOLUCION

ESPECIFICACIONES:

APARIENCIA: REACTIVO LIQUIDO EN SOLUCION AZUL

PRESENTACION: FRASCO X 1 LITRO DE PLASTICO NATURAL LECHOSO

USO: EXCLUSIVO PARA LABORATORIO TINCION

FORMULA: $C_{16}H_{18}N_3S \cdot xH_2O$ P.M: 319.85 g/mol

FECHA DE FABRICACION: 16/04/2026

FECHA DE VENCIMIENTO: 16/04/2028

ESPECIFICACIONES DEL REACTIVO.

. AZUL DE METILENO PURO EN CRISTALES PARA LA PREPARACION

-ALCOHOL DE 96%

. AGUA DESTILADA C.S.P HASTA COMPLETAR LA MESCLA

. PH: 3.00

. PUNTO DE FUSION: 180°C

. CONSERVAR DE 5 A 25°C

. ESTABLE EN CONDICIONES NORMALES DE ALMACENAMIENTO

-REACTIVO DE FABRICACION NACIONAL

FICHA TÉCNICA

ACIDO SULFURICO

1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO

Nombre Químico	Acido Sulfurico
Formula Química	H_2SO_4
Peso Molecular	98

2. DESCRIPCION

Líquido claro, de olor picante y penetrante, posee un calor de dilución bastante alto.

3. PROPIEDADES

Pureza como Acido	98% min
-------------------	---------

4. PROPIEDADES

Aspecto Físico	Líquido Claro
Color	Incoloro
Olor	Inoloro, vapor sofocante
Punto de Ebullición	274 ° C
Punto de Fusión	3 ° C
Densidad	1.84 (20 ° C 98% p/p)
pH	0.3 (1.0 N)

Solubilidad en Agua	Soluble
Hierro	50 ppm
Selenio	6 ppm
Cromo	1.0 ppm

1. APLICACIONES

En la fabricación de Sulfato de amonio y toda clase de sulfatos, en la fabricación de pigmentos inorgánicos, tintas, detergentes sintéticos, en la fabricación de pulpa, papel, celulosa, en la refinación de petróleo

INFORMACIÓN ADICIONAL

Los datos proporcionados en esta hoja, son tomados de fuentes confiables y representan la mejor información conocida actualmente sobre la materia, este documento debe utilizarse solo como guía para la manipulación del producto con la precaución adecuada, **DISTRIBUIDORA DE QUIMICOS INDUSTRIALES** no asume responsabilidad alguna por reclamos, pérdidas o daños que resulten del uso inapropiado de la mercancía y/o de un uso distinto para el que fue concebida. El usuario debe hacer sus propias investigaciones para determinar la aplicabilidad de la información consignada en la presente hoja según sus propósitos particulares.