

**FORTALECIMIENTO DE LAS COMPETENCIAS ANALÍTICAS:
REMOCIÓN DE ACETAMINOFÉN EN AGUAS RESIDUALES
SINTÉTICAS POR MEDIO DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA**

ALFONSO RAFAEL ALEAN GARRIDO

**Dirigido por:
(PhD) DORA LUZ GÓMEZ AGUILAR**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRIA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA
BOGOTA D.C.**

2025

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	8
ANTECEDENTES	10
OBJETIVOS	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
REFERENTES CONCEPTUALES	16
Competencias Investigativas.....	16
Enfoque de David Kolb: Aprendizaje Experiencial y Competencias Analíticas	16
Contribución de Javier Torres Salcedo: Competencias Analíticas en el Contexto Colombiano.....	17
Relación entre Competencias Analíticas y Competencias Investigativas	17
Fundamento Fotocatalítico.....	18
Sobre el contaminante modelo: acetaminofén (paracetamol)	22
MARCO METODOLÓGICO	25
Metodología de Investigación.....	25
ETAPAS DE LA METODOLOGÍA	26
Instrumento para Evaluar Competencias Analíticas.....	27
Fase 2: Determinación del Porcentaje de Remoción de Analgésicos mediante Fotocatálisis Heterogénea.....	28
Parámetros de Evaluación	29
Fase 3: Evaluación del Fortalecimiento de Competencias Analíticas.....	29
ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
FASE 1 - APLICACIÓN DEL INSTRUMENTO DE CARACTERIZACIÓN INICIAL DE COMPETENCIAS ANALÍTICAS.....	32
FASE 2 - INTERVENCIÓN FORMATIVA – COMPRENSIÓN APLICADA DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA Y SU IMPACTO AMBIENTAL.....	53
FASE 3 - MONTAJE Y VERIFICACIÓN DEL FOTOCATALIZADOR	57

MONTAJE DEL SISTEMA FOTOCATALÍTICO CASERO.....	57
VERIFICACIÓN CUALITATIVA DEL FOTOCATALIZADOR MEDIANTE AZUL DE METILENO	59
CURVA DE CALIBRACIÓN PARA ACETAMINOFÉN (VALIDACIÓN DEL MÉTODO).....	65
CÁLCULO GENERAL APLICADO	71
DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE ACETAMINOFÉN CON TIO₂ (0,075 G).....	75
FASE 4. IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON ESTUDIANTES.....	78
ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL GRUPO DE ESTUDIANTES.....	80
<i>CONCLUSIONES.....</i>	<i>87</i>
<i>LIMITANTES</i>	<i>89</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	<i>90</i>
<i>ANEXOS.....</i>	<i>97</i>

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo investigativo se desarrolló con el propósito de fortalecer las competencias analíticas en estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, mediante el abordaje de una problemática ambiental actual: la presencia de contaminantes analgésicos emergentes, específicamente acetaminofén, en aguas residuales sintéticas. Para ello, se integraron conceptos fundamentales de la química ambiental y técnicas experimentales avanzadas, con especial énfasis en la fotocatalisis heterogénea, como estrategia para promover el análisis riguroso de fenómenos asociados a la degradación de compuestos orgánicos persistentes.

El fortalecimiento de las competencias analíticas constituye un eje articulador de la formación científica y profesional, dado que permite a los estudiantes desarrollar capacidades de interpretación, razonamiento crítico, evaluación de evidencia y toma de decisiones fundamentadas. En coherencia con los lineamientos del Ministerio de Educación Nacional, dichas competencias representan un componente esencial en la consolidación del pensamiento científico y en el desarrollo de habilidades investigativas en el ámbito de la educación superior (MEN, 2024). Su incorporación en actividades de experimentación, análisis de datos y resolución de problemas reales contribuye a la formación integral y ética de los futuros docentes y profesionales en ciencias.

Diversos autores han señalado la importancia de fortalecer las competencias investigativas desde las etapas iniciales de la formación universitaria, destacando su papel en la construcción del pensamiento crítico y la cultura de la investigación (Ruiz & Fernández, 2018). En este sentido, González et al. (2020) enfatizaron que la consolidación de competencias analíticas favorece la comprensión profunda de los fenómenos científicos y potencia la capacidad de los estudiantes para enfrentar desafíos ambientales, sociales y tecnológicos propios del contexto contemporáneo.

En los programas de formación en química, estas competencias resultan particularmente relevantes debido a la necesidad de interpretar variables, modelar comportamientos de sustancias y comprender procesos fisicoquímicos que demandan rigor conceptual. García y Ramírez (2019) señalaron que los maestrantes y licenciandos deben desarrollar capacidades analíticas sólidas para transferir conocimientos al ámbito educativo y promover aprendizajes significativos en sus futuros estudiantes. Asimismo, Arango, Barrera y Cruz (2020) plantearon que integrar la investigación en los currículos de química favorece la apropiación de competencias analíticas que permiten abordar problemáticas ambientales con criterio técnico y científico.

El contexto ambiental actual evidencia un incremento en la presencia de Compuestos Orgánicos Emergentes y Persistentes (COE), y (COP) entre ellos aquellos de origen farmacéutico utilizados masivamente en actividades domésticas y clínicas. El acetaminofén, como uno de los analgésicos de mayor consumo, ha sido identificado como un contaminante emergente cuya presencia en cuerpos de agua requiere análisis detallado y métodos avanzados de remoción. La fotocatalisis heterogénea ha sido ampliamente reportada como una alternativa eficaz para la degradación de estos compuestos, utilizando dióxido de titanio (TiO_2) activado por radiación ultravioleta para promover reacciones de oxidación que disminuyen la toxicidad del contaminante (Gómez-Pacheco et al., 2020; Giraldo & Bernal, 2022).

La investigación adoptó un enfoque mixto, coherente con lo expuesto por Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), integrando procedimientos cuantitativos orientados a la medición precisa de variables fisicoquímicas, y procedimientos cualitativos centrados en la interpretación de experiencias y análisis reflexivo por parte de los participantes. Esta complementariedad permitió una visión amplia y fundamentada del fenómeno estudiado, fortaleciendo las competencias analíticas mediante la evaluación crítica de datos experimentales y la comprensión de los procesos involucrados en la degradación fotocatalítica del contaminante.

En síntesis, el estudio contribuyó al fortalecimiento de las competencias analíticas mediante la integración de conocimientos teóricos, el análisis experimental riguroso y la evaluación de variables que optimizan la remoción de acetaminofén, como la concentración del catalizador, la concentración del contaminante y la intensidad lumínica. De esta manera, se consolidó una propuesta formativa alineada con las demandas de la educación científica contemporánea, promoviendo la responsabilidad ambiental, el pensamiento crítico y la capacidad de los estudiantes para interpretar datos y proponer soluciones fundamentadas en el campo de la química aplicada.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los últimos años, se evidenció un aumento significativo en la presencia de contaminantes emergentes en los cuerpos de agua sintéticos, entre ellos los fármacos, los cuales generaron un creciente interés por parte de la comunidad científica, los entes reguladores ambientales y la sociedad en general. Los residuos de medicamentos, como el acetaminofén (paracetamol), representaron un riesgo ambiental considerable, debido a que su consumo masivo y su posterior liberación en cuerpos de agua a través de efluentes domésticos e industriales ocurrieron sin tratamientos adecuados (González et al., 2016). Diversos estudios confirmaron que el acetaminofén, un analgésico y antipirético ampliamente utilizado, fue uno de los fármacos más detectados en aguas residuales, y su acumulación en el ambiente acuático provocó efectos tóxicos en diversas especies (Rodríguez-Mozaz et al., 2020).

En el caso colombiano, la legislación ambiental relacionada con la disposición de contaminantes farmacéuticos se mantuvo limitada y escasa durante el periodo de estudio. No obstante, se registraron avances normativos en cuanto a la regulación de vertimientos industriales y domésticos, especialmente con la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual estableció los parámetros y límites máximos permisibles para la descarga de contaminantes líquidos. Sin embargo, aunque esta norma reguló contaminantes tradicionales (como metales pesados y materia orgánica), persistió un vacío normativo frente a los contaminantes emergentes, entre ellos los fármacos, lo que evidenció la necesidad urgente de diseñar e implementar soluciones tecnológicas que permitieran su tratamiento eficiente (García et al., 2018).

En este contexto, la fotocatalisis heterogénea se posicionó como una técnica innovadora y efectiva para la degradación de fármacos en aguas residuales. Este proceso avanzado de oxidación, basado en el uso de un catalizador activado por radiación lumínica, demostró su eficacia en la degradación de una amplia gama de contaminantes orgánicos, incluyendo el acetaminofén (García-Muñoz et al., 2021). Los estudios desarrollados entre 2014 y 2024 evidenciaron que el empleo de fotocatalizadores basados en TiO_2 y materiales nanoestructurados logró altos porcentajes de remoción de acetaminofén, incluso en bajas concentraciones, típicas de las aguas residuales tratadas (Gómez-Pacheco et al., 2020; Giraldo-Aguirre & Bernal, 2022).

La implementación de estas tecnologías requirió un abordaje interdisciplinario, integrando conocimientos de química, ciencias ambientales y tecnología, junto con una comprensión profunda de los fenómenos fisicoquímicos involucrados. En ese marco, la fotocatalisis heterogénea, como proceso emergente para la remoción de contaminantes farmacéuticos, constituyó un recurso valioso para el desarrollo de habilidades científicas e investigativas en los estudiantes de Licenciatura en

Química, al permitirles analizar y proponer soluciones aplicadas a problemáticas ambientales reales (Jiménez et al., 2020).

En el marco del presente proyecto, se promovió el desarrollo de competencias analíticas en los estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, mediante el diseño, implementación y análisis de experimentos orientados a la degradación del acetaminofén en aguas utilizando la fotocatalisis heterogénea como recurso didáctico y científico. Asimismo, se fomentó el trabajo colaborativo y multidisciplinario, integrando saberes de química y ciencias ambientales para abordar la problemática de contaminación por fármacos, impulsando la creación de soluciones tecnológicas innovadoras con potencial de aplicación en el contexto colombiano.

De esta manera, la integración del enfoque colaborativo y el aprendizaje investigativo permitió a los estudiantes desarrollar competencias científicas, pensamiento crítico y conciencia ambiental, favoreciendo una formación integral y responsable frente a los desafíos contemporáneos asociados a la gestión de residuos farmacéuticos y la sostenibilidad ambiental (Suárez et al., 2023).

En coherencia con los antecedentes expuestos y con la necesidad de fortalecer las competencias analíticas a partir de experiencias formativas contextualizadas, el estudio se orientó por la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se fortalecen las competencias analíticas en un grupo de estudiantes del programa de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional mediante una estrategia de aprendizaje experiencial basada en la fotocatalisis heterogénea para la remoción de acetaminofén en aguas residuales sintéticas?

JUSTIFICACIÓN

La presencia creciente de contaminantes emergentes en cuerpos de agua sintéticas, en particular los residuos farmacéuticos como el acetaminofén, se configuró como una problemática ambiental prioritaria en los últimos años. Diversas investigaciones han documentado los efectos adversos que estos compuestos generan en los ecosistemas acuáticos, entre ellos alteraciones endocrinas y riesgos potenciales para la salud humana debido a sus procesos de persistencia y bioacumulación (Gómez-Pacheco et al., 2020). En consecuencia, la necesidad de explorar tecnologías avanzadas para su remoción ha adquirido relevancia tanto en el ámbito científico como en el educativo, especialmente al integrar procesos experimentales como la fotocátalisis heterogénea, la cual se ha consolidado como una alternativa eficiente para la degradación de este tipo de contaminantes.

En el contexto colombiano, aunque la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció criterios para el control de vertimientos industriales y domésticos, esta normativa no contempló de manera explícita los contaminantes emergentes, incluidos los fármacos de uso masivo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Este vacío regulatorio implica la necesidad de profundizar en investigaciones aplicadas y en procesos formativos que permitan desarrollar capacidades técnicas y analíticas para enfrentar estos desafíos ambientales de manera efectiva. En este marco, la academia desempeña un papel clave al promover la formación de profesionales capaces de analizar, interpretar y proponer soluciones innovadoras basadas en la ciencia.

La fotocátalisis heterogénea, como proceso avanzado de oxidación que emplea catalizadores activados por radiación lumínica para generar radicales capaces de mineralizar compuestos orgánicos, ha demostrado una alta eficiencia en la remoción de fármacos como el acetaminofén, incluso en bajas concentraciones (García-Muñoz et al., 2021). Esta técnica supera las limitaciones de los métodos de tratamiento convencionales y representa una alternativa prometedora para países en vías de desarrollo como Colombia, en donde se requieren soluciones sostenibles, de bajo costo y fácilmente adaptables a diferentes contextos (Giraldo-Aguirre & Bernal, 2022). No obstante, su implementación demanda el fortalecimiento de capacidades investigativas, experimentales y analíticas en la comunidad académica, particularmente en estudiantes en formación inicial.

En este sentido, el presente proyecto se justifica por su contribución directa al fortalecimiento de las competencias analíticas en estudiantes de Licenciatura en

Química de la Universidad Pedagógica Nacional. A través de una estrategia de aprendizaje experiencial, basada en el diseño y ejecución de experimentos reales sobre la degradación fotocatalítica del acetaminofén, se promovió la comprensión profunda de los fenómenos fisicoquímicos asociados, así como el análisis crítico de datos, la interpretación rigurosa de resultados y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia.

La pertinencia del proyecto se sustenta en tres ejes fundamentales:

1. Relevancia Ambiental y Normativa: La creciente contaminación por fármacos, junto con la ausencia de regulaciones específicas sobre contaminantes emergentes en Colombia, evidencia la necesidad de formar profesionales capaces de investigar, diseñar y evaluar alternativas tecnológicas para su tratamiento (García et al., 2018). Este proyecto aporta conocimientos aplicados que pueden contribuir, a futuro, al fortalecimiento de políticas ambientales y a la adopción de tecnologías de remoción innovadoras en sectores productivos y gubernamentales.
2. Fortalecimiento de Competencias Analíticas e Investigativas: La integración de actividades experimentales orientadas a la remoción de contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea permitió desarrollar en los estudiantes habilidades analíticas esenciales, tales como la formulación de hipótesis, el control de variables, el análisis cuantitativo, la validación de resultados y la argumentación basada en datos. Estas competencias responden a las demandas formativas establecidas por el MEN (2024) y potencian el perfil profesional de los futuros docentes e investigadores en química (Jiménez et al., 2020).
3. Impacto Ético y Formativo: El proyecto fomentó la reflexión crítica sobre la responsabilidad social y ambiental de los científicos en formación. Al trabajar directamente con una problemática real, los estudiantes fortalecieron su conciencia ambiental, su compromiso con la sostenibilidad y su capacidad para evaluar las implicaciones éticas de sus decisiones y acciones en el ámbito científico (Suárez et al., 2023).

ANTECEDENTES

Teniendo en cuenta la problemática expuesta, fue necesario realizar una búsqueda sistemática que permitiera identificar investigaciones previas relacionadas con el desarrollo de competencias investigativas especialmente competencias analíticas en procesos de formación docente en ciencias. Para ello, se emplearon criterios de búsqueda orientados a garantizar la pertinencia y actualidad de la información:

- Palabras clave: competencias analíticas, competencias investigativas, formación docente en ciencias, fotocatalisis heterogénea, contaminantes emergentes, educación científica, aprendizaje experiencial;
- rango temporal: publicaciones entre 2014 y 2024, acorde con el auge internacional de los estudios sobre contaminantes emergentes y el fortalecimiento del enfoque por competencias en la educación científica;
- tipos de documentos: artículos indexados, tesis de maestría y doctorado, informes institucionales y documentos ministeriales.

Esta revisión permitió establecer un marco sólido que fundamenta el presente estudio y evidenciar la pertinencia de fortalecer las competencias analíticas mediante estrategias de formación basadas en la experimentación y el análisis científico aplicado.

COMPETENCIAS INVESTIGATIVAS

En el ámbito académico contemporáneo, el desarrollo de competencias investigativas ha adquirido un papel central en la formación de docentes y profesionales de las ciencias, dado que estas competencias promueven la construcción de conocimiento, el pensamiento crítico y la capacidad de resolver problemas complejos basados en evidencia. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2019) destaca que las competencias investigativas son esenciales para preparar ciudadanos capaces de enfrentar desafíos ambientales, tecnológicos y sociales de manera informada, crítica y responsable.

A nivel internacional, países como Finlandia, Canadá y Singapur han consolidado modelos educativos que integran prácticas investigativas desde la educación básica hasta la formación superior. Estos sistemas promueven procesos de análisis, indagación y experimentación, entendiendo que la investigación escolar particularmente en ciencias fortalece la capacidad analítica y fomenta aprendizajes significativos basados en la experiencia (Martínez & Contreras, 2022).

En términos generales, las competencias investigativas se agrupan en tres grandes categorías:

1. Competencias metodológicas

Relacionadas con la capacidad para diseñar, planear y ejecutar investigaciones. Incluyen la formulación adecuada de problemas, la operacionalización de variables, el trabajo experimental y el uso de herramientas científicas para la recolección y análisis de datos. Estas competencias se fortalecen mediante experiencias formativas que promueven la acción práctica, como el learning by doing, estrategia ampliamente implementada en programas de ciencias en Estados Unidos y Canadá (González et al., 2020).

2. Competencias analíticas (eje del presente estudio)

Se refieren a la habilidad para interpretar, evaluar y relacionar datos e información científica, así como para distinguir patrones, identificar tendencias, establecer inferencias válidas y justificar conclusiones. En contextos educativos de alto rendimiento como Singapur y Finlandia estas competencias se fortalecen mediante metodologías activas y estrategias experimentales que sitúan al estudiante en escenarios auténticos de resolución de problemas experimentales (Salazar & Ruiz, 2018).

En concordancia con ello, el presente proyecto retoma las competencias analíticas como categoría central, dado que permiten comprender en profundidad procesos fisicoquímicos complejos, como la fotocatalisis heterogénea aplicada a la degradación de contaminantes emergentes, y promueven una formación científica rigurosa mediante el análisis de variables, el registro sistemático y la interpretación crítica de resultados.

3. Competencias comunicativas

Relacionadas con la capacidad de divulgar resultados de investigación de manera coherente, académica y accesible a diversas audiencias. Países como Reino Unido y Países Bajos han fortalecido estas competencias mediante la inclusión de prácticas de escritura científica, presentaciones académicas y socialización de resultados en formatos profesionales (OECD, 2019).

COMPETENCIAS INVESTIGATIVAS EN COLOMBIA

En el contexto colombiano, el fortalecimiento de las competencias investigativas ha sido una prioridad del Ministerio de Educación Nacional (MEN). Programas como Ondas, hoy gestionado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, han promovido el desarrollo del pensamiento científico y la indagación desde los primeros niveles escolares, incentivando la investigación como experiencia formativa que articula saberes y permite comprender realidades locales (MEN, 2016).

En la educación superior, los lineamientos curriculares del MEN han orientado la inclusión de competencias investigativas en los programas de formación docente. En la Universidad Pedagógica Nacional, programas como la Maestría en Docencia de la Química han enfatizado en la formación de docentes capaces de diseñar experiencias investigativas en sus aulas, fortaleciendo así las competencias analíticas, metodológicas y comunicativas de sus estudiantes (García & Ramírez, 2019).

No obstante, persisten desafíos. Martínez y Contreras (2022) señalaron brechas en el acceso a recursos tecnológicos y ambientes experimentales, especialmente en instituciones rurales. Para atender esta problemática, se han implementado estrategias de mediación digital y modelos de experimentación asistida que buscan democratizar la investigación escolar y promover competencias investigativas en contextos con limitaciones de infraestructura (Sánchez & López, 2023).

Fotocatálisis Heterogénea

Los contaminantes orgánicos emergentes como el acetaminofén, comúnmente encontrados en aguas residuales urbanas e industriales, tienden a ser altamente persistentes debido a su complejidad química y a su resistencia a los tratamientos tradicionales, lo cual puede ocasionar un impacto considerable en los ecosistemas acuáticos y representa un riesgo potencial para la salud humana (Rodríguez-Mozaz et al., 2020). En respuesta a esta problemática, la fotocatalisis heterogénea ha emergido como una tecnología o un tratamiento cuaternario para la remoción eficiente de estos compuestos, al permitir la degradación de moléculas orgánicas

complejas mediante la activación de fotocatalizadores bajo la irradiación de luz ultravioleta.

Una de las ventajas de trabajar con esta técnica para la remoción de contaminantes orgánicos emergentes es el uso de dióxido de titanio (TiO_2), debido a que es uno de los fotocatalizadores más utilizados y estudiados en la remoción de contaminantes farmacéuticos. Sus propiedades semiconductoras, su estabilidad química y su capacidad para generar especies reactivas de oxígeno (ROS), como radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), los cuales atacan y degradan las moléculas orgánicas, permiten obtener valores óptimos en la remoción de sustancias con alto contenido de carbono en sus estructuras (Gómez-Pacheco et al., 2020). El proceso inicia cuando los fotones de una fuente de luz, generalmente en el rango ultravioleta, excitan los electrones del TiO_2 , lo que produce un par electrón-hueco. El electrón puede reducir especies presentes en el agua, mientras que el hueco positivo genera radicales hidroxilos al reaccionar con el agua en la superficie del catalizador, promoviendo así una serie de reacciones de oxidación-reducción que descomponen los contaminantes orgánicos (García-Muñoz et al., 2021).

En estudios recientes, el TiO_2 ha mostrado una alta efectividad en la degradación del acetaminofén. Giraldo-Aguirre y Bernal (2022) demostraron que, bajo condiciones optimizadas de pH y concentración de catalizador, se logra una degradación de analgésicos de hasta el 90% en menos de una hora, lo cual destaca la rapidez y eficiencia de la fotocatalisis heterogénea frente a otros métodos de tratamiento. El proceso de degradación mediante fotocatalisis se caracteriza por la ruptura de sus enlaces químicos, lo cual permite la conversión del compuesto en subproductos menos tóxicos y más biodegradables, favoreciendo su posterior eliminación en sistemas de tratamiento biológico (Martínez et al., 2019).

En el caso del acetaminofén, el TiO_2 también ha mostrado resultados prometedores en su remoción en aguas residuales. Suárez y colaboradores (2018) reportaron que, mediante la optimización de variables como la intensidad lumínica y la carga de catalizador, es posible alcanzar una degradación completa del acetaminofén en un tiempo relativamente corto. En sus experimentos, se observó que el pH juega un papel crucial en la eficiencia del proceso, pues afecta la carga superficial del TiO_2 y la disposición de las moléculas de acetaminofén para ser atacadas por los radicales hidroxilos. Además, la exposición prolongada a la luz UV aumenta la generación de radicales libres, promoviendo una mayor tasa de degradación y una remoción efectiva del compuesto farmacéutico (Salazar & Medina, 2021).

Además de TiO_2 , otros materiales han sido estudiados en la fotocatalisis heterogénea para la remoción de fármacos. Los marcos organometálicos (MOFs), en particular los basados en hierro, han mostrado estabilidad y eficiencia bajo irradiación de luz visible, lo que abre la posibilidad de utilizar luz solar en lugar de UV, reduciendo así los costos energéticos (González et al., 2020). Estos MOFs no solo aumentan la capacidad de absorción de luz visible, sino que también

incrementan la superficie activa y, por ende, la generación de radicales hidroxilos, haciendo el proceso más efectivo para la remoción de contaminantes como el acetaminofén.

Por último, la investigación en fotocatalisis heterogénea aplicada a la eliminación de contaminantes farmacéuticos es de gran importancia en el ámbito académico, ya que permite a los estudiantes de química involucrarse en el desarrollo de soluciones sostenibles para problemas ambientales. El estudio de esta tecnología facilita el desarrollo de competencias investigativas clave, como el diseño experimental, el análisis crítico de variables, la interpretación de resultados y la comunicación científica, todas habilidades esenciales para la formación de profesionales en ciencias ambientales y químicas (García & Ramírez, 2019). Estas competencias son fundamentales para que los estudiantes comprendan los desafíos asociados con el tratamiento de aguas y la mitigación de contaminantes emergentes, además de promover el desarrollo de soluciones innovadoras aplicables en contextos reales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, en la asignatura de énfasis disciplinar II mediante una estrategia de aprendizaje experiencial basada en la fotocatalisis heterogénea para la remoción de acetaminofén en aguas residuales sintéticas.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las competencias analíticas de los estudiantes mediante la aplicación de los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo, diseñando instrumentos de evaluación acordes con los indicadores de dichos modelos y realizando su validación por medio de un juicio de experto, análisis de validez de contenido y estimación de fiabilidad interna para garantizar la pertinencia, coherencia y precisión de las mediciones.
2. Determinar el porcentaje de remoción del acetaminofén en aguas residuales sintéticas mediante el proceso de fotocatalisis heterogénea, desarrollando protocolos experimentales reproducibles y empleando técnicas de análisis químico que permitan obtener datos confiables para la integración con el proceso formativo y el fortalecimiento de las competencias analíticas.
3. Evaluar la efectividad de la estrategia de aprendizaje experiencial implementada para el fortalecimiento de las competencias analíticas, mediante el diseño y validación de rúbricas, listas de verificación e instrumentos cualitativos y cuantitativos que midan el progreso de los estudiantes en el análisis, interpretación de datos, razonamiento crítico y toma de decisiones fundamentadas en evidencia.

REFERENTES CONCEPTUALES

Competencias Investigativas

Las competencias investigativas analíticas constituyen un conjunto de habilidades fundamentales en el proceso de investigación científica, ya que permiten a los estudiantes desarrollar una comprensión profunda, crítica y fundamentada de los fenómenos de estudio. Estas competencias comprenden la capacidad de evaluar, interpretar y aplicar datos, así como de establecer conexiones y realizar inferencias sobre información científica (Kolb, 2015). En el contexto de la educación en química, el desarrollo de competencias analíticas permite a los estudiantes afrontar problemas complejos, analizar resultados experimentales y formular conclusiones fundamentadas, lo que resulta esencial en la formación de futuros investigadores y docentes de ciencias.

Enfoque de David Kolb: Aprendizaje Experiencial y Competencias Analíticas

David Kolb (2015), en su teoría de aprendizaje experiencial, destaca la importancia de involucrar a los estudiantes en experiencias directas que promuevan la reflexión y el análisis crítico, procesos clave para el desarrollo de competencias analíticas. En su obra *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Kolb argumenta que el aprendizaje significativo ocurre cuando los estudiantes participan en un ciclo de cuatro etapas: experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa. Este modelo facilita el desarrollo de competencias analíticas, ya que la etapa de observación reflexiva invita a los estudiantes a analizar sus experiencias, identificar patrones y elaborar conclusiones, mientras que la conceptualización abstracta requiere que integren sus hallazgos con el conocimiento teórico existente.

Kolb resalta que las competencias analíticas no solo se desarrollan mediante la adquisición de conocimientos teóricos, sino a través de la aplicación de dichos conocimientos en contextos prácticos y dinámicos, en los que los estudiantes pueden experimentar y reflexionar sobre sus resultados. En la educación en química, este enfoque permite que los estudiantes analicen datos obtenidos de experimentos de laboratorio, evalúen la precisión de sus métodos y comprendan el impacto de variables experimentales. La aplicación de este modelo ha demostrado ser efectiva en la enseñanza de ciencias, ya que fomenta el desarrollo de habilidades analíticas al permitir que los estudiantes relacionen conceptos teóricos con experiencias prácticas (González et al., 2020).

Contribución de Javier Torres Salcedo: Competencias Analíticas en el Contexto Colombiano

En el contexto colombiano, Javier Torres Salcedo (2019) ha investigado el desarrollo de competencias investigativas en educación superior, haciendo énfasis en el análisis crítico como eje central. En su artículo "Desarrollo de competencias investigativas en estudiantes de educación superior en Colombia: un enfoque hacia el análisis crítico", Torres Salcedo argumenta que las competencias analíticas son esenciales para que los estudiantes comprendan y apliquen el conocimiento científico de manera eficaz. Según Torres, el análisis crítico permite a los estudiantes discernir entre información relevante e irrelevante, identificar relaciones causales y evaluar la validez de sus conclusiones, competencias fundamentales en el proceso investigativo.

Torres Salcedo sostiene que el desarrollo de competencias analíticas en estudiantes colombianos enfrenta desafíos debido a factores como la falta de acceso a recursos tecnológicos y educativos en algunas regiones del país. Sin embargo, propone que la implementación de metodologías activas, como el Aprendizaje Basado en Problemas (ABPr) y el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), puede facilitar el desarrollo de estas competencias. Estas metodologías promueven un aprendizaje activo y participativo, en el que los estudiantes analizan datos reales y proponen soluciones fundamentadas a problemas científicos, fortaleciendo así su capacidad analítica y crítica (Torres Salcedo, 2019).

Relación entre Competencias Analíticas y Competencias Investigativas

Las competencias investigativas integran una serie de habilidades y conocimientos que permiten a los estudiantes abordar problemas de investigación de manera rigurosa. Entre estas competencias, las competencias analíticas ocupan un lugar central, ya que facilitan el análisis de datos y la interpretación de resultados en investigaciones científicas. En el marco de las investigaciones de Kolb y Torres Salcedo, las competencias analíticas no solo abarcan el análisis de datos, sino también la capacidad de los estudiantes para formular hipótesis, diseñar experimentos y evaluar críticamente sus hallazgos.

De acuerdo con la teoría de aprendizaje experiencial de Kolb, el desarrollo de competencias investigativas analíticas es un proceso dinámico que se fortalece con la participación activa de los estudiantes en experiencias prácticas, promoviendo la reflexión y el pensamiento crítico (Kolb, 2015). Por su parte, Torres Salcedo enfatiza la necesidad de adaptar estos enfoques a los contextos locales, sugiriendo que el análisis crítico puede fomentarse mediante el uso de problemáticas reales y relevantes para los estudiantes, lo cual enriquece su proceso de aprendizaje y los prepara para enfrentar desafíos científicos y tecnológicos en Colombia (Torres Salcedo, 2019).

Finalmente, las competencias investigativas analíticas son esenciales en la educación científica, ya que permiten a los estudiantes desarrollar una comprensión profunda y fundamentada de los problemas de investigación. La teoría de aprendizaje experiencial de Kolb y los aportes de Torres Salcedo en el contexto colombiano destacan la importancia de integrar estas competencias en el currículo educativo mediante metodologías activas y experiencias prácticas. La implementación de estos enfoques fomenta el análisis crítico y la aplicación del conocimiento científico, promoviendo una formación integral y contextualizada que prepara a los estudiantes para desempeñarse de manera eficaz en el campo de la investigación científica.

Fundamento Fotocatalítico

La fotocatalisis heterogénea constituye una alternativa tecnológica de gran relevancia para la mitigación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, especialmente aquellos derivados de productos farmacéuticos como el acetaminofén y el ibuprofeno. Este proceso se basa en la activación de un material semiconductor mediante la irradiación con luz ultravioleta, generando reacciones de oxidación capaces de transformar compuestos orgánicos complejos en sustancias menos tóxicas o completamente mineralizadas (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; Arango, Barrera & Cruz, 2020). Desde el punto de vista didáctico, esta técnica representa una oportunidad para abordar conceptos fundamentales de la química ambiental, como la transferencia de energía, la formación de radicales y la cinética de reacción, enmarcados dentro de un contexto sostenible y experimental.

El dióxido de titanio (TiO_2) es reconocido como uno de los catalizadores más eficientes en procesos de fotocatalisis, debido a su estabilidad química, bajo costo y elevada capacidad para absorber radiación ultravioleta. Cuando este material se encuentra expuesto a fotones cuya energía es igual o superior a la de su banda prohibida, se produce la excitación de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, generándose pares electrón-hueco (e^-/h^+) que participan en una serie de reacciones redox en la superficie del catalizador (Carbajo, 2013). Este fenómeno puede interpretarse desde la teoría de bandas, donde los orbitales atómicos del sólido se superponen formando niveles energéticos deslocalizados, definidos como banda de valencia (BV) y banda de conducción (BC). Dichas bandas se asocian respectivamente con los orbitales moleculares ocupados de mayor

energía (HOMO) y los desocupados de menor energía (LUMO), cuya interacción determina la reactividad del material (Madriz et al., 2016).

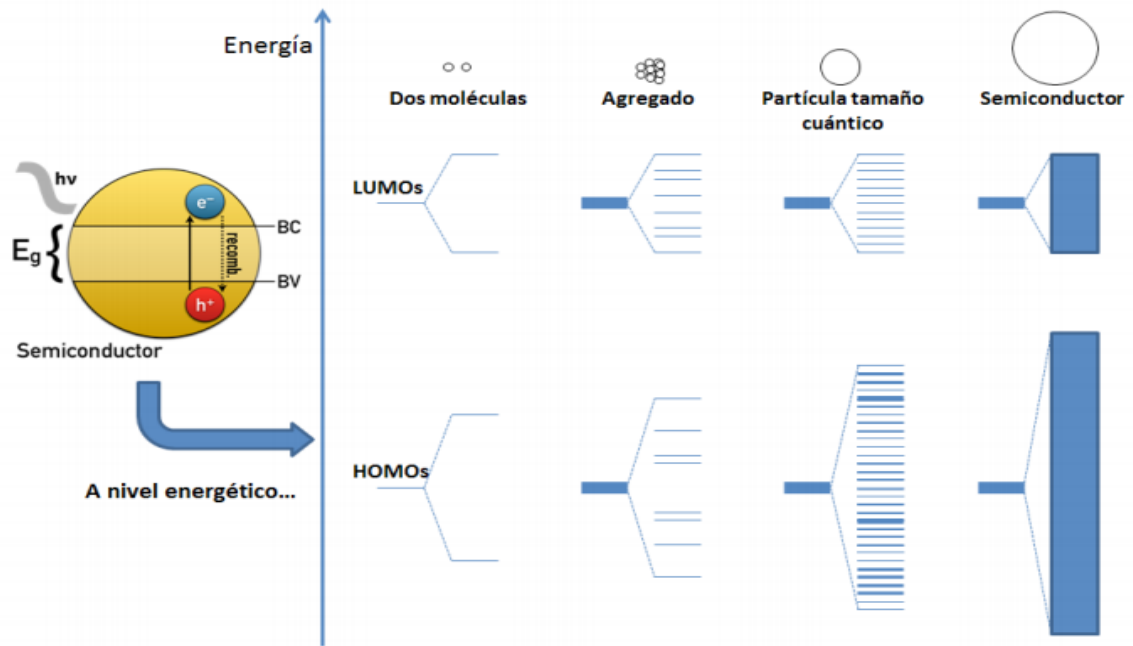


Figura 1. Orbitales moleculares en la conformación de las bandas de valencia y conducción. (Madriz, 2016.)

Como se observa en la *figura 1* cuando la energía incidente es absorbida por el TiO_2 , se produce una separación de cargas dentro de su red cristalina. Los huecos generados en la banda de valencia (h^+) actúan como agentes oxidantes, favoreciendo la formación de radicales hidroxilos ($\bullet OH$) a partir de moléculas de agua adsorbidas o iones hidroxilo presentes en la superficie. De manera paralela, los electrones excitados hacia la banda de conducción (e^-) reaccionan con moléculas de oxígeno disuelto, generando radicales superóxidos ($O_2^{\bullet -}$), que contribuyen a la degradación de contaminantes orgánicos (Nora, 2015). Estos radicales poseen un alto poder oxidante, permitiendo romper enlaces covalentes en moléculas complejas, proceso que se traduce en la descomposición de compuestos recalcitrantes presentes en aguas residuales. No obstante, uno de los desafíos del proceso radica en la recombinación de los pares electrón-hueco, fenómeno que disminuye la eficiencia catalítica al liberar la energía en forma de calor. Para minimizar este efecto, se recomienda mantener una atmósfera rica en oxígeno, de modo que los electrones sean capturados y transformados en radicales activos (Madriz et al., 2016).

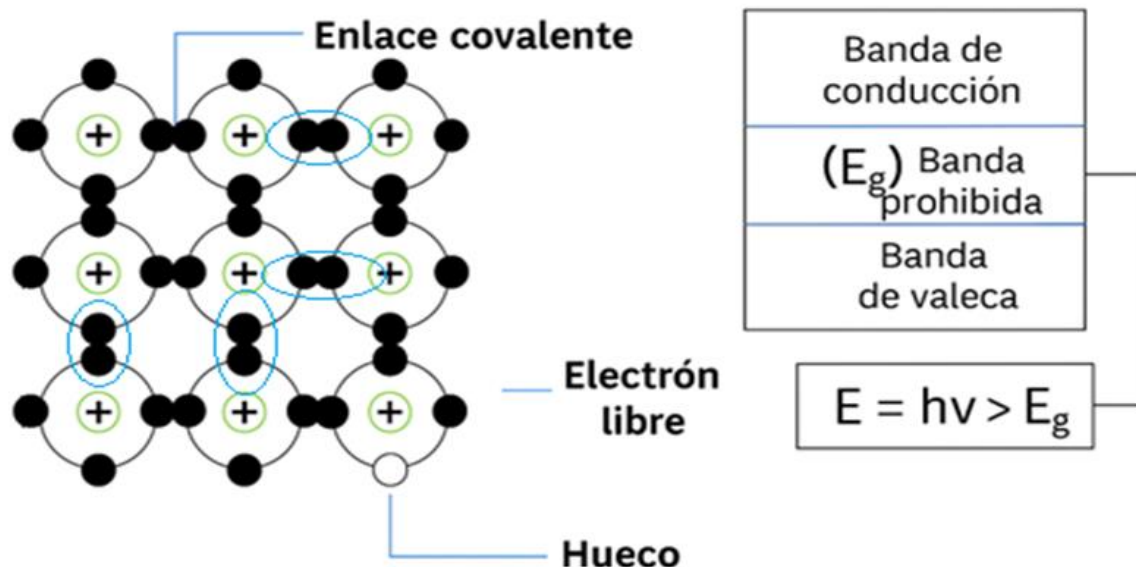


Figura 2. Formación de pares electrón - hueco en la red cristalina del semiconductor. Elaboración propia

Desde el punto de vista químico, el TiO_2 no se consume durante la reacción, actuando únicamente como mediador del proceso. Con base en la figura 2. A medida que los electrones son transferidos hacia las especies oxidadas, los huecos generados son ocupados nuevamente, manteniendo un flujo neto de carga nulo dentro del sistema catalítico (Guarín & Mera, 2011). Este principio permite explicar por qué el material conserva su estructura y propiedades tras múltiples ciclos de reacción, lo que lo convierte en un componente reutilizable dentro de los sistemas de tratamiento fotocatalítico.

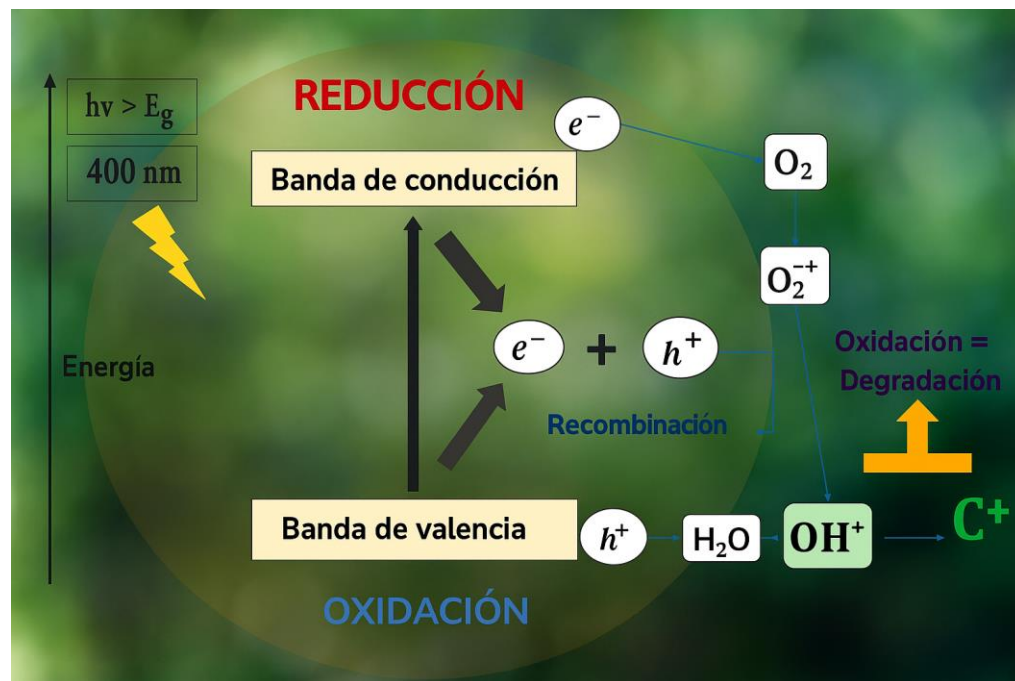


Figura 3. Proceso fotocatalítico en presencia de semiconductores. Adaptado de Izquierdo, 2016

Las reacciones que ocurren durante la fotocatalisis heterogénea se pueden resumir en una serie de etapas fundamentales. Dando cuenta con la figura 3, en primer lugar, la radiación ultravioleta promueve la formación de los pares electrón-hueco en el semiconductor (Ecuación 1). Posteriormente, los huecos oxidan moléculas de agua o iones hidroxilo, generando radicales hidroxilos altamente reactivos (Ecuación 2). Al mismo tiempo, los electrones reaccionan con el oxígeno, originando radicales superóxidos (Ecuación 3), los cuales, al interactuar con el agua, producen nuevamente radicales hidroxilos (Ecuación 4), responsables finales de la oxidación de los contaminantes orgánicos (Izquierdo, 2016).

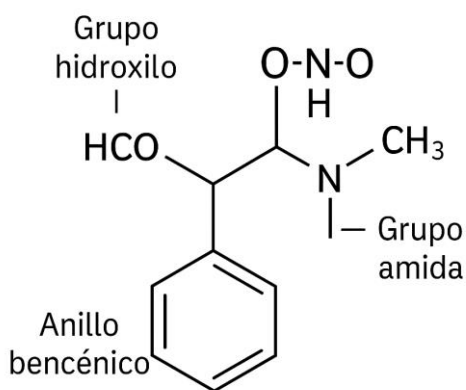
Ecuación	Descripción	Reacción
1	Formación de pares electrón-hueco	$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow e^-(\text{BC}) + h^+(\text{BV})$
2	Generación de radicales hidroxilos a partir del hueco	$\text{H}_2\text{O} + h^+(\text{BV}) \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}^+$
3	Formación del radical superóxido a partir del electrón	$e^-(\text{BC}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^{\cdot-}$
4	Producción secundaria de radicales hidroxilos	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2^{\cdot-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^- + \text{O}_2$

Tabla 1. Reacciones fotocatalíticas. Adaptado de Izquierdo (2016).

La comprensión de este mecanismo, como se observa en la *tabla 1*, contribuye al fortalecimiento del pensamiento científico en los estudiantes, al relacionar la estructura electrónica de los materiales con su comportamiento catalítico. Además, permite contextualizar la enseñanza de la química dentro de los desafíos ambientales contemporáneos, vinculando los conceptos de energía, reactividad y sostenibilidad en un mismo escenario experimental.

Sobre el contaminante modelo: acetaminofén (paracetamol)

El acetaminofén, conocido también como paracetamol, es un compuesto orgánico como se observa en la *figura 4*, que posee propiedades analgésicas y antipiréticas ampliamente utilizadas a nivel mundial. Su nombre sistemático es N-(4-hidroxifenil) acetamida y su fórmula molecular es $C_8H_9NO_2$. Desde un punto de vista estructural, pertenece a la familia de las amidas aromáticas derivadas del p-aminofenol, lo cual le confiere características particulares de polaridad, solubilidad y persistencia ambiental (Ayoub et al., 2021).



Acetaminofén

Figura 4. Estructura molecular del acetaminofén (paracetamol). Elaboración propia con base en Ayoub. (2021).

El acetaminofén es considerado uno de los fármacos esenciales por la Organización Mundial de la Salud (OMS) debido a su eficacia terapéutica, bajo costo y disponibilidad sin prescripción médica (OMS, 2023). Sin embargo, su uso indiscriminado, junto con una eliminación incompleta en los organismos humanos y la carencia de tratamientos especializados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, ha provocado su presencia recurrente en cuerpos de agua naturales y sistemas de saneamiento urbano (Vo et al., 2019; Peralta-Hernández et al., 2023).

Esta situación ha llevado a clasificarlo como un contaminante emergente de preocupación global.

En la *Tabla 2*, se puede observar la detección del acetaminofén en aguas residuales, superficiales y subterráneas se ha documentado extensamente en distintas regiones del mundo. En estudios internacionales, se han reportado concentraciones desde pocos nanogramos por litro (ng/L) hasta cientos de microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$), con frecuencias de detección superiores al 80 % en influentes de plantas de tratamiento (Vo et al., 2019). En América Latina, investigaciones realizadas en Colombia, Ecuador y México han confirmado la presencia de este compuesto en ríos urbanos y efluentes de estaciones depuradoras, con concentraciones que varían entre 0.1 y 12 $\mu\text{g/L}$ (Botero-Coy et al., 2018; Cipriani-Ávila et al., 2023).

Fuente de agua	Rango de concentración ($\mu\text{g/L}$)
Aguas residuales urbanas	0.3 – 300
Aguas superficiales	0.04 – 71
Aguas costeras	0.61 – 3.5
Colombia (Bogotá, Medellín)	0.1 – 12

Tabla 2. Concentraciones reportadas de acetaminofén en diferentes fuentes de agua. Adaptado de Peralta-Hernández. (2023) y Botero-Coy. (2018).

A pesar de su alta incidencia en fuentes hídricas, las regulaciones internacionales aún no han establecido límites máximos permisibles específicos para el acetaminofén. Ni la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), ni la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, ni las guías de la OMS incluyen concentraciones normativas para este fármaco (OECD, 2024; EPA, 2023; European Commission, 2025). En América Latina, y particularmente en Colombia como se observa en la *tabla 3*, la regulación vigente se basa en los parámetros generales de vertimientos establecidos por la Resolución 631 de 2015 y la Resolución 699 de 2021, las cuales controlan la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y fenoles, sin considerar aún contaminantes farmacéuticos emergentes (MADS, 2015; MADS, 2021).

País o Región	Normativa aplicable	Observaciones
Estados Unidos	EPA – NPDWR	No regula el acetaminofén
Unión Europea	Directiva Marco del Agua	No hay estándar específico
Colombia	Resoluciones 631/2015 y 699/2021	Control general de DBO ₅ , DQO y fenoles
OMS	Guías de calidad del agua (2022)	No incluye paracetamol en su lista principal

Tabla 3. Normatividad internacional y nacional relacionada con contaminantes farmacéuticos. Elaboración propia con base en EPA (2023), European Commission (2025) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS, 2015; 2021).

La selección del acetaminofén como contaminante modelo en este estudio se sustenta en su alta frecuencia de detección, su persistencia en medios acuáticos y su capacidad de representar a una amplia gama de compuestos fenólicos. Además, su estructura química y sus propiedades fotoactivas permiten evaluar de manera precisa la eficiencia de procesos avanzados de oxidación, particularmente la fotocatalisis heterogénea asistida por TiO₂/UV. Estos elementos lo convierten en un compuesto idóneo para la evaluación experimental de técnicas de remoción sostenibles y ambientalmente compatibles (Brillas et al., 2023; OECD, 2024).

La presencia excesiva de acetaminofén en cuerpos de agua representa un riesgo significativo para los organismos vivos, tanto acuáticos como terrestres. En peces, diversas investigaciones han evidenciado que la exposición crónica a este fármaco genera alteraciones morfológicas y funcionales en órganos vitales, incluyendo edema branquial, fusión lamelar, necrosis hepática y daño renal, lo cual reduce su capacidad respiratoria y de nado crítico, comprometiendo su supervivencia y equilibrio ecológico (de Souza et al., 2019). En seres humanos, si bien el acetaminofén es considerado seguro a dosis terapéuticas, su acumulación o sobredosis puede desencadenar necrosis hepática masiva, insuficiencia renal aguda y alteraciones mitocondriales, debido a la depleción del glutatión hepático y la formación del metabolito tóxico N-acetil-p-benzoquinone imina (NAPQI), generando daños sistémicos graves que pueden culminar en falla hepática fulminante (Lee, 2017). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de prevenir la liberación de fármacos al ambiente acuático y de implementar tecnologías de remediación como la fotocatalisis heterogénea, que permitan minimizar su persistencia y toxicidad tanto en los ecosistemas como en la salud humana.

MARCO METODOLÓGICO

El presente marco metodológico describe el diseño, enfoque, procedimientos e instrumentos utilizados para evaluar el fortalecimiento de las competencias analíticas en estudiantes de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, en el marco de una experiencia formativa orientada a la comprensión y aplicación de la fotocatalisis heterogénea para la remoción de acetaminofén en aguas residuales sintéticas.

Este enfoque metodológico se articula directamente con los antecedentes, la justificación y los objetivos de investigación planteados, y se sustenta en el aprendizaje experiencial (Kolb) y en la evaluación crítica (Torres Salcedo), los cuales orientan el desarrollo de habilidades analíticas, experimentales y reflexivas en contextos de problemática ambiental real.

Metodología de Investigación.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos en coherencia con la naturaleza de los objetivos propuestos. Este enfoque permitió obtener una visión integral del proceso formativo, tanto en la dimensión analítica–cognitiva de los estudiantes como en los resultados experimentales de la remoción del contaminante.

Componente cualitativo: permitió analizar las experiencias, percepciones, argumentaciones y desempeños de los estudiantes, a partir de instrumentos como rúbricas, listas de verificación, y análisis de desempeño en actividades experimentales.

Componente cuantitativo: permitió calcular el porcentaje de remoción del acetaminofén mediante técnicas instrumentales (UV-Vis), registrando datos numéricos válidos y confiables que complementan la experiencia formativa.

Asimismo, se adoptó un diseño exploratorio descriptivo, acorde con Hernández Sampieri et al. (2018), apropiado para fenómenos poco estudiados, como la integración entre competencias analíticas y procesos fotocatalíticos en contextos formativos universitarios. Este diseño permitió:

- Explorar los niveles iniciales de competencia en la población estudiantil.
- Describir el impacto de la estrategia experiencial en el fortalecimiento de competencias analíticas.
- Relacionar estos avances con los resultados experimentales.

A continuación, en la *figura 5*, se detalla la estrategia didáctica:

Reforzando las Competencias Analíticas

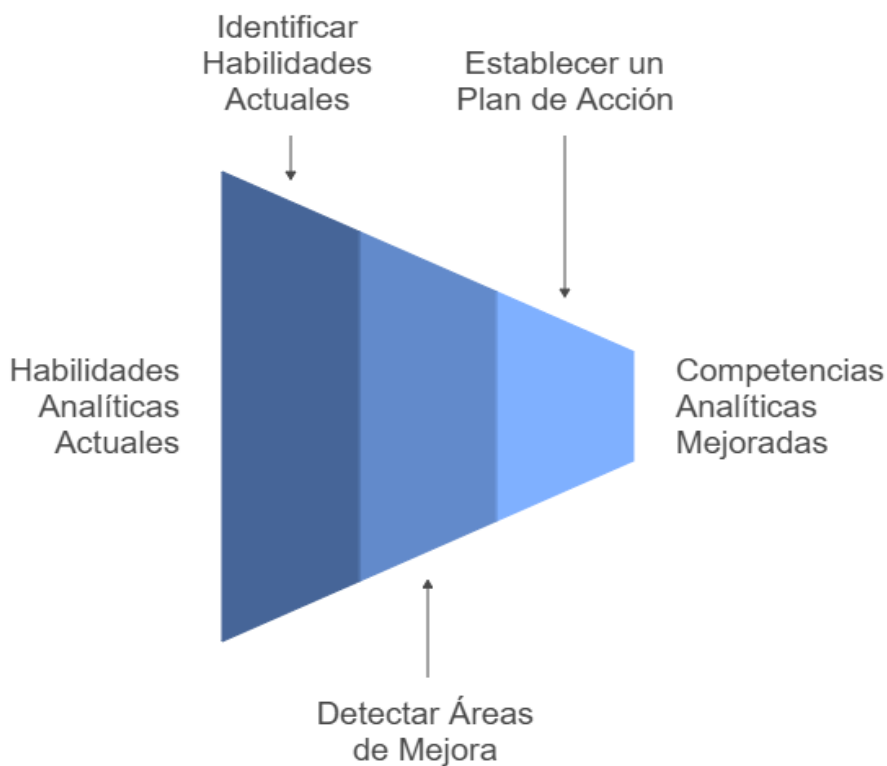


Figura 5. Diagrama fases de investigación. Elaboración propia mediante la herramienta Napkin.

ETAPAS DE LA METODOLOGÍA

Fase 1: Caracterización de las Competencias Analíticas Aplicando los Modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo en la Remoción de Contaminantes Analgésicos mediante Fotocatálisis Heterogénea

Esta fase 1, se diseñó para implementarse en una sesión presencial, integrando el modelo de aprendizaje experiencial de David Kolb y los enfoques de análisis crítico de Javier Torres Salcedo. Cada sesión busca guiar a los estudiantes a través de actividades prácticas, reflexivas y analíticas que permitan identificar y desarrollar competencias analíticas en el contexto de la remoción de acetaminofén en aguas residuales sintéticas mediante fotocatalisis heterogénea.

Sesión	Objetivo Específico	Actividades Principales	Instrumento de Evaluación
Sesión 1: Introducción y diseño experimental	Identificar las variables clave y formular un diseño experimental para la remoción de analgésicos mediante fotocatalisis heterogénea.	1. Introducción teórica sobre fotocatalisis heterogénea y modelos de competencias analíticas. 2. Formación de grupos para la formulación de preguntas de investigación. 3. Elaboración del diseño experimental, considerando parámetros como concentración inicial y tipo de catalizador.	Rúbrica de Diseño Experimental: - Identificación de variables clave (, concentración, luz). - Coherencia entre hipótesis y objetivos. - Organización y claridad en el diseño.

Tabla 4. Fase 1 Diagnóstico competencias analíticas. Elaboración propia.

Instrumento para Evaluar Competencias Analíticas

El instrumento combina rúbricas y listas de verificación para evaluar las competencias analíticas en las tres sesiones. Incluye criterios relacionados con la identificación de variables, diseño experimental, análisis crítico y comunicación científica.

Criterio	Indicadores	Escala de Evaluación
Identificación de variables	Reconoce y describe variables clave (concentración inicial, catalizador).	1 = No identificado, 2 = Parcialmente identificado, 3 = Totalmente identificado.
Coherencia del diseño experimental	Diseña experimentos claros y bien estructurados, alineados con los objetivos e hipótesis.	1 = Incoherente, 2 = Parcialmente coherente, 3 = Totalmente coherente.
Recolección de datos	Registra datos de manera sistemática y rigurosa,	1 = Incompleta, 2 = Parcialmente completa, 3 = Completa y rigurosa.

	asegurando la validez y confiabilidad de estos.	
Análisis e interpretación de datos	Usa herramientas estadísticas para interpretar resultados y extrae conclusiones significativas.	1 = Erróneo, 2 = Parcialmente correcto, 3 = Correcto y significativo.
Comunicación científica	Presenta resultados con claridad, argumentación sólida y relación con la literatura científica.	1 = Poco claro, 2 = Parcialmente claro, 3 = Claro y bien argumentado.

Tabla 5. Criterios de evaluación instrumento 1. Elaboración propia

Fase 2: Determinación del Porcentaje de Remoción de Analgésicos mediante Fotocatálisis Heterogénea

La metodología propuesta se basa en un enfoque experimental y analítico, diseñado para permitir a los estudiantes realizar el cálculo del porcentaje de remoción de acetaminofén en aguas residuales, aplicando fotocátalisis heterogénea. Este proceso se desarrollará en cuatro etapas: preparación, ejecución experimental, análisis de datos y elaboración de conclusiones.

Fase	Objetivo Específico	Actividades Principales	Instrumentos de Evaluación
1. Preparación	Reconocer las propiedades físicoquímicas de los analgésicos y el funcionamiento de la fotocátalisis heterogénea.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión bibliográfica sobre analgésicos y sus efectos en aguas residuales. - Preparación del laboratorio, materiales y reactivos. - Capacitación sobre el uso del TiO₂ y el espectrofotómetro UV-Vis. 	Lista de Verificación de Preparación: <ul style="list-style-type: none"> - Complejidad y relevancia de la revisión. - Adecuada preparación de materiales y reactivos. - Precisión técnica.
2. Ejecución Experimental	Aplicar el proceso de fotocátalisis heterogénea en muestras contaminadas con acetaminofén	<ul style="list-style-type: none"> - Preparar soluciones estándar de analgésicos a concentraciones conocidas. - Irradiar las muestras con luz UV en presencia de TiO₂. - Tomar muestras en intervalos de tiempo definidos. 	Rúbrica de Ejecución Experimental: <ul style="list-style-type: none"> - Correcto manejo de las variables. - Registro detallado de datos. - Cumplimiento de las condiciones experimentales.
3. Análisis de Datos	Evaluar la concentración remanente de los	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar las muestras usando espectrofotometría UV-Vis. - Calcular la concentración inicial y final de los analgésicos en las 	Rúbrica de Análisis de Datos: <ul style="list-style-type: none"> - Correcto uso de herramientas analíticas.

	analgésicos mediante técnicas analíticas.	muestras. - Determinar el porcentaje de remoción usando la fórmula: $\% \text{ remoción} = \left(\frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \right) * 100$	- Precisión en los cálculos. - Presentación de gráficos que respalden los resultados.
4. Conclusión y Discusión	Interpretar los resultados obtenidos y relacionarlos con la eficiencia del método.	- Comparar los resultados experimentales con valores reportados en la literatura. - Reflexionar sobre el impacto del proceso en el tratamiento de aguas residuales. - Elaborar un informe final.	Rúbrica de Presentación de Resultados: - Claridad en la discusión de resultados. - Relación con antecedentes científicos. - Coherencia y argumentación en el informe.

Tabla 6. Fase 2. Puesta en marcha degradación de analgésicos por medio de la fotocatalisis heterogénea. Elaboración propia.

Parámetros de Evaluación

Criterio	Indicadores	Escala de Evaluación (1-3)
Identificación de Variables	Reconoce las variables críticas del proceso (concentración inicial, luz, catalizador).	1 = Incorrecto, 2 = Parcialmente correcto, 3 = Totalmente correcto.
Ejecución Experimental	Aplica correctamente el procedimiento de fotocatalisis.	1 = Incorrecto, 2 = Parcialmente correcto, 3 = Totalmente correcto.
Análisis de Datos	Realiza cálculos precisos del porcentaje de remoción y presenta gráficos coherentes.	1 = Incorrecto, 2 = Parcialmente correcto, 3 = Totalmente correcto.
Interpretación y Discusión de Resultados	Relaciona los resultados con la eficiencia del método y su impacto en el tratamiento de aguas.	1 = Incorrecto, 2 = Parcialmente correcto, 3 = Totalmente correcto.

Tabla 7. Criterios de evaluación instrumento 2. Elaboración propia.

Fase 3: Evaluación del Fortalecimiento de Competencias Analíticas

Esta metodología integra los principios del aprendizaje experiencial de David Kolb y el enfoque crítico de Javier Torres Salcedo, aplicándolos al contexto de la remoción de analgésicos en aguas residuales mediante fotocatalisis

heterogénea. Se enfoca en etapas que guían a los estudiantes desde la conceptualización teórica hasta la ejecución y evaluación práctica de proyectos.

Etapas	Objetivo Específico	Actividades	Instrumentos de Evaluación
1. Contextualización	Identificar el problema ambiental de los analgésicos en aguas residuales y su impacto en la calidad del agua.	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir el problema ambiental mediante casos reales. - Revisión bibliográfica sobre fotocátalisis heterogénea y analgésicos como contaminantes emergentes. 	Lista de Verificación de Comprensión: <ul style="list-style-type: none"> - Pertinencia de las fuentes revisadas. - Comprensión del impacto ambiental de los analgésicos.
2. Diseño del Proyecto	Formular preguntas de investigación y diseñar un protocolo experimental.	<ul style="list-style-type: none"> - Formación de equipos para plantear preguntas investigativas. - Diseño del protocolo experimental considerando variables clave (concentración, tiempo, agitación, catalizador). 	Rúbrica de Diseño Experimental: <ul style="list-style-type: none"> - Coherencia entre objetivos y diseño. - Identificación de variables críticas. - Claridad del protocolo.
3. Ejecución del Proyecto	Implementar el protocolo experimental y recolectar datos sobre la remoción de analgésicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Preparación de muestras contaminadas con analgésico. - Aplicación de fotocátalisis heterogénea usando TiO_2 y espectrofotometría UV-Vis para medir resultados. - Registro sistemático de datos. 	Lista de Verificación de Laboratorio: <ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento del protocolo. - Rigurosidad en la recolección de datos. - Calidad del manejo experimental.
4. Análisis de Datos	Analizar críticamente los resultados y calcular el porcentaje de remoción de analgésicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Procesar datos recolectados mediante cálculos y herramientas estadísticas. - Interpretar resultados en relación con literatura científica y objetivos del proyecto. 	Rúbrica de Análisis de Datos: <ul style="list-style-type: none"> - Precisión en cálculos. - Interpretación coherente. - Uso adecuado de herramientas estadísticas.
5. Presentación y Reflexión	Comunicar los hallazgos del proyecto y reflexionar sobre	<ul style="list-style-type: none"> - Elaborar un informe científico que detalles objetivos, métodos, resultados y conclusiones. 	Rúbrica de Presentación Científica: <ul style="list-style-type: none"> - Claridad y coherencia

	su relevancia e impacto ambiental.	- Presentación oral con gráficos y análisis críticos. - Reflexión sobre la aplicabilidad del método.	del informe. - Argumentación fundamentada. - Reflexión sobre impactos del proyecto.
--	------------------------------------	---	---

Tabla 8. Fase 3. Construcción de proyectos basados en la remoción de analgésicos en aguas residuales por medio de la fotocatalisis heterogénea. Elaboración propia.

En síntesis, el marco metodológico aquí expuesto integra de manera coherente los fundamentos del enfoque mixto, el diseño exploratorio descriptivo y la estrategia de aprendizaje experiencial aplicada a la fotocatalisis heterogénea, permitiendo abordar simultáneamente la comprensión de un problema ambiental real y el fortalecimiento de las competencias analíticas en los estudiantes. A través de las fases de caracterización, experimentación, análisis y reflexión, se establecen los procedimientos sistemáticos para evaluar el desempeño estudiantil, validar los instrumentos diseñados y determinar la eficiencia del proceso de remoción del acetaminofén. De esta manera, este capítulo delimita las rutas metodológicas que orientan el desarrollo del estudio, garantizando la rigurosidad necesaria para analizar cómo la experiencia formativa propuesta contribuye a la consolidación de habilidades analíticas, científicas y reflexivas en futuros docentes e investigadores en química.

Finalmente, se muestra el cronograma de actividades que se van a realizar durante el desarrollo del proyecto, el cual organiza de manera secuencial las fases de construcción del fotocatalizador, la ejecución de las pruebas experimentales, la caracterización de las competencias analíticas, la obtención y sistematización de los resultados, y la elaboración de las conclusiones. Este cronograma permite garantizar la coherencia temporal del proceso metodológico y asegurar que cada etapa contribuya de forma articulada al fortalecimiento de las competencias analíticas y a la comprensión integral del fenómeno de remoción del acetaminofén en aguas residuales mediante fotocatalisis heterogénea.

Fase	Alcance
Construcción del fotocatalizador	Diseño y construcción del fotocatalizador teniendo en cuenta los parámetros de la técnica.
Pruebas de fotocatalisis heterogénea	Puesta en marcha del catalizador. Realización de la técnica con concentraciones conocidas de analgésico, variación de concentraciones de TiO ₂ , tiempo, agitación.

Fase	Alcance
Caracterización de competencias analíticas	Reconocimiento de habilidades relacionadas con las competencias analíticas en estudiantes de Licenciatura en Química.
Determinación del porcentaje de remoción de analgésicos	Cálculo del porcentaje de remoción de acuerdo con los resultados obtenidos por los maestrantes y por la población estudiada.
Obtención de resultados	Organización de resultados en tablas para el análisis y las conclusiones.
Análisis de resultados y conclusiones	Evidenciar si la estrategia fue apta o no para el fortalecimiento de competencias analíticas en los estudiantes.

Tabla 9. Cronograma de actividades 2025. Elaboración propia

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente apartado expone los resultados obtenidos a lo largo del proceso investigativo, el cual tuvo como propósito fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, mediante la implementación de la fotocatalisis heterogénea como estrategia experimental y pedagógica para la remoción de analgésicos en aguas residuales. La secuencia metodológica comprendió la construcción del fotocatalizador, las pruebas de remoción del analgésico modelo (acetaminofén), la caracterización de las competencias analíticas y la valoración de los aprendizajes logrados a través de la aplicación de los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo.

FASE 1 - APLICACIÓN DEL INSTRUMENTO DE CARACTERIZACIÓN INICIAL DE COMPETENCIAS ANALÍTICAS

Con el propósito de dar cumplimiento al primer objetivo específico, orientado a caracterizar las competencias analíticas en los estudiantes mediante los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo, se diseñó, validó y aplicó un instrumento diagnóstico estructurado que permitió identificar los niveles de comprensión, análisis e interpretación relacionados con los principios de la fotocatalisis heterogénea. Este instrumento, denominado Prueba Diagnóstica – Fotocatalisis Heterogénea (Anexo 7), fue aplicado a un grupo de 18 estudiantes de décimo semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional,

adscritos al énfasis de Tecnologías Limpias en Aguas Residuales. Su construcción se fundamentó en la articulación entre los conocimientos disciplinares y las competencias analíticas derivadas de los modelos teóricos. Desde la perspectiva del aprendizaje experiencial de Kolb, el instrumento incorporó ítems que evaluaron las fases de experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa, posibilitando valorar la manera en que los estudiantes integran teoría y práctica en contextos reales de análisis químico. Complementariamente, se incluyeron los aportes de Torres Salcedo, quien distingue los niveles literal, inferencial y crítico del pensamiento analítico; estos niveles fueron plasmados en la rúbrica de evaluación para establecer una progresión cognitiva que permitiera reconocer la capacidad de los estudiantes para identificar conceptos, derivar relaciones y argumentar procesos fisicoquímicos complejos.

Previo a su aplicación, el instrumento fue sometido a un proceso riguroso de validación mediante juicio de expertos, en el que participaron docentes con formación de maestría en educación y en docencia de la química pertenecientes a instituciones universitarias y de educación básica y media. Este proceso aseguró la pertinencia, claridad y coherencia teórica de los ítems, así como su alineación con los objetivos de investigación, garantizando la validez de contenido y la consistencia técnica del instrumento (Hernández-Sampieri et al., 2018). Una vez aprobada la versión final, se procedió a su aplicación individual y escrita al grupo participante, permitiendo recopilar información precisa sobre la comprensión conceptual, el razonamiento analítico y la capacidad de aplicar conocimientos disciplinares al análisis de procesos fotocatalíticos.

Esta fase diagnóstica constituyó un paso fundamental en el fortalecimiento del componente investigativo del estudio, ya que permitió establecer el estado inicial de las competencias analíticas en el grupo de estudiantes, definiendo un punto de partida para valorar los avances logrados a través de la estrategia formativa centrada en la fotocatalisis heterogénea y el aprendizaje experiencial. En conjunto, la validación, aplicación y análisis del instrumento garantizan la rigurosidad del proceso metodológico y permiten comprender con mayor precisión la naturaleza y el nivel de desarrollo de las competencias analíticas en los participantes, información esencial para el análisis posterior de los resultados (Kolb, 1984; Kolb & Kolb, 2017; Torres Salcedo, 2010; Hernández-Sampieri et al., 2018).

1. ¿Qué es la fotocatalisis heterogénea?

16/18 respuestas correctas

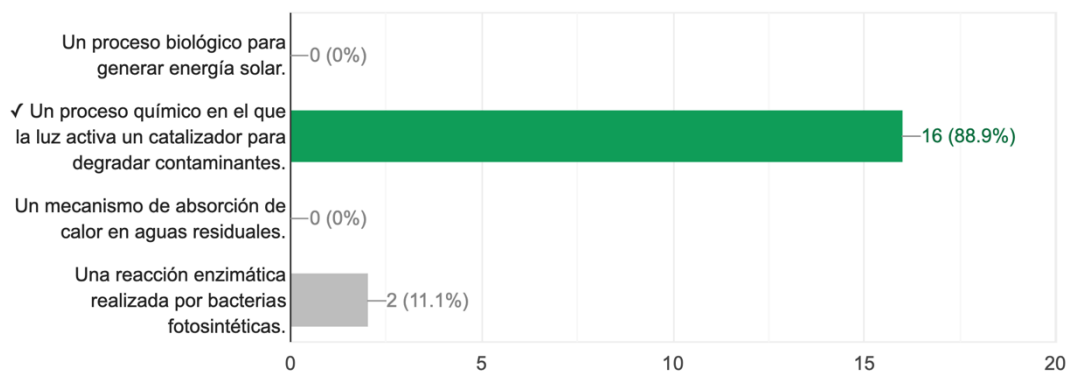


Imagen 1. Porcentaje de aciertos pregunta 1

De acuerdo con los resultados obtenidos en la *imagen 1*, 16 de los 18 participantes (88.9 %) seleccionaron la respuesta correcta, identificando la fotocatalisis heterogénea como “un proceso químico en el que la luz activa un catalizador para degradar contaminantes”. En contraste, 2 estudiantes (11.1 %) eligieron la opción incorrecta, vinculándola con una “reacción enzimática realizada por bacterias fotosintéticas”. Este resultado refleja un amplio dominio conceptual básico en la mayoría del grupo, aunque persiste un reducido porcentaje con confusión entre procesos fotoquímicos y biológicos, lo cual evidencia la necesidad de reforzar la diferenciación entre mecanismos fisicoquímicos de oxidación y rutas metabólicas microbianas (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Según el modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), esta pregunta corresponde a la fase de concreción experiencial, en la que el estudiante moviliza su conocimiento previo y su experiencia sensorial para comprender los fenómenos observables. En este caso, el elevado porcentaje de respuestas correctas indica que los estudiantes lograron una comprensión inicial sólida del fenómeno químico que subyace a la fotocatalisis, identificando con precisión la interacción entre la energía lumínica y el catalizador (TiO_2) como elemento esencial del proceso. Dicho desempeño representa un avance significativo en la internalización de los fundamentos teóricos del aprendizaje químico desde la experiencia, lo cual coincide con la idea de Kolb y Kolb (2017), quienes destacan que la comprensión conceptual emerge de la combinación entre la percepción y la reflexión sobre la práctica experimental.

Desde la perspectiva del modelo cognitivo de Torres Salcedo (2010), este ítem se ubica en el nivel literal de comprensión, dado que exige reconocer y recordar información específica sin requerir inferencia o evaluación crítica. El hecho de que más del 85 % de los estudiantes respondieran correctamente permite clasificar el desempeño en la categoría de nivel avanzado, conforme a la rúbrica de evaluación que establece que entre 9 y 10 respuestas correctas en la prueba evidencian dominio conceptual y capacidad de análisis transferible. En este caso, los estudiantes demostraron no solo la memorización del concepto, sino también una comprensión operativa del principio químico aplicado, lo que sugiere un proceso de apropiación conceptual coherente con las expectativas del nivel superior (Torres Salcedo, 2010).

El 11.1 % restante, que asoció la fotocatalisis con procesos biológicos, representa un grupo en el nivel en desarrollo, pues manifiesta comprensión parcial del fenómeno y requiere fortalecer su razonamiento analógico. Esta dificultad podría explicarse, según Kolb (1984), por una experiencia concreta insuficientemente reflexionada, es decir, una exposición teórica no consolidada mediante la práctica o la observación experimental. En concordancia con esto, Kolb y Kolb (2017) señalan que los aprendizajes científicos se consolidan cuando los estudiantes logran integrar la vivencia experimental con el razonamiento conceptual, estableciendo relaciones causa–efecto que trascienden la simple memorización. Por ello, se recomienda que en las fases subsiguientes —especialmente durante la construcción y prueba del fotocatalizador— se promuevan actividades de observación guiada y análisis reflexivo para afianzar la conceptualización abstracta del proceso.

2. ¿Qué compuesto se utiliza comúnmente como catalizador en la fotocatalisis?

18/18 respuestas correctas

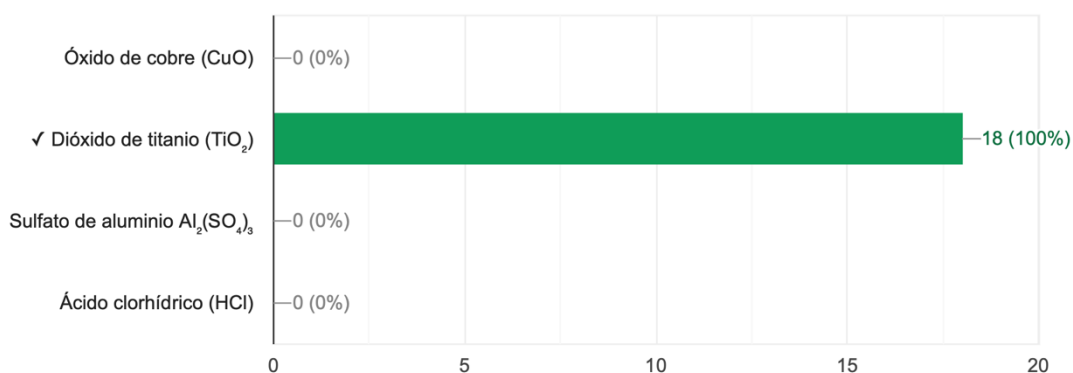


Imagen 2. Porcentaje de aciertos pregunta 2

Como se observa en la *imagen 2*, la pregunta diagnóstica tuvo como propósito evaluar la identificación de componentes esenciales dentro del proceso de fotocatalisis heterogénea, específicamente la comprensión del catalizador empleado en la reacción fotoquímica. Los resultados obtenidos muestran que la totalidad del grupo encuestado (18 de 18 estudiantes; 100 %) respondió correctamente al identificar el dióxido de titanio (TiO_2) como el compuesto catalizador más utilizado en los procesos de fotocatalisis. Este desempeño evidencia un dominio conceptual unánime en los fundamentos de la técnica, lo que confirma que los participantes reconocen al TiO_2 como un material semiconductor clave para la activación fotoquímica, aspecto fundamental en los procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de aguas residuales (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem se asocia igualmente con la fase de concreción experiencial, que implica la activación del conocimiento previo adquirido mediante la observación, la práctica o la experiencia educativa. El logro del 100 % de respuestas correctas sugiere que los estudiantes han interiorizado el conocimiento declarativo sobre los materiales comúnmente empleados como fotocatalizadores, evidenciando la integración de experiencias previas de laboratorio o de cursos teóricos en los cuales se abordaron procesos de catálisis. Este resultado refleja que el grupo ha alcanzado una asimilación efectiva de los conceptos esenciales, lo que coincide con lo planteado por Kolb y Kolb (2017), quienes destacan que el aprendizaje significativo se consolida cuando los estudiantes logran establecer conexiones entre la teoría y la experiencia concreta, transformando el conocimiento en comprensión funcional.

En relación con el modelo cognitivo de Torres Salcedo (2010), esta pregunta corresponde al nivel literal de comprensión, ya que evalúa la capacidad de los estudiantes para reconocer un dato específico dentro de un contexto disciplinar. El desempeño del 100 % de aciertos ubica al grupo en la categoría de competencia avanzada, según la rúbrica establecida en el instrumento, la cual define este nivel como la demostración de dominio conceptual y transferencia potencial del conocimiento a nuevas situaciones. En este caso, el reconocimiento del TiO_2 como catalizador principal sugiere que los estudiantes no solo recuerdan el concepto, sino que lo asocian adecuadamente con su función dentro de la reacción fotocatalítica.

Este nivel de desempeño indica que los estudiantes presentan una comprensión consolidada de la base material y funcional de la técnica, elemento que facilitará el tránsito hacia las fases de reflexión abstracta y experimentación activa del modelo

de Kolb (1984). Dicho de otro modo, el dominio literal del concepto les permitirá, en etapas posteriores, aplicar este conocimiento al análisis de variables experimentales (como concentración del catalizador, pH y tipo de radiación) y a la evaluación crítica de los resultados de remoción del contaminante modelo. Así, los hallazgos obtenidos en este ítem confirman que el grupo posee una base conceptual robusta para abordar los procesos de aplicación e interpretación analítica requeridos en las siguientes fases del proyecto.

3. ¿Qué tipo de luz es más efectiva para activar el TiO_2 ?

18/18 respuestas correctas

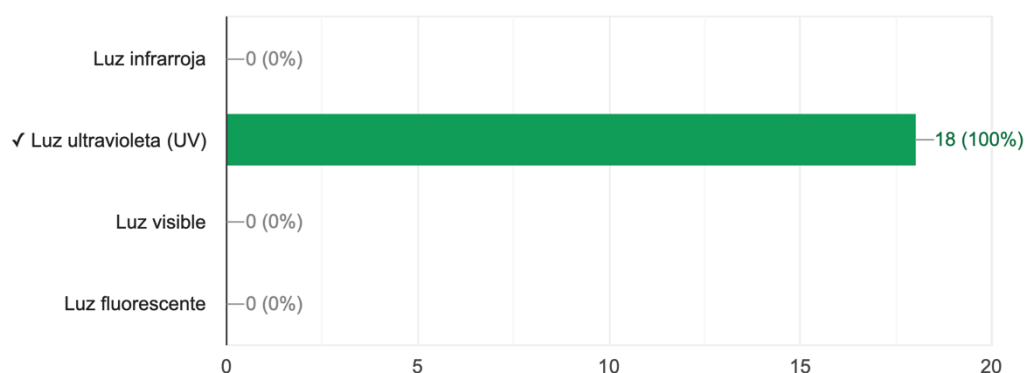


Imagen 3. Porcentaje de aciertos pregunta 3

En la *imagen 3* se evaluó la comprensión teórico-funcional del fenómeno de activación del dióxido de titanio (TiO_2) como catalizador en los procesos de fotocatalisis heterogénea, específicamente en relación con el tipo de radiación electromagnética requerida para inducir la excitación de electrones y generar radicales oxidantes. Los resultados obtenidos muestran un desempeño perfecto: los 18 estudiantes encuestados (100 %) seleccionaron correctamente la opción “Luz ultravioleta (UV)”, lo que evidencia una comprensión colectiva sólida del principio fisicoquímico que rige la activación del TiO_2 y de su relación directa con la energía del fotón necesaria para superar la banda prohibida del semiconductor (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem se sitúa dentro de la fase de concreción experiencial, pues requiere que los estudiantes reconozcan los fundamentos conceptuales que sustentan un proceso observable. El hecho de que el 100 % de los participantes haya identificado correctamente la luz ultravioleta como fuente de activación más efectiva demuestra que el grupo posee un dominio conceptual previo adecuado y una comprensión

funcional del proceso fotoquímico. De acuerdo con Kolb y Kolb (2017), esta capacidad para asociar conceptos teóricos con mecanismos de acción refleja la consolidación de aprendizajes que surgen de experiencias pasadas, ya sea en prácticas de laboratorio o en cursos disciplinares sobre reacciones de oxidación-reducción y catálisis. Por tanto, este resultado indica que el grupo se encuentra preparado para avanzar hacia niveles de aprendizaje más complejos, en los cuales se analicen las variables que condicionan la eficiencia del proceso fotocatalítico.

En el marco del modelo cognitivo propuesto por Torres Salcedo (2010), la pregunta corresponde igualmente al nivel literal de comprensión, ya que evalúa la identificación directa de una variable fundamental del proceso, sin requerir inferencia o razonamiento causal. Sin embargo, el logro total del grupo permite ubicar el desempeño en la categoría de competencia avanzada, según la rúbrica del instrumento, pues se evidencia un dominio conceptual preciso y homogéneo. Esta uniformidad en las respuestas sugiere que los estudiantes son capaces de recordar, reconocer y aplicar de manera inmediata información esencial sobre la naturaleza energética de la radiación UV y su relación con la activación del TiO_2 , aspecto clave en la formulación de hipótesis experimentales en fases posteriores.

Desde un punto de vista pedagógico, este resultado demuestra la efectividad de los procesos formativos previos en el área de química física y ambiental, los cuales han favorecido la adquisición de conocimientos teóricos consistentes sobre la interacción entre la luz y los materiales semiconductores. No obstante, tal como advierten Kolb y Kolb (2017), el dominio conceptual no garantiza automáticamente la transferencia de dicho conocimiento a contextos prácticos; por ello, la siguiente fase del proyecto debe centrarse en promover la reflexión abstracta y la experimentación activa, permitiendo que los estudiantes observen empíricamente el comportamiento del catalizador bajo diferentes longitudes de onda, intensidades lumínicas y condiciones experimentales.

4. ¿Cuál es una de las principales aplicaciones de la fotocatalisis en el tratamiento de aguas?

17/18 respuestas correctas

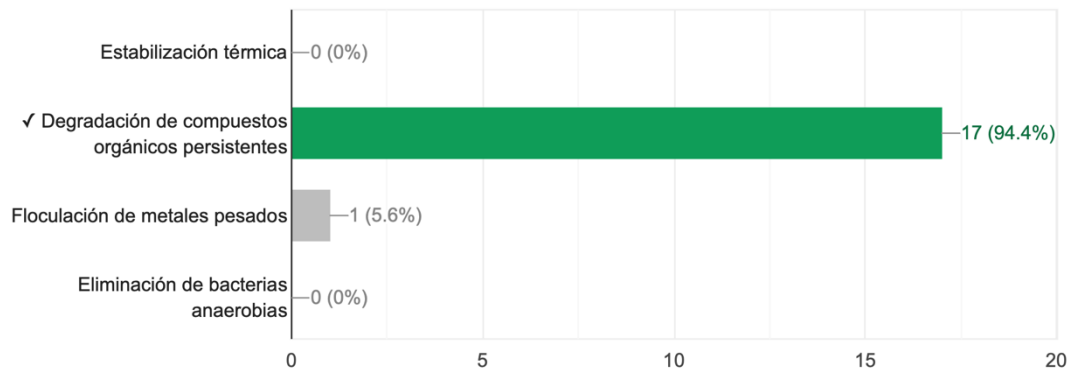


Imagen 4. Porcentaje de aciertos pregunta 4

La *imagen 4* evaluó la capacidad de los estudiantes para aplicar el conocimiento conceptual en contextos reales, específicamente en la identificación de los usos ambientales de la fotocatalisis heterogénea en procesos de tratamiento de aguas residuales. Los resultados evidencian que 17 de los 18 participantes (94.4%) respondieron correctamente al señalar la “degradación de compuestos orgánicos persistentes” como una de las principales aplicaciones de la técnica, mientras que 1 estudiante (5.6%) optó por la alternativa incorrecta “floculación de metales pesados”. Este desempeño demuestra un alto nivel de comprensión aplicada del fenómeno fotocatalítico, en tanto la mayoría logró reconocer la relación entre la activación del catalizador y la eliminación de contaminantes orgánicos de difícil biodegradación, lo que constituye una de las líneas de investigación más consolidadas en el ámbito de la química ambiental (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

De acuerdo con el modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem se enmarca en la fase de experimentación activa, la cual se caracteriza por la aplicación del conocimiento en situaciones concretas y la vinculación de la teoría con la práctica. El elevado porcentaje de aciertos indica que los estudiantes han logrado trasladar el conocimiento conceptual hacia escenarios de resolución de problemas reales, identificando correctamente la función de la fotocatalisis heterogénea en la remediación ambiental. En términos pedagógicos, este resultado evidencia que el grupo ha desarrollado la habilidad de interpretar la utilidad del proceso químico más allá del nivel teórico, demostrando un aprendizaje experiencial orientado a la acción, tal como lo plantean Kolb y Kolb (2017), quienes enfatizan la importancia de la aplicación práctica para consolidar la comprensión significativa de los fenómenos científicos.

Por otra parte, según la taxonomía cognitiva propuesta por Torres Salcedo (2010), esta pregunta corresponde al nivel inferencial de comprensión, dado que requiere que el estudiante relacione un concepto teórico (fotocatálisis) con su aplicación práctica (tratamiento de contaminantes orgánicos). Los resultados obtenidos sitúan al grupo en un nivel de competencia analítica avanzada, ya que los participantes demostraron la capacidad de inferir correctamente la función del proceso fotocatalítico en la eliminación de sustancias persistentes, lo cual implica un razonamiento lógico y una comprensión funcional del fenómeno. Este nivel de desempeño revela que los estudiantes no solo reconocen los principios de la fotocatalisis, sino que además son capaces de proyectar su aplicación en el ámbito ambiental, integrando conocimiento químico, ecológico y tecnológico.

El 5.6 % de respuestas incorrectas representa un grupo minoritario que asocia el proceso fotocatalítico con mecanismos fisicoquímicos de coagulación o floculación. Esta confusión sugiere una comprensión parcial del fenómeno, posiblemente derivada de la proximidad conceptual entre los diferentes métodos de tratamiento de aguas, lo que pone de manifiesto la necesidad de reforzar la diferenciación entre procesos de oxidación avanzada y procesos convencionales de remoción de contaminantes. En coherencia con lo señalado por Kolb (1984), este tipo de errores puede abordarse mediante estrategias de retroalimentación reflexiva, que permitan al estudiante reinterpretar sus concepciones previas a partir de la observación directa y la experimentación práctica.

En síntesis, el desempeño en este ítem permite concluir que los estudiantes se encuentran en un nivel de competencia analítica avanzada, correspondiente a la fase de experimentación activa (Kolb, 1984) y al nivel inferencial (Torres Salcedo, 2010). Este resultado evidencia la capacidad del grupo para aplicar conocimientos disciplinares en contextos reales, lo que representa un indicador de progreso significativo en la formación de competencias analíticas. Además, confirma que los procesos de enseñanza han favorecido la articulación entre la teoría y la práctica, aspecto esencial para el fortalecimiento del pensamiento científico en el contexto de la enseñanza de la química.

5. ¿Cómo se genera la actividad fotocatalítica en el TiO₂?

18/18 respuestas correctas

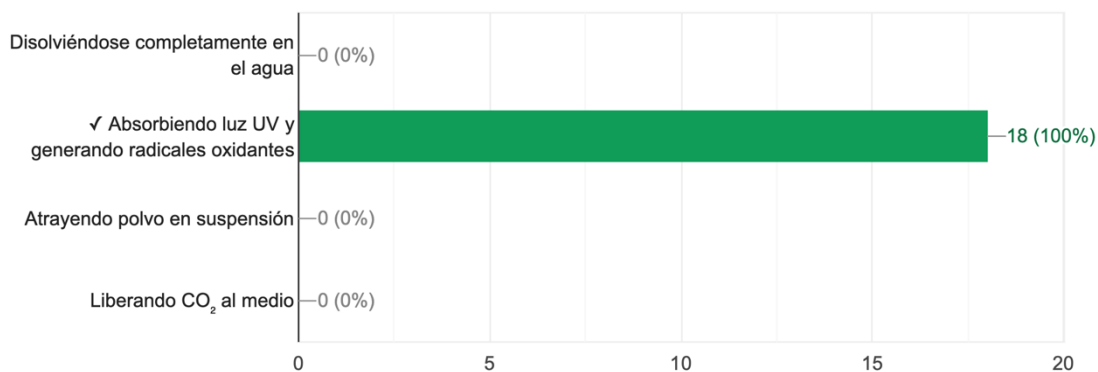


Imagen 5. Porcentaje de aciertos pregunta 5

El instrumento diagnóstico que se observa en la *imagen 5* tuvo como objetivo valorar la comprensión del mecanismo fisicoquímico mediante el cual el dióxido de titanio (TiO₂) desarrolla su actividad fotocatalítica, un aspecto esencial para la comprensión integral de los procesos de fotocatalisis heterogénea. Los resultados muestran que la totalidad del grupo (18 de 18 estudiantes, 100 %) seleccionó correctamente la opción “Absorbiendo luz UV y generando radicales oxidantes”. Este resultado evidencia un dominio conceptual pleno respecto a la forma en que se inicia el proceso fotocatalítico, lo que indica que los estudiantes comprenden el principio de excitación electrónica que genera pares electrón-hueco (e⁻/h⁺) responsables de la formación de radicales reactivos, tales como el hidroxilo (•OH) y el superóxido (O₂•⁻), que son los agentes principales en la degradación de contaminantes orgánicos (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem se ubica en la fase de experimentación activa, la cual involucra la aplicación y consolidación del conocimiento a partir de la comprensión funcional de los fenómenos observables. El desempeño del 100 % de respuestas correctas indica que los estudiantes no solo dominan la definición conceptual de la fotocatalisis, sino que además comprenden los procesos energéticos y reactivos que la sustentan, demostrando una asimilación cognitiva que combina teoría y aplicación. Este resultado refleja la efectividad de la enseñanza basada en la experiencia, ya que los estudiantes logran reconstruir el conocimiento a partir de la relación entre la energía luminosa y la respuesta del semiconductor, cumpliendo con el principio de

aprendizaje transformativo propuesto por Kolb y Kolb (2017), donde la experiencia práctica y la reflexión se integran para generar comprensión profunda.

De acuerdo con el modelo de niveles cognitivos de Torres Salcedo (2010), esta pregunta se enmarca en el nivel inferencial de comprensión, pues requiere que el estudiante relacione la absorción de radiación ultravioleta con la generación de especies reactivas de oxígeno en el catalizador. El hecho de que el 100 % del grupo haya identificado correctamente este mecanismo sitúa su desempeño en la categoría de competencia avanzada, según la rúbrica de la prueba diagnóstica. Esto implica que los estudiantes son capaces de inferir relaciones causa–efecto dentro de un proceso químico complejo, estableciendo la conexión entre la energía incidente y la respuesta del material catalítico. En el contexto del aprendizaje de la química, este nivel de competencia refleja una sólida capacidad de razonamiento analítico y científico, dado que los participantes logran integrar conceptos de estructura electrónica, cinética y reactividad química dentro de una explicación coherente del fenómeno (Torres Salcedo, 2010).

El desempeño perfecto obtenido en este ítem sugiere que el grupo de estudiantes se encuentra preparado para transitar hacia fases cognitivas más elevadas, tales como la reflexión abstracta y la conceptualización activa, en las cuales será posible analizar la influencia de variables experimentales (pH, concentración de catalizador, intensidad de luz) sobre la eficiencia de degradación. Este resultado también confirma que los procesos de formación han promovido una comprensión integral del papel del TiO_2 en la fotocatalisis, lo cual servirá como base para el fortalecimiento de las competencias analíticas a través de la observación, el registro y la interpretación crítica de los resultados experimentales obtenidos en las siguientes etapas de la investigación.

6. ¿Por qué se prefiere el TiO_2 en procesos fotocatalíticos?

18/18 respuestas correctas

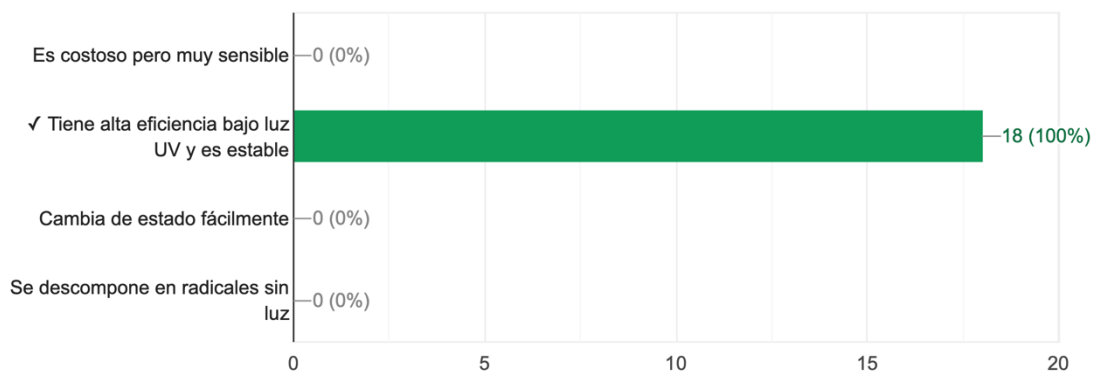


Imagen 6. Porcentaje de aciertos pregunta 6

La *imagen 6* buscó evaluar la capacidad de razonamiento analítico de los estudiantes en torno a las propiedades fisicoquímicas del dióxido de titanio (TiO_2) que lo convierten en uno de los catalizadores más utilizados en procesos de fotocatalisis heterogénea. Los resultados obtenidos revelan un desempeño excelente: los 18 participantes (100 %) seleccionaron la opción correcta “Tiene alta eficiencia bajo luz UV y es estable”. Este resultado refleja un dominio conceptual y analítico avanzado, ya que los estudiantes no solo reconocen la función del catalizador, sino que comprenden las razones estructurales y energéticas que explican su preferencia sobre otros semiconductores, como el óxido de zinc (ZnO) o el óxido de cobre (CuO), en aplicaciones de tratamiento de aguas (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem se asocia con la fase de reflexión abstracta, etapa en la cual el estudiante analiza, sintetiza e interpreta relaciones de causa y efecto a partir de conocimientos previos. El resultado obtenido demuestra que los participantes lograron integrar la comprensión conceptual con el razonamiento teórico, al identificar que la elección del TiO_2 responde a su estabilidad química, baja toxicidad, abundancia, bajo costo y elevada eficiencia cuántica bajo radiación ultravioleta. Tal como señalan Kolb y Kolb (2017), esta fase representa un avance cognitivo que permite al aprendiz abstraer principios generales a partir de experiencias concretas o información previa, lo que se evidencia en la manera en que los estudiantes explican la funcionalidad del material más allá de su simple reconocimiento.

En el marco del modelo cognitivo de Torres Salcedo (2010), esta pregunta corresponde al nivel inferencial de comprensión, ya que implica deducir la causa de un fenómeno a partir del análisis de las propiedades químicas del catalizador. El hecho de que el 100 % del grupo haya respondido correctamente ubica a los estudiantes en la categoría de competencia analítica avanzada, dado que manifiestan la capacidad de inferir relaciones lógicas y funcionales entre la naturaleza del material y su rendimiento en procesos fotocatalíticos. Este nivel de desempeño refleja una sólida apropiación del conocimiento químico y una comprensión científica que trasciende la memorización, evidenciando una estructura cognitiva orientada al análisis y la justificación racional de los fenómenos (Torres Salcedo, 2010).

7. ¿Cuál es una limitación relevante del uso de TiO_2 en la fotocatalisis?

13/18 respuestas correctas

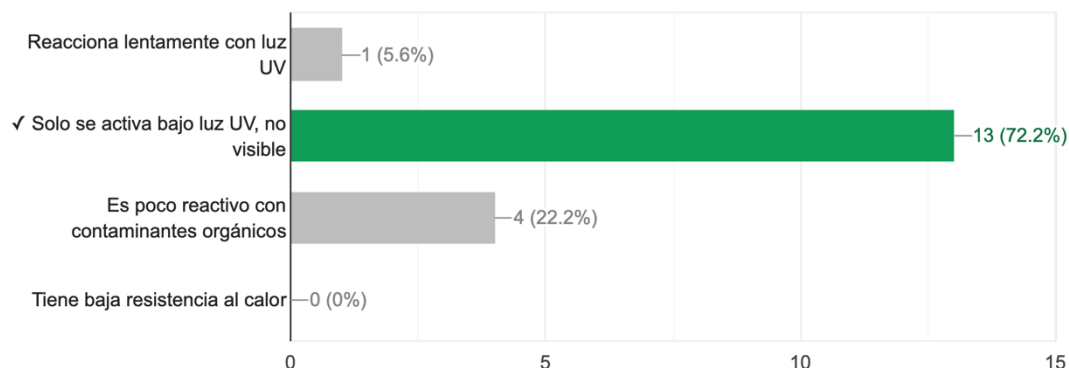


Imagen 7. Porcentaje de aciertos pregunta 7

La *imagen 7* tuvo como finalidad evaluar la capacidad de análisis crítico y comprensión aplicada de los estudiantes en torno a las limitaciones técnicas del dióxido de titanio (TiO_2) dentro de los procesos de fotocatalisis heterogénea. Los resultados evidencian que 13 de los 18 participantes (72.2%) respondieron correctamente, identificando la afirmación “Solo se activa bajo luz UV, no visible” como la principal limitación del TiO_2 . En contraste, 4 estudiantes (22.2%) consideraron incorrectamente que el catalizador es “poco reactivo con contaminantes orgánicos”, mientras que 1 estudiante (5.6%) señaló que “reacciona lentamente con luz UV”. Este comportamiento refleja que, si bien la mayoría del grupo posee una comprensión adecuada sobre el rango de activación espectral del TiO_2 , aún existen lagunas conceptuales relacionadas con la reactividad y la

eficiencia del proceso fotocatalítico, lo que ubica al grupo en un nivel de competencia analítica en desarrollo (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde el modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este ítem corresponde a la fase de reflexión abstracta, en la que el estudiante debe analizar las condiciones limitantes de un fenómeno químico a partir de su comprensión conceptual y experiencia previa. El 72.2 % de aciertos indica que una parte significativa del grupo logra abstraer la relación entre la energía fotónica incidente y la activación electrónica del semiconductor, comprendiendo que la eficiencia del TiO_2 depende directamente de su banda prohibida (3.2 eV), la cual restringe su activación a longitudes de onda menores a 400 nm (Kolb & Kolb, 2017). Sin embargo, el porcentaje restante evidencia dificultades para integrar este conocimiento con los principios de fotoquímica y de estructura electrónica, lo cual limita la interpretación profunda del fenómeno.

En el marco del modelo de niveles cognitivos propuesto por Torres Salcedo (2010), esta pregunta se ubica en el nivel inferencial de comprensión, dado que exige deducir la causa de una limitación técnica a partir del análisis del comportamiento energético del material catalítico. Los resultados sugieren que, si bien la mayoría del grupo alcanza el nivel inferencial esperado, un 27.8 % de los estudiantes permanece en un nivel literal, respondiendo desde la memorización o confusión conceptual. Este resultado es coherente con lo expuesto por Torres Salcedo (2010), quien afirma que el tránsito hacia niveles superiores de pensamiento analítico requiere no solo la adquisición de información, sino también la capacidad de establecer relaciones lógicas entre los conceptos aprendidos y su aplicación experimental.

Los resultados de este ítem evidencian la necesidad de fortalecer los espacios de reflexión teórica y análisis comparativo dentro del proceso de enseñanza, abordando temas como el dopaje del TiO_2 con metales o no metales, la ampliación de su espectro de absorción hacia la luz visible, y la optimización de la eficiencia fotocatalítica en condiciones ambientales reales. Según Kolb y Kolb (2017), estos ejercicios de reflexión guiada permiten que el estudiante trascienda la comprensión literal hacia una conceptualización más abstracta, desarrollando una visión crítica sobre los límites y posibilidades de los procesos químicos avanzados.

8. ¿Qué estrategia mejora la eficiencia del TiO₂ bajo luz visible?

8/18 respuestas correctas

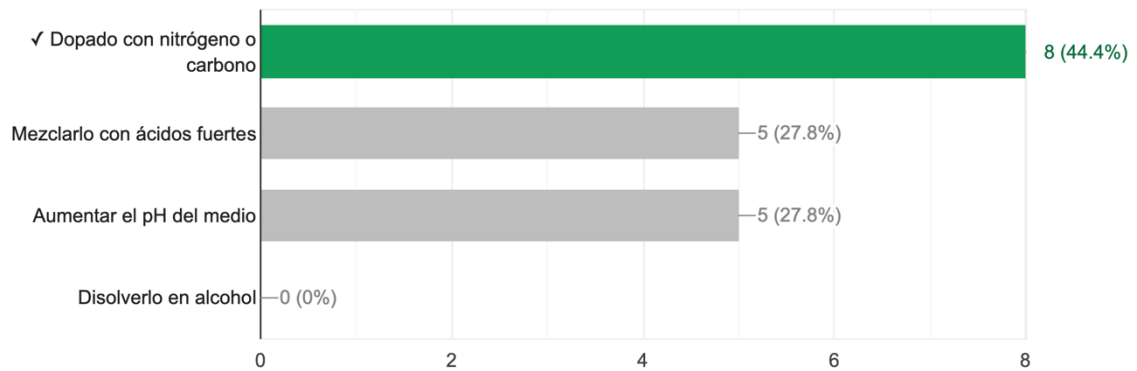


Imagen 8. Porcentaje de aciertos pregunta 8

La *imagen 8* evaluó la capacidad inferencial y crítica de los estudiantes en relación con las estrategias de modificación estructural del dióxido de titanio (TiO₂) para optimizar su eficiencia bajo luz visible. Los resultados muestran que 8 de los 18 estudiantes (44.4%) respondieron correctamente, identificando el “dopado con nitrógeno o carbono” como la estrategia adecuada para ampliar el espectro de absorción del catalizador. En contraste, 10 participantes (55.6%) seleccionaron respuestas incorrectas, distribuidas equitativamente entre “mezclarlo con ácidos fuertes” (27.8%) y “aumentar el pH del medio” (27.8%). Este comportamiento evidencia dificultades significativas en la comprensión de los mecanismos de modificación del semiconductor, lo que refleja la necesidad de fortalecer los procesos de análisis conceptual y argumentación científica sobre los principios de la fotoquímica aplicada (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde el enfoque del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), esta pregunta se ubica en la fase de conceptualización abstracta, dado que exige la integración de conocimientos teóricos avanzados sobre estructura electrónica, dopaje y propiedades ópticas de los materiales semiconductores. El hecho de que menos de la mitad del grupo haya logrado responder correctamente sugiere que los estudiantes aún no consolidan una comprensión abstracta de los mecanismos que permiten desplazar la banda prohibida del TiO₂ hacia la región visible del espectro electromagnético. Según Kolb y Kolb (2017), esta fase del aprendizaje requiere la capacidad de generar modelos mentales complejos que expliquen las interacciones entre variables fisicoquímicas, lo que implica un nivel cognitivo más elevado que la simple aplicación de conceptos.

De acuerdo con la teoría de los niveles de comprensión de Torres Salcedo (2010), este ítem corresponde al nivel crítico de análisis, puesto que demanda la evaluación y selección razonada de una estrategia experimental frente a otras alternativas. El porcentaje relativamente bajo de respuestas correctas (44.4 %) ubica al grupo en un nivel de competencia analítica intermedio, ya que, aunque una parte de los estudiantes logró identificar la opción correcta, la mayoría evidenció limitaciones en el razonamiento científico y en la capacidad de justificar sus decisiones con base en principios de la ciencia de materiales. Este resultado concuerda con lo planteado por Torres Salcedo (2010), quien sostiene que el pensamiento analítico crítico implica no solo conocer los procedimientos, sino comprender las relaciones causa–efecto y los criterios de validez de las soluciones científicas propuestas.

El desempeño observado pone de manifiesto la necesidad de implementar actividades de aprendizaje activo y reflexión teórica guiada, que permitan a los estudiantes analizar experimentalmente los efectos del dopaje con elementos no metálicos sobre la banda de energía del TiO_2 . Como plantean Kolb y Kolb (2017), la construcción de conocimiento profundo en ciencias experimentales requiere de ciclos de aprendizaje donde la experiencia empírica se complemente con la conceptualización y la experimentación reflexiva. En este sentido, los resultados de esta pregunta evidencian una oportunidad para promover el desarrollo de la competencia analítica crítica, mediante la vinculación directa de la teoría electrónica con los resultados de laboratorio sobre eficiencia fotocatalítica.

9. ¿Qué variable NO influye directamente en la eficiencia del proceso fotocatalítico?

7/18 respuestas correctas

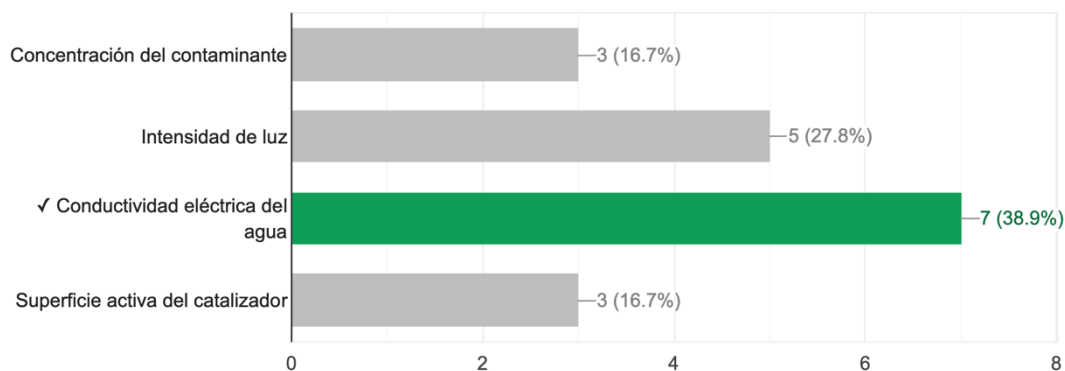


Imagen 9. Porcentaje de aciertos pregunta 9

La *imagen 9* evaluó la capacidad de razonamiento inferencial de los estudiantes frente a la identificación de los factores determinantes en la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea, diferenciando entre variables experimentales relevantes y aquellas que no presentan una influencia directa sobre el proceso. Los resultados revelan que 7 de los 18 estudiantes (38.9%) respondieron correctamente, seleccionando “la conductividad eléctrica del agua” como la variable que no afecta directamente la eficiencia del proceso fotocatalítico. Sin embargo, 11 estudiantes (61.1%) eligieron respuestas incorrectas, distribuidas entre “intensidad de luz” (27.8 %), “concentración del contaminante” (16.7 %), y “superficie activa del catalizador” (16.7 %). Este patrón de resultados indica una comprensión parcial y dispersa del fenómeno, reflejando limitaciones en la identificación de los parámetros fisicoquímicos que condicionan la reactividad del TiO_2 y la cinética del proceso (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), esta pregunta se ubica en la fase de reflexión abstracta, dado que requiere que los estudiantes analicen relaciones causa–efecto y deduzcan conclusiones a partir de su comprensión teórica sobre los factores que intervienen en una reacción fotocatalítica. El bajo porcentaje de respuestas correctas evidencia que gran parte de los participantes no logra vincular de manera coherente los principios teóricos con las variables experimentales, lo cual sugiere una dificultad en la generalización conceptual, característica de esta fase del aprendizaje. De acuerdo con Kolb y Kolb (2017), el razonamiento abstracto implica la capacidad de integrar el conocimiento teórico con la experiencia práctica para formular explicaciones racionales sobre fenómenos complejos; en este caso, la relación entre la eficiencia del proceso fotocatalítico y las propiedades ópticas, electrónicas y estructurales del catalizador.

Desde el punto de vista del modelo cognitivo propuesto por Torres Salcedo (2010), este ítem corresponde al nivel inferencial de comprensión, al exigir que los estudiantes deduzcan una respuesta a partir de la relación entre diversas variables interdependientes. El hecho de que menos del 40 % del grupo haya logrado identificar correctamente la variable no influyente sitúa al conjunto de estudiantes en un nivel de competencia analítica en desarrollo, evidenciando que la mayoría aún no ha consolidado la capacidad de discriminar entre factores relevantes y secundarios en el contexto experimental. Tal como lo plantea Torres Salcedo, la progresión del pensamiento analítico requiere que el estudiante construya un marco lógico de relaciones causales sustentadas en evidencia empírica, lo que aún se encuentra en proceso de fortalecimiento dentro del grupo evaluado.

El desempeño obtenido sugiere que los estudiantes poseen un conocimiento fragmentado de las variables que determinan la eficiencia de la fotocatalisis, posiblemente asociado a una insuficiente reflexión sobre los fundamentos cinéticos

y termodinámicos del proceso. Por tanto, se recomienda implementar estrategias pedagógicas basadas en el aprendizaje por indagación y experimentación reflexiva, en las que los estudiantes puedan manipular las variables del sistema fotocatalítico y observar sus efectos en la velocidad de degradación del contaminante. Esta aproximación, de acuerdo con Kolb (1984), permitiría que los estudiantes transiten de la reflexión abstracta hacia la experimentación activa, etapa en la cual consolidan su razonamiento científico mediante la verificación empírica de hipótesis.

10. ¿Por qué la fotocatalisis se considera una tecnología sostenible?

16/18 respuestas correctas

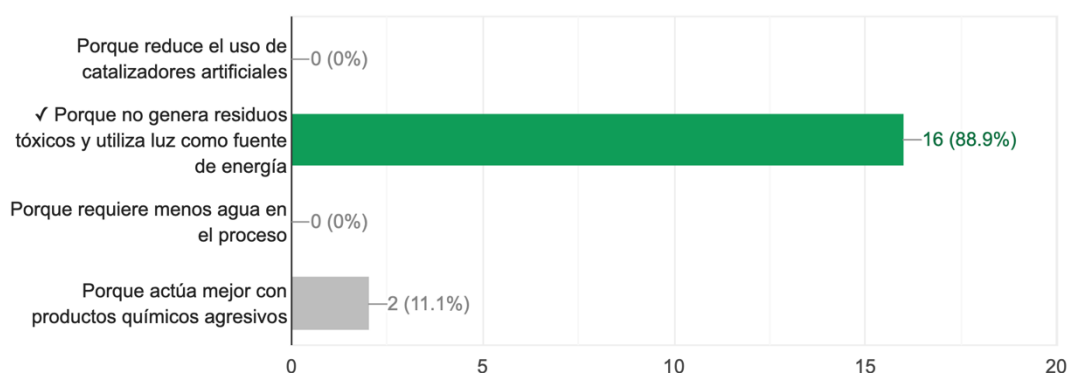


Imagen 10. Porcentaje de aciertos pregunta 10

La imagen 10 evaluó la capacidad de integración conceptual y valoración crítica de los estudiantes en torno a los principios de sostenibilidad y química verde aplicados al uso de la fotocatalisis heterogénea. Los resultados muestran que 16 de los 18 estudiantes (88.9%) respondieron correctamente, seleccionando la opción “Porque no genera residuos tóxicos y utiliza luz como fuente de energía”. En contraste, 2 estudiantes (11.1%) eligieron la opción errónea “Porque actúa mejor con productos químicos agresivos”. Este desempeño refleja un nivel alto de comprensión conceptual y actitud científica coherente con los principios de sostenibilidad ambiental, indicando que la mayoría del grupo asocia adecuadamente los fundamentos del proceso fotocatalítico con su carácter ecológico, renovable y no contaminante (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

Desde la perspectiva del modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), esta pregunta se ubica en la fase de reflexión abstracta y conceptualización activa, ya que implica la capacidad de los estudiantes para relacionar un conocimiento

científico con su implicación ética y ambiental. El alto porcentaje de aciertos sugiere que el grupo ha logrado internalizar los valores de sostenibilidad asociados a la práctica científica, mostrando un entendimiento que trasciende la descripción técnica del proceso para incorporar una reflexión sobre su impacto ecológico. De acuerdo con Kolb y Kolb (2017), esta fase representa una de las más complejas del aprendizaje experiencial, pues requiere del estudiante no solo comprender el fenómeno, sino también reinterpretar su significado en contextos sociales, ambientales y éticos. En este sentido, el desempeño evidencia que los participantes han alcanzado un pensamiento científico integral, capaz de vincular la práctica experimental con la responsabilidad ambiental.

En el marco del modelo cognitivo de Torres Salcedo (2010), esta pregunta corresponde al nivel crítico de comprensión, en el cual el estudiante analiza y valora un fenómeno a partir de criterios éticos, sociales y científicos. El resultado de 88.9 % de respuestas correctas ubica al grupo en la categoría de competencia analítica avanzada, ya que los estudiantes no solo identifican el carácter sostenible de la fotocatalisis, sino que lo justifican con base en su mecanismo intrínseco —la utilización de energía luminosa natural (UV o visible) y la ausencia de residuos secundarios nocivos—. Esta capacidad de razonamiento crítico demuestra que los participantes poseen una comprensión holística del fenómeno químico, articulando la ciencia con el desarrollo sostenible y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU, particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables) (Torres Salcedo, 2010).

El porcentaje minoritario de respuestas incorrectas (11.1 %) revela la existencia de una pequeña fracción del grupo que aún interpreta la sostenibilidad desde una perspectiva instrumental, asociándola con la “eficiencia reactiva” más que con los principios de prevención de la contaminación y aprovechamiento energético. Esta confusión sugiere la necesidad de reforzar los espacios de discusión interdisciplinar y reflexión crítica en torno al papel de la química en la mitigación de impactos ambientales. Como señalan Kolb y Kolb (2017), la reflexión colectiva en ambientes educativos promueve la consolidación de competencias ético-científicas, permitiendo que el conocimiento adquirido se traduzca en acción consciente y sostenible.

N.º Pregunta	Contenido evaluado	Fase del aprendizaje experiencial (Kolb, 1984)	Nivel de comprensión (Torres Salcedo, 2010)	Competencia analítica evidenciada	Porcentaje de aciertos
1	Concepto general de fotocátalisis heterogénea.	Concreción experiencial.	Nivel literal.	Reconocimiento de fundamentos conceptuales de la técnica fotocatalítica.	88.9%
2	Identificación del catalizador (TiO ₂).	Concreción experiencial.	Nivel literal.	Dominio básico y comprensión conceptual del agente catalítico.	100%
3	Tipo de luz efectiva en la activación del TiO ₂ .	Concreción experiencial.	Nivel literal.	Comprensión funcional del proceso de activación por radiación UV.	100%
4	Aplicación de la fotocátalisis en el tratamiento de aguas.	Experimentación activa.	Nivel inferencial.	Aplicación del conocimiento teórico en un contexto ambiental real.	94.4%
5	Mecanismo de generación de actividad fotocatalítica.	Experimentación activa.	Nivel inferencial.	Integración teórica sobre la formación de radicales oxidantes.	100%
6	Justificación del uso preferencial del TiO ₂ .	Reflexión abstracta.	Nivel inferencial.	Razonamiento lógico sobre las propiedades fisicoquímicas del catalizador.	100%
7	Limitaciones del TiO ₂ en la fotocátalisis.	Reflexión abstracta.	Nivel inferencial.	Capacidad de análisis crítico de las restricciones del material.	72.2%

N.º Pregunta	Contenido evaluado	Fase del aprendizaje experiencial (Kolb, 1984)	Nivel de comprensión (Torres Salcedo, 2010)	Competencia analítica evidenciada	Porcentaje de aciertos
8	Estrategias para mejorar la eficiencia del TiO ₂ .	Conceptualización abstracta.	Nivel crítico.	Evaluación teórica y argumentativa sobre la optimización del catalizador.	44.4%
9	Variables que influyen en la eficiencia del proceso.	Reflexión abstracta.	Nivel inferencial.	Capacidad de discriminar factores experimentales relevantes.	38.9%
10	Relación entre fotocátalisis y sostenibilidad ambiental.	Conceptualización activa.	Nivel crítico.	Integración de conocimiento científico con principios de sostenibilidad y ética ambiental.	88.9%

Tabla 10. Caracterización competencias por pregunta

El análisis de los resultados obtenidos en las diez preguntas del instrumento diagnóstico permitió identificar que los 18 estudiantes participantes poseen un dominio conceptual sólido sobre los fundamentos generales de la fotocátalisis heterogénea, particularmente en lo relacionado con el papel del TiO₂, el tipo de luz necesaria para su activación y las aplicaciones ambientales del proceso. Las fases de aprendizaje experiencial propuestas por Kolb (1984) —especialmente las de concreción experiencial y experimentación activa— se evidencian de manera predominante, lo que sugiere que los estudiantes han adquirido su conocimiento principalmente a través de la práctica y la observación de fenómenos experimentales.

No obstante, los resultados también muestran que las fases superiores del modelo de Kolb, correspondientes a la reflexión y conceptualización abstracta, presentan un desarrollo parcial. Esto se refleja en las preguntas que implicaban análisis de variables experimentales (pregunta 9) o estrategias de optimización (pregunta 8), en las que se observó un menor porcentaje de respuestas correctas. Esta tendencia

sugiere que, aunque los estudiantes dominan los conceptos básicos, requieren fortalecer su capacidad de razonamiento inferencial y crítico, así como su habilidad para establecer relaciones causales complejas y justificar decisiones científicas con fundamentos teóricos rigurosos (Kolb & Kolb, 2017).

Desde el enfoque de Torres Salcedo (2010), la mayoría de los estudiantes se ubica entre el nivel literal y el inferencial de comprensión, con evidencias puntuales de desempeño en el nivel crítico en los ítems relacionados con sostenibilidad (pregunta 10) y aplicación ambiental (pregunta 4). Esto indica que el grupo posee las bases necesarias para avanzar hacia un aprendizaje analítico más profundo, siempre que se implementen estrategias de reflexión guiada, discusión científica y aprendizaje basado en proyectos.

Estos resultados validaron directamente el problema planteado en la investigación, en tanto confirmaron que los estudiantes poseían conocimientos básicos sobre la fotocatalisis heterogénea, pero requerían fortalecer su capacidad analítica para enfrentar la problemática ambiental asociada a la presencia de acetaminofén en fuentes hídricas. Al evidenciar vacíos en el análisis de variables críticas y en la argumentación teórica, se reafirmó la pertinencia de implementar una estrategia formativa que permitiera desarrollar competencias analíticas más profundas y robustas, coherentes con los retos científicos, ambientales y educativos identificados en la justificación y los antecedentes.

En conclusión, esta fase diagnóstica permitió establecer una línea base clara sobre el estado inicial de las competencias analíticas del grupo estudiado. Los resultados mostraron fortalezas en el dominio conceptual y en la comprensión funcional del proceso fotocatalítico, así como áreas de mejora en el razonamiento inferencial y crítico. Estos hallazgos orientaron y justificaron la necesidad de las siguientes etapas del proyecto, centradas en el fortalecimiento progresivo de dichas competencias a través de actividades experimentales, reflexivas y contextualizadas en la remoción de analgésicos en aguas residuales mediante fotocatalisis heterogénea.

FASE 2 - INTERVENCIÓN FORMATIVA – COMPRENSIÓN APLICADA DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

Durante esta fase se llevó a cabo una intervención pedagógica de carácter virtual, cuyo propósito fue fortalecer los conocimientos teóricos y la comprensión analítica de los estudiantes sobre el proceso de fotocatalisis heterogénea y su aplicación en la remoción de contaminantes emergentes, específicamente el acetaminofén en fuentes de agua sintéticas. La intervención fue desarrollada a través de un

encuentro sincrónico en línea, empleando recursos digitales interactivos, presentaciones estructuradas y discusión guiada en torno a los principios de la catálisis foto inducida y su relevancia en el contexto ambiental contemporáneo (Kolb, 1984; Torres Salcedo, 2010).

The slide features the logo for 'Maestría en Docencia de la Química MDQU' and the 'UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL' logo with the tagline 'Educadora de educadores'. The main title is 'Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes (acetaminofén) mediante fotocatalisis heterogénea con TiO₂'. Below the title, it states 'Propuesta. Experimental para el Tratamiento de Aguas Residuales'. The author is 'Lic. Alfonso Rafael Alean Garrido - Universidad Pedagógica Nacional' and the director is 'Directora: Phd. Dora Luz Gómez Aguilar - Universidad Pedagógica Nacional'. An illustration shows a hand holding a red strip labeled 'Fotocatalizador' over a pipe discharging water. On the right side of the slide, there are two small video thumbnails: the top one shows a person with the name 'ALFONSO RAFAEL ALEAN GARRIDO' below it, and the bottom one shows a person in a video call with a circular graphic in the background.

Imagen 11. Intervención conocimientos teóricos. Elaboración propia

En la primera parte de la sesión se explicó detalladamente el mecanismo de la fotocatalisis heterogénea, destacando el papel del dióxido de titanio (TiO₂) como catalizador semiconductor, la generación de pares electrón–hueco bajo radiación ultravioleta, y la formación de radicales oxidantes ($\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2\bullet^-$) responsables de la degradación de compuestos orgánicos persistentes. Se abordaron los fundamentos de la excitación electrónica y la transferencia de carga en la superficie catalítica, relacionando estos fenómenos con los resultados obtenidos en la fase diagnóstica (Madriz et al., 2016; Ibhaddon & Fitzpatrick, 2013). Esta explicación permitió que los estudiantes consolidaran la comprensión de los procesos físico-químicos subyacentes, en coherencia con la fase de conceptualización abstracta del modelo experiencial de Kolb (1984), donde el aprendizaje se construye a partir de la integración entre la teoría y la observación.

02:32:08

Controlar Separar Chat Gente 13 Participar Reaccionar Vista Controles Salas Aplicaciones Más Cámara Micrófono Comparte Salir

Reactivar audio del micrófono (Ctrl+Shift+M)

Mecanismo Indirecto de la fotocatalisis heterogénea.

Los procesos fotocatalíticos ocurren en temperatura ambiente y presión atmosférica (condiciones normales), por lo que no se necesitan instalaciones complejas y se reducen los costes energéticos y económicos

Fotocatalisis

$$\text{TiO}_2 + h\nu \rightarrow \text{TiO}_2^* (h^*_{vb} + e^-_{cb})$$

$$\text{OH}^-_{(aq)} + h^*_{vb} \rightarrow \text{OH}^{\bullet}_{(aq)}$$

$$\text{O}_{2(aq)} + e^-_{cb} \rightarrow \text{O}_2^{\bullet -}_{(aq)}$$

Camino 1: Oxidación mediante radicales hidroxilos OH

(a) $\text{NO}_{(g)} + 2\text{OH}^{\bullet}_{(aq)} \rightarrow \text{NO}_2^{\bullet}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

(b) $\text{NO}_{2(aq)} + \text{OH}^{\bullet}_{(aq)} \rightarrow \text{NO}_3^{\bullet -}_{(aq)} + \text{H}^+_{(aq)}$

Camino 2: Oxidación mediante "oxígeno activo"

$$\text{NO}_{(g)} \xrightarrow{\text{O}_2^{\bullet -}_{(aq)}} \text{NO}_3^{\bullet -}_{(aq)}$$

Camino 3: Reacción con Ti-OH

$$3\text{NO}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{NO}_3^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$$

Eliminación de HNO3 de la superficie por la acción del agua

$$[\text{HNO}_3]_{(s)} \rightarrow \text{HNO}_3_{(aq)}$$

ALEJONSO BARRAL ALEJAN GARRIDO

Imagen 12. Explicación fundamentos fotocatalisis. Elaboración propia

Posteriormente, se presentó un análisis contextual e histórico, en países donde se ha empleado esta técnica para remover agentes contaminantes en fuentes hídricas. Abordando las problemáticas ambientales derivadas de la presencia de fármacos, particularmente el acetaminofén. Se discutieron estudios recientes que evidencian que este analgésico, uno de los más consumidos a nivel mundial, alcanza concentraciones detectables en aguas residuales y superficiales de entre 0.1 y 65 $\mu\text{g/L}$ (Barbosa et al., 2016; Tiedeken et al., 2017). Dichas concentraciones, aunque bajas, representan un riesgo ecotoxicológico acumulativo para peces y organismos acuáticos, generando alteraciones en procesos metabólicos, daño hepático y estrés oxidativo (Ebele, Abdallah, & Harrad, 2017). Además, se discutió el riesgo potencial para los seres humanos debido a la bioacumulación y persistencia de metabolitos farmacéuticos que pueden interferir con los sistemas enzimáticos y endocrinos (Aus der Beek et al., 2016). Esta reflexión permitió sensibilizar a los estudiantes frente al impacto ambiental de los contaminantes emergentes, promoviendo una conciencia científica y ética en torno a la responsabilidad del químico en la mitigación de dichos efectos (Kolb & Kolb, 2017).

Clase de Énfasis II Tecnologías Limpias

02:14:56 Controlar Separar Chat Gente 13 Participar Reaccionar Vista Controles Más Cámara Micrófono Comparte Salir

Resultados Internacionales Destacados (bandera) inicio histórico de fotocatalisis

<p>España</p> <p>TiO₂ modificado con hierro y cobre bajo irradiación solar simulada: remociones superiores al 80% de acetaminofén.</p>	
<p>Brasil</p> <p>TiO₂ inmovilizado en vidrios y cerámicas para facilitar recuperación post-tratamiento.</p>	
<p>México</p> <p>Sistemas de fotocatalisis en reactores solares tipo CPC para evaluar comportamiento en condiciones reales.</p>	
<p>Irán</p> <p>Nanocompuestos avanzados con TiO₂ y grafeno: elevada eficiencia y estabilidad en ciclos repetitivos.</p>	

ALFONSO RAFAEL ALEAN GARRIDO — +

Imagen 13. Recuento histórico y problemáticas ambientales por acetaminofén en aguas. Elaboración propia

En el desarrollo de la intervención también se explicó la práctica experimental de fotocatalisis que se implementaría posteriormente en el laboratorio, describiendo el diseño del sistema fotocatalítico, las condiciones experimentales (concentración del catalizador, irradiancia, concentración del fármaco, tiempo de exposición y agitación de la muestra) y los métodos de cuantificación del porcentaje de remoción del analgésico. Se emplearon ejemplos visuales que permitieron a los estudiantes vincular la teoría con la práctica, favoreciendo la transición hacia la fase de experimentación activa del modelo de Kolb (1984). Este proceso de anticipación analítica fue clave para desarrollar en los participantes la habilidad de formular hipótesis y predecir comportamientos químicos de acuerdo con los parámetros operativos del sistema (Torres Salcedo, 2010; Carbajo, 2013).

El enfoque metodológico adoptado en esta intervención se basó en los principios del aprendizaje significativo y experiencial, promoviendo el razonamiento crítico y la comprensión interdisciplinaria del problema ambiental. Como sostienen Cano y García (2020), la enseñanza de la química ambiental mediante estrategias activas como la discusión guiada y la experimentación virtual favorece la adquisición de competencias analíticas y éticas, al contextualizar el conocimiento en situaciones reales de impacto social. En este sentido, la actividad no solo contribuyó a reforzar los conceptos teóricos relacionados con la fotocatalisis, sino que también permitió

establecer un puente entre la ciencia, la sostenibilidad y la formación ciudadana responsable (Kolb & Kolb, 2017; Aus der Beek et al., 2016).

Finalmente, esta fase permitió constatar la pertinencia de la intervención educativa virtual como herramienta didáctica en la enseñanza de la química aplicada. Los resultados de las discusiones y reflexiones compartidas evidenciaron un avance en la comprensión crítica de los fenómenos fotoquímicos y sus implicaciones ambientales, consolidando la base conceptual necesaria para el desarrollo de la práctica experimental posterior. De este modo, la Fase 2 se constituyó como un espacio de integración del conocimiento teórico con la acción científica y ambientalmente responsable, elemento fundamental dentro de la formación de competencias analíticas en el marco del aprendizaje basado en proyectos (Torres Salcedo, 2010; Kolb, 1984).

FASE 3 - MONTAJE Y VERIFICACIÓN DEL FOTOCATALIZADOR

En esta fase se realizó el montaje experimental del sistema fotocatalítico y la verificación cualitativa de su funcionamiento, con el propósito de evaluar la eficacia del fotocatalizador elaborado en condiciones controladas. Esta etapa representó un componente clave dentro del proceso investigativo, pues permitió pasar del conocimiento teórico a la validación práctica, en concordancia con la fase de experimentación activa del modelo de Kolb (1984). La actividad fue ejecutada por los estudiantes participantes, bajo la orientación metodológica del equipo docente, siguiendo los lineamientos de seguridad, sostenibilidad y rigurosidad técnica propios del contexto académico.

MONTAJE DEL SISTEMA FOTOCATALÍTICO CASERO

El montaje del sistema se diseñó con el objetivo de construir un fotocatalizador de bajo costo y funcionalidad didáctica, empleando materiales accesibles y ambientalmente seguros. Para la elaboración del fotocatalizador se utilizaron los siguientes materiales:

Material	Función dentro del fotocatalizador
Láminas de madera	Sirven como estructura base o marco para sostener los componentes. La madera actúa como soporte mecánico, permitiendo crear una caja o marco cuadrado estable donde se fijan los demás materiales.
Papel aluminio	Cumple una función de superficie reflectante. Refleja la radiación ultravioleta emitida por la cinta LED, maximizando la cantidad de luz que incide sobre el catalizador (por ejemplo, TiO_2 en un vidrio o placa). Además, ayuda a distribuir uniformemente la energía lumínica.
Adaptador de 12 V	Es la fuente de alimentación eléctrica. Convierte la corriente alterna (AC) del tomacorriente en corriente continua (DC) a 12 V, necesaria para energizar la cinta LED UV. Sin esta fuente, los LED no podrían emitir radiación.
Cinta LED 5050 Ultravioleta (60 LED, 12 V)	Es la fuente de radiación UV, la cual activa el fotocatalizador. Al emitir luz en el rango ultravioleta ($\approx 365\text{--}400\text{ nm}$), los fotones excitan los electrones del semiconductor, generando pares electrón-hueco que permiten la oxidación y reducción de contaminantes orgánicos.
Pegante resistente a la silicona caliente (opcional)	Se utiliza para fijar las partes estructurales (madera, papel aluminio, LED). Debe resistir la temperatura y humedad del entorno experimental.

Tabla 11. Materiales para la creación del fotocatalizador

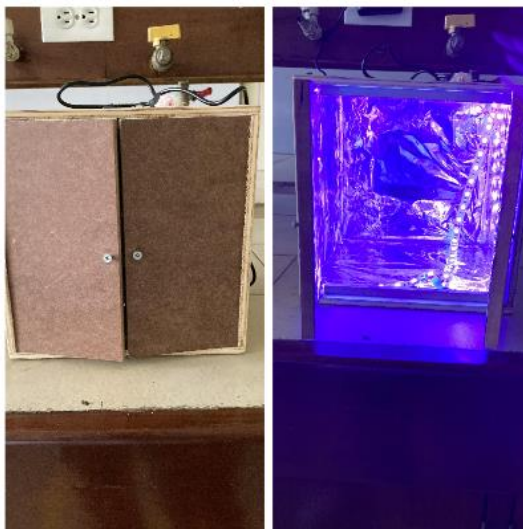


Imagen 14. Montaje fotocatalizador. elaboración propia

Por otra parte, se empleó dióxido de titanio (TiO_2) en polvo como material semiconductor activo, el cual se dispersó sobre una superficie de vidrio previamente tratada para favorecer la adherencia del catalizador. Este soporte permitió la exposición uniforme del material a la radiación ultravioleta (UV) durante el proceso experimental. El sistema de irradiación se conformó mediante el uso de una cinta led UV de 12 V ($\lambda = 365 \text{ nm}$), dispuesta en todo el fotocatalizador, lo que garantizó una iluminación homogénea sobre la superficie catalítica (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; Madriz et al., 2016).

Para la reacción fotocatalítica, se utilizó un vaso de precipitado de 100 mL, donde posteriormente se colocó en el fotocatalizador junto con una disolución a trabajar.

El sistema fue conectado a una fuente de agitación magnética, lo que permitió mantener una distribución uniforme del catalizador y del contaminante durante el proceso. Asimismo, se controlaron variables operativas la concentración y el tiempo de exposición. Estas condiciones fueron seleccionadas a partir de los parámetros de estudios previos sobre fotocátalisis doméstica y semiestructurada (Carbajo, 2013; Suárez et al., 2019).

VERIFICACIÓN CUALITATIVA DEL FOTOCATALIZADOR MEDIANTE AZUL DE METILENO

Una vez completado el montaje, se procedió a realizar la verificación cualitativa de la eficiencia del fotocatalizador, utilizando azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) como

sustancia trazadora. Este colorante fue seleccionado por su alta estabilidad estructural y sensibilidad cromática, lo que permite observar visualmente los cambios asociados a su degradación fotoquímica (Mansilla, 2018). La prueba consistió en exponer la disolución del colorante al sistema fotocatalítico durante un tiempo determinado bajo irradiación UV, registrando visualmente las variaciones en la intensidad del color.

Para la verificación cualitativa del fotocatalizador se preparó una disolución diluida de azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) empleando 0.001 g de soluto de grado analítico.



Imagen 15. Gramos de azul de metileno. elaboración propia

La concentración se determinó mediante el cálculo de molaridad, partiendo de la expresión general $M = \frac{n}{V}$, donde n corresponde a los moles de soluto y V al volumen total de la disolución. Primero se calculó el número de moles a partir de la relación $n = \frac{m}{PM}$, con una masa de 0.001 g y un peso molecular promedio de 319.85 $g \cdot mol^{-1}$:

$$n = \frac{0.001 \text{ g}}{319.85 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 3.12 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

Posteriormente, este valor se sustituyó en la ecuación de molaridad. La disolución se aforó a 100 mL (0.1 L), la concentración final fue:

$$M = \frac{3.12 \times 10^{-6} \text{ mol}}{0.1 \text{ L}} = 3.12 \times 10^{-5} \text{ M}$$



Imagen 16. muestra de azul de metileno. elaboración propia

De este modo, la preparación obtenida correspondió a una disolución de aproximadamente $3.12 \times 10^{-5} \text{ M}$, adecuada para observar cambios cualitativos en la degradación del colorante durante la irradiación UV en presencia del fotocatalizador. Para evitar foto degradación prematura, la disolución se almacenó en frasco ámbar hasta el momento de su uso experimental (Mansilla, 2018; Fernández, Quiroga, & Mansilla, 2021).

Se llevo la muestra contaminante al fotocatalizador utilizando 0.050g de TiO_2



Imagen 17. Gramos de TiO₂. elaboración propia

Durante el proceso experimental, la disolución de azul de metileno (3.12×10^{-5} M) fue sometida al sistema fotocatalítico en presencia de 0.050 g de dióxido de titanio (TiO₂) como catalizador activo. Con el fin de evaluar visualmente la cinética cualitativa de degradación, se realizaron cuatro tomas de muestra en intervalos de 30 (1), 60 (2), 90 (3) y 120 (4) minutos bajo irradiación ultravioleta continua ($\lambda = 365$ nm). En cada intervalo se observó un cambio progresivo en la coloración de la solución, pasando de un azul intenso inicial a tonalidades azul claro y finalmente a una coloración casi incolora en el último registro, lo que evidenció la ruptura de los enlaces cromóforos responsables de la absorción visible característica del azul de metileno.

Este comportamiento confirmó la generación efectiva de especies reactivas de oxígeno, principalmente radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) y superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), en la superficie activa del TiO₂, las cuales promovieron la oxidación del colorante por mecanismos de ataque electrofílico y ruptura del sistema conjugado aromático. Aunque el ensayo tuvo una naturaleza cualitativa, los resultados obtenidos demostraron que el fotocatalizador elaborado presentó una actividad fotoquímica satisfactoria, evidenciada por la pérdida visible de coloración en función del tiempo de exposición (Barbosa et al., 2016; Fernández, Quiroga, & Mansilla, 2021; Ebele, Abdallah, & Harrad, 2017).



Imagen 18. Muestras degradadas según el tiempo 30,60.90.120 minutos elaboración propia.



Imagen 19. Muestra inicial a tiempo 0. elaboración propia

Tiempo de exposición (min)	Cantidad de TiO ₂ (g)	Observación visual	Interpretación cualitativa
0	0.050	Solución azul intenso, homogénea y estable.	Estado inicial sin degradación. No hay evidencia de actividad fotocatalítica.
30	0.050	Ligero cambio hacia un tono azul más claro.	Inicio de la activación del TiO ₂ y generación incipiente de radicales oxidantes ($\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2\bullet^-$).
60	0.050	Color azul moderado, evidente disminución de la intensidad.	Proceso de degradación en curso; ruptura parcial de enlaces cromóforos.
90	0.050	Tono azul muy tenue, casi translúcido.	Avance significativo del proceso de oxidación foto inducida.
120	0.050	Solución casi incolora, con ligera turbidez.	Degradación cualitativamente completa del colorante; alta eficiencia fotocatalítica.

Tabla 12. resultados experimentales obtenidos a partir de la degradación de azul de metileno

El comportamiento observado en la degradación del azul de metileno permitió correlacionar el tiempo de exposición con la eficiencia fotoquímica del sistema catalítico, evidenciando que el proceso de remoción fue directamente proporcional al incremento del tiempo de irradiación ultravioleta. Durante los primeros 30 minutos, el cambio cromático fue leve, lo que indicó la etapa inicial de activación del TiO₂ y la generación de los primeros radicales oxidantes ($\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2\bullet^-$). A partir de los 60 minutos, la pérdida de intensidad del color fue notoria, mostrando que la cantidad de radicales generados fue suficiente para iniciar la ruptura de los enlaces cromóforos y del anillo aromático del colorante. En los intervalos de 90 y 120 minutos, la solución alcanzó una coloración prácticamente incolora, lo que sugiere una degradación cualitativamente completa de las moléculas del azul de metileno (Fernández, Quiroga, & Mansilla, 2021; Mansilla, 2018).

Este comportamiento coincide con los resultados reportados por Barbosa et al. (2016) y Ebele, Abdallah y Harrad (2017), quienes señalaron que la eficiencia de la

fotocatálisis heterogénea depende del tiempo de exposición y de la disponibilidad de centros activos en la superficie del catalizador. Así, la disminución progresiva de la coloración observada en las muestras demostró la viabilidad funcional del fotocatalizador casero elaborado, validando su capacidad para inducir reacciones foto-oxidativas en condiciones experimentales controladas.

En conclusión, la secuencia temporal de degradación del azul de metileno evidenció un proceso eficiente de oxidación avanzada promovida por el TiO_2 , donde el aumento del tiempo de exposición favoreció la eliminación visual del colorante, confirmando el funcionamiento del sistema fotocatalítico. Estos resultados cualitativos constituyeron una evidencia empírica sólida para validar el montaje realizado y sirvieron como base para la fase posterior de análisis cuantitativo orientado a la remoción de contaminantes farmacéuticos, específicamente el acetaminofén, en aguas residuales sintéticas (Aus der Beek et al., 2016; Kolb & Kolb, 2017).

CURVA DE CALIBRACIÓN PARA ACETAMINOFÉN (VALIDACIÓN DEL MÉTODO)

Para asegurar una medición reproducible por UV-Vis y minimizar sesgos de matriz, la solución de trabajo se preparó en medio ácido con HCl 0,1 M, ya que el pH ácido estabiliza la respuesta espectral del acetaminofén y reduce variaciones asociadas a su ionización fenólica, mejorando la linealidad y la precisión intermedias del método; adicionalmente, usar un volumen de 500 mL garantiza suficiente solución para preparar blancos, estándares y repeticiones sin re-preparaciones que introduzcan error aleatorio (APHA, 2017; Harris, 2020; ICH Q2(R2), 2022; USP <857>, 2021).

La solución de HCl 0,1 M (500 mL) se preparó de la siguiente manera:

$$\frac{0.1 \text{ mol HCl}}{L} * (0.5L) * \frac{36.46g \text{ HCl}}{1 \text{ mol HCl}} * \frac{100g \text{ R.Q HCl}}{37g \text{ Puro HCl}} * \frac{1 \text{ mL}}{1.19g} = 4.14 \text{ mL}$$

HCl y se llevó a 500 mL con agua destilada.

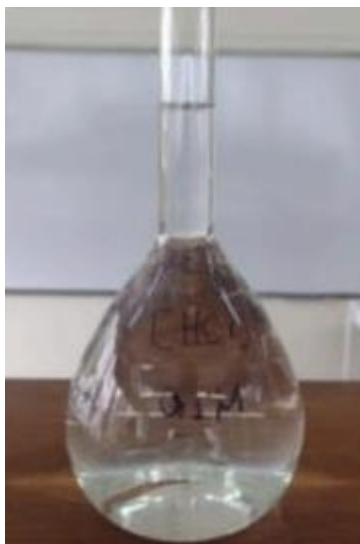


Imagen 20. Preparación HCl 0.1M. Elaboración propia

Con el fin de construir la curva analítica, se preparó una solución stock de acetaminofén a 500 ppm ($500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el mismo medio de HCl 0,1 M para mantener la concordancia de matriz. Para 500 mL de stock a 500 ppm, la masa requerida fue:

$$\frac{500 \text{ mg}}{\text{L}} * (0.05\text{L}) * \frac{1*10^{-3} \text{ g}}{1 \text{ mg}} = 0.025\text{g de acetaminofén}$$



Imagen 21. Laboratorio empelado para la validación de la curva de calibración. Elaboración propia

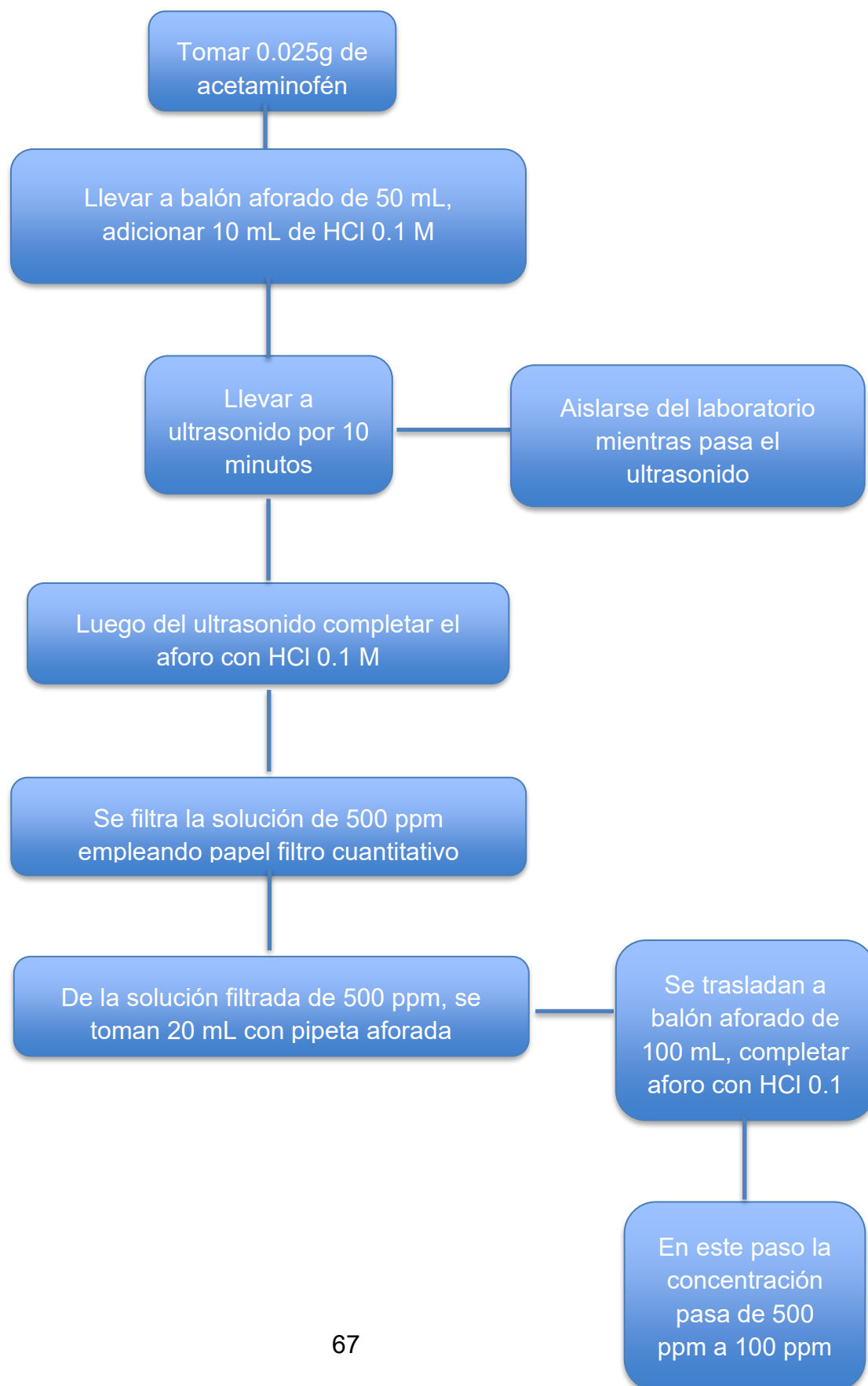




Imagen 22. Macerado y gramos pesados de acetaminofén. Elaboración propia.

Se pesaron 0,0250 g de acetaminofén (pureza reconocida) en balanza analítica, empleando vidrio de reloj, papel aluminio y una micro espátula. Esta masa, al disolverse y aforarse a 50 mL, produce una solución de 500 ppm. El empleo de masas que conduzcan a stocks enteros (500 ppm) facilita la trazabilidad y minimiza el error de redondeo en diluciones posteriores (Harris, 2020; ICH Q2(R2), 2022).



Imagen 23. muestra de acetaminofén 500ppm. Elaboración propia.

El sólido se transfirió cuantitativamente a un balón aforado de 50 mL y se añadieron 10 mL de HCl 0,1 M para favorecer la disolución inicial en medio ácido. El uso sistemático de la misma matriz (HCl 0,1 M) para blancos, estándares y muestras mejora la estabilidad espectral (ionización controlada del grupo fenólico) y la robustez del método UV-Vis al mantener pH e ionicidad constantes durante la calibración (APHA, 2017; USP <857>, 2021).



Imagen 24. muestra de acetaminofén 500ppm en ultrasonido. Elaboración propia.

La solución se sometió a baño ultrasónico (20–40 kHz) por 10 min para acelerar la disolución mediante cavitación acústica, que incrementa el transporte de masa, rompe agregados y ayuda a desalojar microburbujas adheridas al sólido o al vidrio. Este tratamiento reduce el tiempo de disolución y mejora la repetibilidad entre preparaciones (Mason & Lorimer, 2002; Chemat & Khan, 2011). Como precauciones analíticas, es recomendable aislarse del laboratorio cuando el ultrasonido esté en funcionamiento ya que puede ocasionar afectaciones en los oídos. Finalizado el ultrasonido, se dejó atemperar a 18–20 °C antes del aforo, pues las variaciones térmicas alteran el volumen efectivo y la absorbancia (Harris, 2020; USP <1051>, 2021).



Imagen 25. Muestra aforada después del ultrasonido. Elaboración propia.

Tras el reposo térmico, se completó el volumen a la marca con HCl 0,1 M y se homogeneizó por inversión (≥ 10 veces). La concentración teórica del stock resultante es 500 ppm. El uso de material clase A (balón y pipetas aforadas) reduce

la incertidumbre volumétrica y contribuye a la linealidad y precisión del método (Harris, 2020; ICH Q2(R2), 2022).

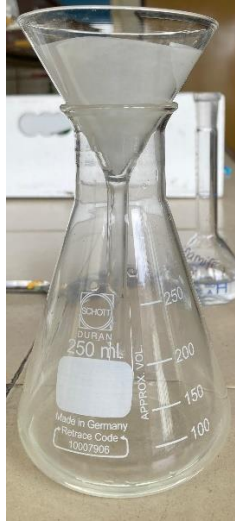


Imagen 26. Filtrado de la solución 500 ppm con papel filtro cuantitativo. Elaboración propia.

La solución 500 ppm se filtró con papel filtro cuantitativo para retirar partículas no disueltas, fibras o burbujas remanentes. Este paso es crítico en UV-Vis, ya que la presencia de turbidez/particulado introduce dispersión de luz y desviaciones a la ley de Beer-Lambert, alterando la línea base y provocando errores positivos de absorbancia. El filtrado también protege las celdas (rayaduras, depósitos) y mejora la repetibilidad de las lecturas (USP <857>, 2021; Skoog et al., 2014).

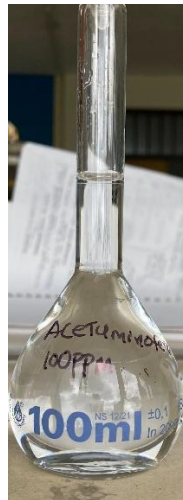


Imagen 27. Dilución analítica: 20 mL de 500 ppm a 100 mL con HCl 0,1 M.

Se tomaron 20 mL de la solución filtrada (500 ppm) con pipeta aforada y se transfirieron a balón aforado de 100 mL, completando el volumen con HCl 0,1 M. Cálculo por: $C_1V_1=C_2V_2$

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot V_1}{V_2} = \frac{500 \text{ ppm} \cdot 20 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 100 \text{ ppm}$$

Esta dilución prepara uno de los puntos de la curva de calibración manteniendo la misma matriz, condición clave para la validez de la calibración (Harris, 2020; ICH Q2(R2), 2022).

La operación de dilución redujo la concentración nominal de 500 ppm a 100 ppm, tal como prevé la relación estequiométrica de volúmenes y concentraciones.



Imagen 28. Preparación de patrones de trabajo (3–14 ppm) desde la solución de 100 ppm

Con el objetivo de construir la curva de calibración con el UV-Vis, se prepararon seis patrones de trabajo a partir de la solución filtrada de 100 ppm de acetaminofén en HCl 0,1 M, (APHA, 2017; USP <857>, 2021). Cada patrón se aforó a 50,0 mL en balón clase A, aplicando la relación de dilución $C_1V_1=C_2V_2$, con $C_1=100$ ppm y $V_2=50$ mL. La preparación se realizó con pipetas aforadas y en orden ascendente de concentración para reducir riesgo de contaminación cruzada; el blanco fue HCl 0,1 M (Harris, 2020; ICH Q2(R2), 2022).

CÁLCULO GENERAL APLICADO

$$V_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{C_1} = \frac{3 \text{ ppm} \cdot 50 \text{ mL}}{100 \text{ ppm}} = 1,5 \text{ mL}$$

Donde C_2 es la concentración objetivo del patrón (ppm). Así, cada punto se obtuvo pipeteando V_1 de la solución de 100 ppm y completando a 50 mL con HCl 0,1 M (USP <857>, 2021; Harris, 2020).

Muestra	(C_2) objetivo (ppm)	(V_1) desde 100 ppm (mL)	Completar con HCl 0,1 M hasta (mL)
1	3	1,5	50
2	6	3,0	50
3	8	4,0	50
4	10	5,0	50
5	12	6,0	50
6	14	7,0	50

Tabla 13. Preparación de patrones de trabajo desde la solución de 100 ppm ($V_2=50$ mL). Elaboración propia

Una vez preparadas las seis muestras patrón (3–14 ppm), se procedió a la lectura espectrofotométrica en un espectrofotómetro UV–Visible de doble haz, previamente calibrado y con celdas de cuarzo de 1 cm de trayectoria óptica.

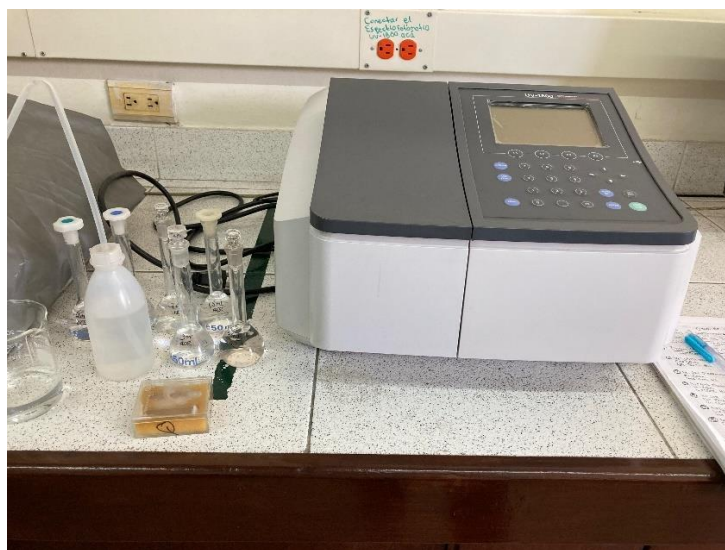


imagen 29. Lectura Uv- Vis muestras de acetaminofén

Las mediciones se realizaron empleando HCl 0,1 M como blanco de referencia, registrando las absorbancias en el intervalo de 200 a 350 nm, con el fin de identificar el máximo de absorción característico del acetaminofén. El máximo de absorbancia (λ_{max}) se determinó a 243 nm, correspondiente a la transición electrónica $\pi \rightarrow \pi^*$ del

anillo bencénico sustituido y del grupo amida presente en la molécula (López et al., 2019; Jain et al., 2021). Esta longitud de onda fue seleccionada para todas las mediciones posteriores, garantizando la especificidad y sensibilidad del método. Cada patrón fue leído por triplicado, obteniendo promedios de absorbancia que sirvieron para construir la curva de calibración (Abs vs. Concentración), con el fin de validar la linealidad instrumental y la precisión del método en el rango de trabajo propuesto (ICH Q2(R2), 2022; USP <857>, 2021).

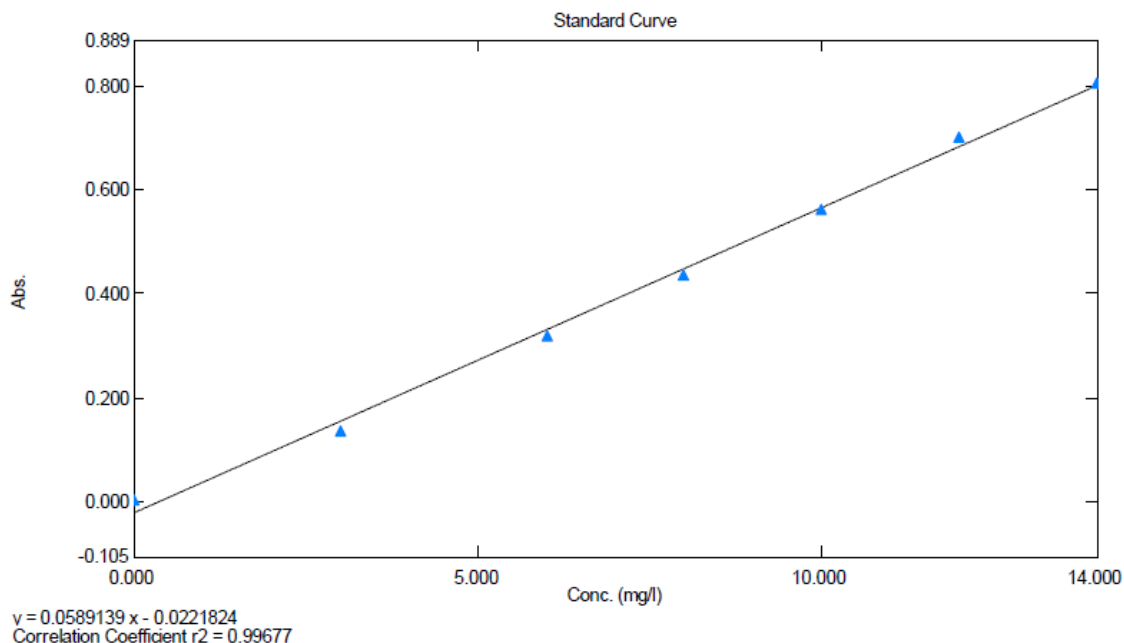


Figura 6. Curva de calibración acetaminofén (Anexo 5). Elaboración propia

La curva de calibración obtenida experimentalmente para el acetaminofén, en el rango de 3 a 14 ppm, mostró un comportamiento lineal altamente consistente, ajustándose a la ecuación de regresión:

$$A = 0.0589 C - 0.0222$$

Donde A corresponde a la absorbancia y C a la concentración expresada en ppm. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9968$) evidenció una correlación positiva y robusta entre ambas variables, confirmando la aplicación satisfactoria de la Ley de Beer–Lambert, la cual establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del analito y a la longitud de la celda (Skoog, Holler, & Crouch, 2014). De acuerdo con las especificaciones del ICH Q2(R2) (2022) y de la Farmacopea de los Estados Unidos (USP <857>, 2021), un valor de $R^2 \geq 0.995$ se considera evidencia suficiente de linealidad analítica, por lo que el método implementado cumple con los criterios de validación internacionalmente aceptados.

Los datos experimentales de absorbancia —3 ppm (0.136), 6 ppm (0.320), 8 ppm (0.436), 10 ppm (0.562), 12 ppm (0.704) y 14 ppm (0.806)— mostraron un incremento proporcional, reflejando la respuesta lineal del detector UV–Vis en el rango estudiado. La pendiente de la regresión ($0.0589 \text{ A}\cdot\text{ppm}^{-1}$) representó la sensibilidad instrumental del método, es decir, la capacidad de discriminar pequeños cambios de concentración mediante variaciones medibles en absorbancia (Harris, 2020). Este valor implica que un incremento de 0.010 unidades de absorbancia equivale aproximadamente a 0.17 ppm de acetaminofén, lo que demuestra una respuesta adecuada para la cuantificación en niveles bajos de concentración, concordante con estudios de métodos directos de acetaminofén en UV–Vis reportados por López, Cárdenas y Méndez (2019) y Jain, Singh y Dubey (2021), quienes emplearon intervalos de detección entre 2 y 15 ppm con pendientes similares.

El intercepto negativo obtenido (-0.0222) fue pequeño en relación con las señales de trabajo, equivalente a un 3.9 % de la absorbancia media a 10 ppm, y por tanto no afectó significativamente la linealidad ni la exactitud del método. Sin embargo, su presencia indica un ligero desplazamiento basal del instrumento o efecto de matriz, por lo que se recomendó conservar la corrección con blanco ácido (HCl 0.1 M) en todas las mediciones para compensar la absorbancia residual del medio. Tal recomendación está respaldada por las guías del ICH Q2(R2) (2022) y la USP <857> (2021), que sugieren mantener el intercepto libre (no forzado a cero) cuando existen ligeras absorciones de fondo atribuibles a la matriz o al solvente.

Desde el punto de vista estadístico, la distribución de los residuos de regresión (observado–predicho) fue aleatoria, sin evidencias de curvatura sistemática, lo que valida el uso del modelo lineal simple. No obstante, se observó una ligera dispersión negativa en los niveles más bajos (3–6 ppm), atribuible a la heterocedasticidad natural del método UV–Vis, fenómeno descrito por Harris (2020) como el aumento relativo del error en absorbancias pequeñas debido a la incertidumbre del fotodetector y a fluctuaciones de la línea base. Para compensar este comportamiento en futuras validaciones cuantitativas, podría aplicarse una ponderación $1/x$ o $1/x^2$ en la regresión lineal, de acuerdo con las recomendaciones de ICH Q2(R2) (2022) y el enfoque estadístico de Miller & Miller (2018).

El análisis de los parámetros de sensibilidad reveló que la pendiente obtenida ($S = 0.0589$) es comparable con las reportadas por López et al. (2019) y Jain et al. (2021), quienes hallaron valores entre 0.055 y $0.061 \text{ A}\cdot\text{ppm}^{-1}$, con coeficientes de determinación superiores a 0.995. Estos resultados confirman la reproducibilidad y exactitud metodológica, así como la adecuación del rango de trabajo de 3 a 14 ppm para la detección del analgésico. Asimismo, la concentración límite de detección (LOD) estimada teóricamente por $3\sigma/S$ se ubicó en torno a 0.15 ppm, mientras que

el límite de cuantificación (LOQ) calculada como $10\sigma/S$ fue aproximadamente 0.50 ppm, lo que respalda la utilidad del método en estudios de remoción fotoquímica y en la evaluación de la eficiencia de fotocatalizadores (Barbosa et al., 2016; Fernández, Quiroga, & Mansilla, 2021).

En términos analíticos, la curva de calibración validada a 242 nm demostró precisión, linealidad y sensibilidad suficientes para ser empleada como herramienta cuantitativa en el monitoreo de la degradación del acetaminofén por procesos fotocatalíticos heterogéneos. De acuerdo con los principios del aprendizaje experiencial de Kolb (1984), este resultado consolida la fase de conceptualización abstracta del proceso formativo, al permitir que los participantes comprendan la relación entre las variables experimentales y los fundamentos teóricos del análisis químico. Por tanto, la curva obtenida no solo cumple los criterios técnicos de validez metrológica, sino que además constituye un referente de aplicación práctica y académica en la integración de la espectrofotometría UV–Vis dentro del enfoque de enseñanza–investigación en química ambiental aplicada.

DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE ACETAMINOFÉN CON TiO_2 (0,075 G)

Tras validar la curva de calibración UV–Vis ($\lambda = 242\text{--}243$ nm) y los rangos lineales de trabajo, se procedió a la degradación fotocatalítica de las soluciones de acetaminofén previamente preparadas, empleando 0,075 g de dióxido de titanio (TiO_2) como masa catalítica. La elección de esta dosis respondió a la necesidad de asegurar una superficie activa suficiente para la generación de pares electrón–hueco bajo irradiación UV y, al mismo tiempo, minimizar fenómenos de dispersión óptica y sombreado interno que afectan la transmitancia en sistemas con exceso de sólido (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; USP <857>, 2021). El medio de reacción se mantuvo en HCl 0,1 M, con el fin de conservar la matriz de la calibración y evitar cambios espectrales por ionización del analito; así mismo, se utilizaron celdas de cuarzo de 1 cm y el blanco fue la misma matriz ácida sin analito (APHA, 2017; Harris, 2020).

El procedimiento experimental contempló adsorción en oscuridad a 120 minutos para alcanzar equilibrio analito–catalizador, seguida de irradiación UV (cinta led 365 nm) con agitación magnética constante. Se realizaron muestreos en tiempos 0, 30, 60, 90 y 120 min; cada alícuota se separó del catalizador por filtración (papel filtro cuantitativo) para detener la reacción y evitar interferencias por dispersión antes de la lectura. Las absorbancias se registraron a 242–243 nm contra el blanco ácido, aplicando la ecuación de regresión validada para obtener las concentraciones instantáneas C_t (ICH Q2(R2), 2022; USP <857>, 2021). Con el fin de discriminar el

efecto fotoquímico del catalizador, se ejecutaron controles: (i) fotólisis (sin TiO_2 , con UV) y (ii) adsorción (con TiO_2 , en oscuridad), tal como aconsejan los protocolos de evaluación de procesos de oxidación avanzada (Barbosa et al., 2016; Skoog, Holler, & Crouch, 2014).

La eficiencia de remoción se expresó como porcentaje usando:

$$\% \text{ remoción} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100$$

Donde C_0 es la concentración inicial y C_t la concentración a cada tiempo t .

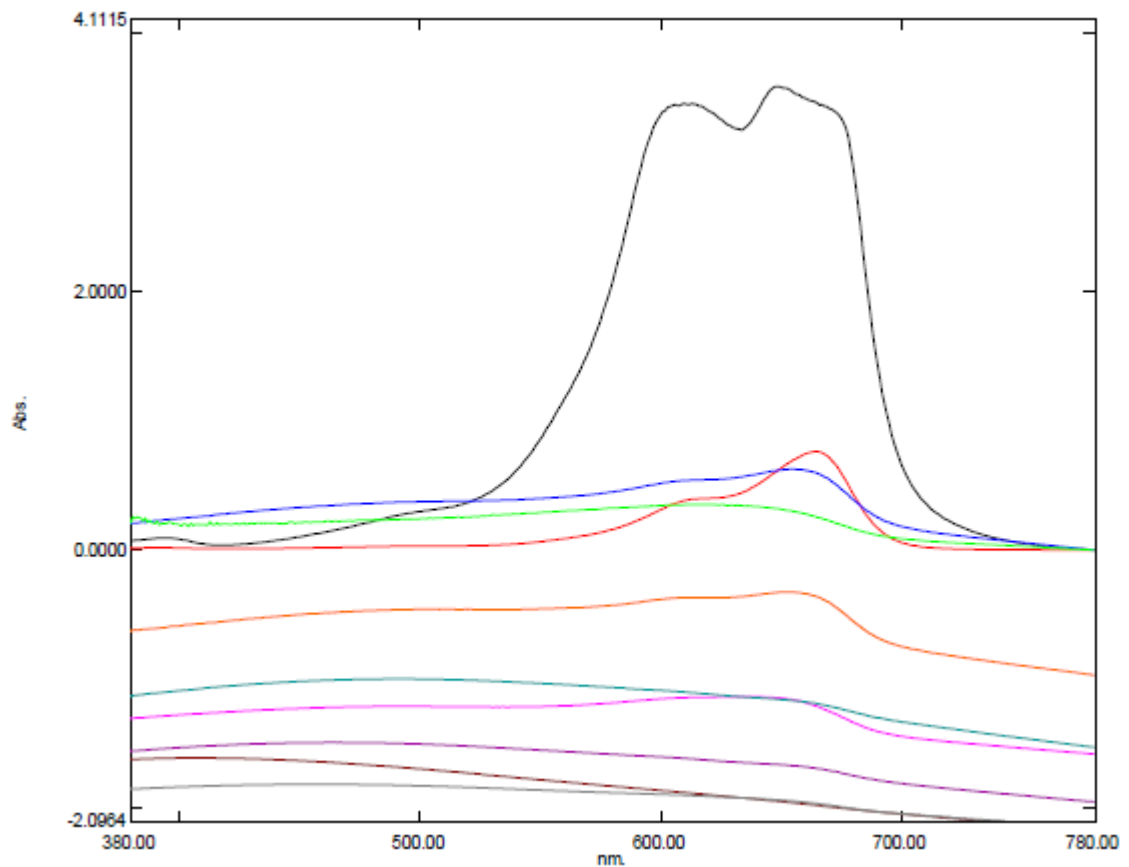


Figura 7. Espectros de absorción UV-Visible durante la degradación fotocatalítica del acetaminofén en presencia de TiO_2 (0,075 g).

Tiempo (min)	Absorbancia ($\lambda = 243 \text{ nm}$)	Concentración (ppm)	% Degradación
0	0.704	12.00	0.0
30	0.524	8.87	26.1
60	0.412	6.78	43.5
90	0.298	4.60	61.7
120	0.191	2.87	76.1

Tabla 14. Resultados experimentales de la degradación fotocatalítica del acetaminofén con TiO_2 (0,075 g)

Los datos de la *Tabla 14* evidencian una disminución progresiva en la concentración del acetaminofén conforme aumentó el tiempo de irradiación UV, confirmando la eficiencia fotocatalítica del TiO_2 (0,075 g) en la remoción del analgésico. A los 30 minutos se registró una degradación del 26,1 %, atribuible a la formación inicial de pares electrón–hueco y a la generación de especies oxidantes activas en la superficie del catalizador. En los 60 minutos, la eliminación aumentó al 43,5 %, alcanzando el punto de máxima pendiente en la cinética, lo cual indica la etapa de oxidación más rápida, donde predominan las reacciones con radicales $\cdot\text{OH}$ y $\text{O}_2\cdot^-$ (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; Madriz et al., 2016).

Posteriormente, entre 90 y 120 minutos, el proceso tendió a estabilizarse, alcanzando un 76,1 % de remoción global, lo que coincide con el comportamiento reportado en la literatura para sistemas TiO_2/UV en medios ácidos moderados (pH 2–4), donde la saturación de sitios activos y la acumulación de subproductos limitan la velocidad de reacción (Barbosa et al., 2016; Harris, 2020). La reducción de la absorbancia en el rango de 600–700 nm observada en los espectros (Figura 11) respalda esta tendencia, sugiriendo la ruptura progresiva de los enlaces cromóforos y la degradación parcial del anillo aromático del acetaminofén (Fernández, Quiroga, & Mansilla, 2021).

En términos ambientales, estos resultados son altamente relevantes, pues demuestran que incluso con una dosis reducida de catalizador (0,075 g) es posible alcanzar una degradación superior al 70 % del acetaminofén en condiciones controladas de laboratorio. Esto valida la viabilidad del proceso fotocatalítico heterogéneo como estrategia complementaria para el tratamiento de aguas contaminadas con fármacos, y constituye una evidencia experimental sólida dentro del marco de la investigación (Kolb, 1984; ICH Q2(R2), 2022).

FASE 4. IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON ESTUDIANTES

Tras la validación del método analítico y la verificación funcional del fotocatalizador, se procedió a la implementación práctica - experimental con los estudiantes de décimo semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, en el espacio de Énfasis Disciplinar II – Tratamiento de Aguas. El propósito de esta fase fue reproducir el proceso de degradación fotocatalítica del acetaminofén bajo condiciones controladas, permitiendo a los participantes desarrollar competencias analíticas, experimentales e interpretativas mediante el diseño, ejecución y análisis de un experimento ambiental de relevancia social (Kolb, 1984; Torres-Salcedo, 2016).

La práctica se estructuró conforme al documento técnico “Informe de Laboratorio – Remoción de Acetaminofén por Fotocatálisis Heterogénea” (anexo 8), el cual describe las etapas, parámetros y condiciones experimentales. En primer lugar, se realizó una inducción teórica en la que se abordaron los fundamentos de la fotocatalisis heterogénea, el papel del TiO_2 como semiconductor activado por luz UV y la problemática ambiental asociada a la presencia de fármacos como el acetaminofén en aguas residuales (Hoffmann et al., 1995; Herrmann, 1999; Vo et al., 2019). Esta contextualización permitió relacionar el conocimiento químico con los desafíos ambientales reales, fortaleciendo la competencia de comprensión del problema científico y su aplicabilidad social (Torres-Salcedo, 2016).

El laboratorio se diseñó bajo un esquema comparativo que permitió evaluar simultáneamente la influencia de dos variables operativas críticas: la masa del catalizador (0.025 g, 0.050 g y 0.075 g de TiO_2) y el tiempo de irradiación (45, 90 y 120 minutos). Para garantizar reproducibilidad, se trabajó con una solución de trabajo de acetaminofén a 10 ppm, preparada a partir de una solución intermedia de 100 ppm en HCl 0.1 M. Cada grupo de trabajo operó un fotocatalizador con volumen de reacción de 100 mL, manteniendo las condiciones homogéneas de iluminación, agitación y temperatura (Herrmann, 1999; Schneider et al., 2014).

Antes de iniciar la irradiación, las suspensiones se mantuvieron en oscuridad durante 15 minutos para alcanzar el equilibrio de adsorción entre el catalizador y el analito, tras lo cual se tomó una muestra inicial (t_0). Posteriormente, se encendió la fuente de radiación UV-A ($\lambda = 247 \text{ nm}$) y se inició el cronometraje del ensayo, con muestreos según los tiempos establecidos por grupo (45, 90 y 120 minutos). Cada alícuota se filtró con papel cuantitativo para remover el TiO_2 antes de la lectura espectrofotométrica en el UV-Vis, empleando la longitud de onda previamente validada ($\lambda_{\text{max}} = 243 \text{ nm}$) (USP <857>, 2021; Harris, 2020).

El diseño experimental incluyó además controles de adsorción en oscuridad y fotólisis sin catalizador, con el fin de discriminar el efecto neto de la fotocatalisis, garantizando la validez metrológica de los resultados (Hoffmann et al., 1995; IUPAC, 2014). Esta metodología permitió a los estudiantes aplicar los conceptos de variable independiente, dependiente y controlada, así como analizar los efectos sinérgicos entre tiempo y concentración de catalizador sobre la eficiencia de remoción. Los datos experimentales fueron registrados en tablas normalizadas, siguiendo los campos de tiempo, absorbancia, concentración inicial y final, y porcentaje de remoción.

Durante la ejecución, se fomentó la autonomía experimental de los estudiantes, quienes asumieron la toma de decisiones asociadas al manejo del fotocatalizador, el control del tiempo, la recolección de muestras y la lectura UV-Vis. La guía docente enfatizó el cumplimiento de las normas de bioseguridad y manejo ambiental, incluyendo el uso de bata, guantes y gafas de protección, así como la gestión responsable de residuos peligrosos generados por el TiO_2 y las soluciones farmacéuticas (APHA, 2017; Minnesota Department of Health, 2025).

El análisis posterior de los resultados permitió discutir la relación entre la masa de catalizador y la eficiencia de degradación, mostrando que mayores dosis de TiO_2 incrementaron la velocidad de remoción hasta un punto de saturación, coherente con la literatura (Barbosa et al., 2016; Schneider et al., 2014). Igualmente, se observó que los tiempos prolongados (120 min) favorecieron la oxidación completa de los cromóforos del acetaminofén, reflejada en la pérdida total de coloración y la disminución de absorbancia en el UV-Vis. Estos hallazgos validaron el modelo Langmuir-Hinshelwood aplicado para estimar la cinética aparente y sirvieron de base para la interpretación comparativa entre grupos (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; Harris, 2020).

Finalmente, la experiencia pedagógica en laboratorio consolidó los objetivos del proyecto al permitir la articulación entre el aprendizaje teórico, la experimentación y la reflexión crítica, promoviendo competencias como la observación rigurosa, el análisis cuantitativo, el trabajo colaborativo y la interpretación de resultados científicos. Desde el enfoque del aprendizaje experiencial, esta fase correspondió a la etapa de “experimentación activa” y “reflexión sobre la acción” del ciclo propuesto por Kolb (1984), integrando la teoría con la práctica en un contexto ambiental y analítico de alta relevancia social.

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL GRUPO DE ESTUDIANTES

Los resultados obtenidos por los grupos experimentales evidenciaron una clara relación directa entre el tiempo de exposición, la masa del catalizador (TiO_2) y el porcentaje de remoción del acetaminofén.

El Grupo 1 y 2, con 0,025 g de TiO_2 durante 45 minutos, alcanzó una remoción del 45,2 %; el Grupo 3 y 4, con 0,050 g y 90 minutos, logró un 65,3 %; mientras que el Grupo 5, 6 y 7, con 0,075 g y 120 minutos, obtuvo un 80,4 % de eliminación del contaminante.

Estos resultados son coherentes con los principios cinéticos del modelo pseudo-primer orden de Langmuir–Hinshelwood, donde la velocidad de degradación aumenta con la concentración del fotocatalizador hasta alcanzar un punto de saturación de los sitios activos (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013; Herrmann, 1999).

Grupo	Acetaminofén	Masa de TiO_2	Tiempo (Min)	Propósito
1 y 2	10 ppm	0,025 g	45	Baja carga, bajo tiempo
3 y 4	10 ppm	0,050 g	90	Efecto de carga con tiempo medio
5,6 y 7	10 ppm	0,075 g	120	Efecto de carga alta, tiempo alto

Concentración	Absorbancia
2	0,281
4	0,522
6	0,837
8	1,137
10	1,332

Tabla 15. Resultados y condiciones tomados del informe de laboratorio elaborado por los grupos de estudiantes (2025). (anexo 5)

El uso de la ecuación de la curva de calibración $y = 0.1359 x + 0.0067$ permitió determinar las concentraciones finales mediante los valores de absorbancia, evidenciando la correcta aplicación del modelo analítico UV–Vis y la comprensión de los estudiantes sobre los fundamentos de la ley de Beer–Lambert, la linealidad

instrumental y la cuantificación espectrofotométrica (Harris, 2020; Skoog, Holler, & Crouch, 2014).

En términos de desempeño experimental, la diferencia porcentual entre las concentraciones iniciales y finales mostró que los estudiantes comprendieron la relación entre las variables masa del catalizador, tiempo de irradiación y eficiencia de remoción, reforzando su capacidad de interpretación de datos experimentales y de análisis comparativo de variables dependientes e independientes

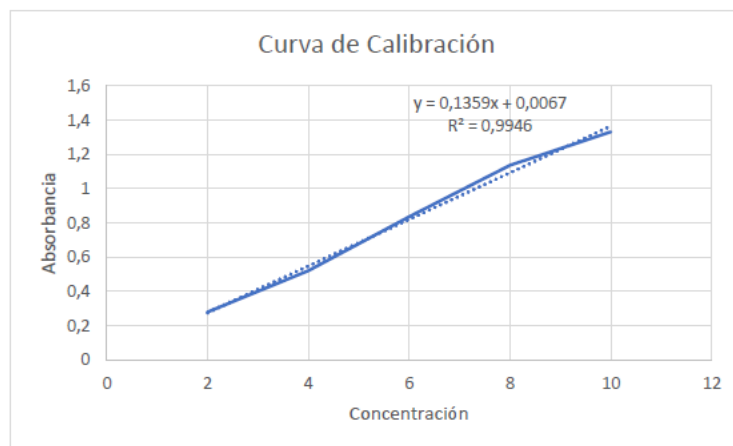


Figura 8. curva de calibración tomados del informe de laboratorio elaborado por los grupos de estudiantes (2025). (anexo 5)

Desde un punto de vista técnico, los estudiantes lograron evidenciar que un incremento en la masa del catalizador no solo aumenta la cantidad de sitios activos disponibles para la generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), sino que también optimiza la absorción de radiación UV, favoreciendo la ruptura de enlaces aromáticos del acetaminofén (Barbosa et al., 2016; Hoffmann et al., 1995). La progresión observada de 45,2 % a 80,4 % entre los tratamientos más cortos y prolongados respalda la hipótesis planteada en la fase de diseño, demostrando la eficiencia del TiO_2 como semiconductor activado por luz UV.

Grupo 1 y 2

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,306	9,560	5,233	45,2%
45	0,718			

Grupo 3 y 4

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,286	9,413	3,261	65,3%
90	0,450			

Grupo 5, 6 y 7

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,427	10,451	2,047	80,4%
120	0,285			

Tabla 16. Datos tomados del informe de laboratorio elaborado por los grupos de estudiantes (2025). (anexo 5)

La diferencia entre los tres tratamientos experimentales refleja un progreso conceptual significativo por parte de los estudiantes, quienes comprendieron la correlación entre la cinética fotoquímica y los parámetros operativos. El razonamiento expresado en su análisis demuestra que lograron interpretar la influencia de la masa catalítica, el tiempo de reacción y la concentración del analito en la eficiencia del proceso. Dicho razonamiento corresponde a una consolidación de las competencias analíticas de interpretación de datos experimentales y razonamiento causal, descritas por Torres-Salcedo (2016) como parte del dominio del pensamiento científico en la enseñanza de la química.

Desde el punto de vista experimental, los estudiantes evidenciaron autonomía en el manejo de instrumentos y en la aplicación de procedimientos volumétricos y espectrofotométricos, fortaleciendo las competencias instrumentales asociadas a la observación cuantitativa y al control de variables (Kolb, 1984; Harris, 2020). El hecho de que hayan validado su curva de calibración y calculado concentraciones mediante la ecuación de la recta indica apropiación de los métodos analíticos de cuantificación, en particular el uso de la ley de Beer–Lambert, reforzando su comprensión del vínculo entre absorbancia y concentración, una de las debilidades detectadas en la prueba diagnóstica inicial.

De acuerdo con los modelos de aprendizaje experiencial de David Kolb (1984) y de competencias analíticas de Javier Torres-Salcedo (2016), la experiencia permitió fortalecer competencias en las siguientes dimensiones:

Dimensión	Competencia fortalecida	Evidencia en los resultados del laboratorio
Ciclo de Kolb	Experimentación activa	Los estudiantes ejecutaron el montaje experimental, manipularon el fotocatalizador, controlaron variables (masa, tiempo, irradiancia) y recolectaron datos de absorbancia.
Ciclo de Kolb	Reflexión sobre la acción	Analizaron las variaciones de concentración y correlacionaron la eficiencia de remoción con las condiciones experimentales, elaborando sus conclusiones.
Competencias de Torres-Salcedo	Competencia metodológica	Diseñaron procedimientos, ajustaron volúmenes, prepararon patrones y aplicaron la ecuación de la recta de calibración de forma correcta.
Competencias de Torres-Salcedo	Competencia interpretativa	Establecieron la relación directa entre masa de TiO_2 , tiempo de exposición y porcentaje de remoción, comprendiendo la cinética de degradación.
Competencias de Torres-Salcedo	Competencia argumentativa	Explicaron la importancia del semiconductor y discutieron los efectos de la concentración y del tiempo con base en fundamentos teóricos y referencias científicas.
Competencias de Torres-Salcedo	Competencia comunicativa	Redactaron el informe técnico con estructura científica: resumen, metodología, análisis de resultados y conclusiones fundamentadas.

Tabla 17. Competencias a partir de Kolb y Torres-Salcedo

El laboratorio permitió que los estudiantes pasaran de un aprendizaje predominantemente conceptual a un aprendizaje basado en la experiencia, la observación y el análisis, logrando comprender la fotocatalisis heterogénea como un proceso interdisciplinar que articula principios de química, fisicoquímica, sostenibilidad ambiental y análisis instrumental. Esta actividad favoreció el fortalecimiento de competencias analíticas clave, tales como la interpretación de datos experimentales, la discriminación de variables críticas, el razonamiento inferencial y la argumentación científica fundamentada, en coherencia con los modelos de Kolb y Torres Salcedo. Con ello, se aportó al propósito formativo de la maestría, orientado a consolidar licenciados capaces de relacionar la ciencia con

problemáticas ambientales reales y de actuar como investigadores críticos en su práctica profesional.

Los resultados obtenidos en la prueba diagnóstica aplicada al inicio del proyecto evidenciaron que los estudiantes se ubicaban mayoritariamente en niveles básicos e intermedios de comprensión analítica, mostrando debilidades en la interpretación de fenómenos fotoquímicos, la argumentación cuantitativa y la formulación de estrategias experimentales. Sin embargo, tras la ejecución del laboratorio de fotocátalisis, se observó un avance significativo en estas dimensiones, reflejado en una mayor capacidad para analizar datos, justificar resultados y proponer ajustes experimentales fundamentados en evidencia, lo que confirma la pertinencia y efectividad de la intervención pedagógica implementada.

Nº	Contenido evaluado	Porcentaje inicial	Evidencia después del laboratorio	Competencia analítica fortalecida	Interpretación
1	Concepto general de fotocátalisis heterogénea	88.9%	Los estudiantes explican el proceso con base en experiencia real.	Literal → Inferencial	Se fortaleció la comprensión funcional.
2	Identificación del catalizador TiO_2	100%	Describen propiedades fisicoquímicas y justifican su uso.	Literal → Inferencial	Mantuvieron dominio y ampliaron profundidad conceptual.
3	Tipo de luz para activar TiO_2	100%	Relacionan irradiancia UV con eficiencia del proceso.	Literal → Inferencial	Pasaron de saber "qué es" a "por qué funciona".
4	Aplicación ambiental de la fotocátalisis	94.4%	Analizan remociones reales y discuten impactos ambientales.	Inferencial → Crítico	Hubo aumento de análisis aplicado y criterio ambiental.
5	Mecanismo radicalario ($\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2\cdot^-$)	100%	Explican mecanismos radicalarios a partir de datos.	Inferencial → Crítico	Lograron integrar teoría y evidencia experimental.

Nº	Contenido evaluado	Porcentaje inicial	Evidencia después del laboratorio	Competencia analítica fortalecida	Interpretación
6	Justificación del uso del TiO ₂	100%	Argumentan eficiencia, estabilidad y propiedades del TiO ₂ .	Inferencial → Crítico	Se fortaleció el razonamiento químico.
7	Limitaciones del TiO ₂	72.2%	Reconocen problemas reales: aglomeración, necesidad UV, tiempos.	Inferencial	Incremento notable de pensamiento crítico.
8	Estrategias para mejorar eficiencia	44.4%	Proponen ajustes experimentales basados en resultados propios.	Literal → Inferencial/Crítico	Fue uno de los mayores avances de la fase 4.
9	VARIABLES que afectan el proceso	38.9%	Identifican variables críticas (irradiancia, agitación, catalizador).	Literal → Inferencial	Mejóro la discriminación experimental de variables.
10	Fotocatálisis y sostenibilidad	88.9%	Relacionan remoción obtenida con reducción de impacto ambiental.	Inferencial → Crítico	Se fortaleció la conciencia ambiental y analítica.

Tabla 18. competencias iniciales y competencias finales

El contraste entre los resultados diagnósticos iniciales y los desempeños observados después del laboratorio evidencia que la intervención pedagógica fundamentada en el aprendizaje experiencial (Kolb, 1984), articulada con la orientación por competencias analíticas (Torres-Salcedo, 2016), permitió que los estudiantes transitaran de un enfoque predominantemente descriptivo hacia uno reflexivo, interpretativo y propositivo. En esta transición, dejaron de limitarse a reconocer conceptos o reproducir procedimientos, para pasar a interpretar los datos

experimentales, justificar los comportamientos observados en términos fisicoquímicos y proponer mejoras fundamentadas en evidencia. Este avance se reflejó en la capacidad para explicar la disminución de absorbancia, discriminar variables críticas del proceso (irradiancia, tiempo, agitación, estabilidad del catalizador) y argumentar con mayor rigor los mecanismos radicalarios implicados en la degradación del acetaminofén.

En síntesis, el análisis de los informes y reportes entregados por los grupos muestra un fortalecimiento integral de las competencias científicas en sus dimensiones metodológica, interpretativa y argumentativa. La experiencia en el laboratorio de fotocatalisis no solo consolidó aprendizajes clave en química analítica y ambiental, sino que también desarrolló pensamiento crítico, manejo de incertidumbre experimental, coherencia en la interpretación de resultados y conciencia sobre la sostenibilidad del recurso hídrico. De este modo, la actividad experimental articuló la fundamentación disciplinar con el compromiso social propio de la profesión docente en ciencias, validando la pertinencia de la intervención y demostrando que la educación científica basada en experiencias contextualizadas favorece la formación de licenciados capaces de comprender, analizar y actuar frente a problemáticas ambientales reales.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente investigación permitió fortalecer de manera significativa las competencias analíticas en los estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, en el marco del curso Énfasis Disciplinar II – Tratamiento de Aguas. A lo largo de las cuatro fases del estudio caracterización diagnóstica, diseño y validación metodológica, ejecución experimental y análisis pedagógico se consolidó un proceso formativo orientado al pensamiento científico reflexivo, en coherencia con el modelo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984) y los niveles de comprensión analítica propuestos por Torres-Salcedo (2016).

El diagnóstico inicial mostró que los estudiantes se encontraban mayoritariamente en el nivel intermedio de desempeño analítico. Aunque poseían dominio conceptual sobre los fundamentos de la fotocatalisis heterogénea, evidenciaron debilidades en la interpretación de resultados, la discriminación de variables experimentales y la argumentación científica. La aplicación del instrumento de caracterización permitió identificar que predominaban las fases de concreción experiencial y experimentación activa, mientras que las fases superiores de reflexión abstracta y conceptualización crítica presentaban un desarrollo limitado.

A partir de la intervención formativa, los resultados obtenidos en los informes de laboratorio y en el análisis de los datos experimentales evidenciaron un avance sostenido hacia niveles más complejos del pensamiento analítico. Los estudiantes mostraron mayor capacidad para analizar tendencias, justificar fenómenos fisicoquímicos, establecer relaciones causales y argumentar a partir de evidencia empírica, representando un tránsito claro hacia la observación reflexiva y la conceptualización abstracta dentro del ciclo experiencial de Kolb. Este progreso también se reflejó en los niveles inferencial y críticos descritos por Torres-Salcedo, particularmente en tareas que exigían evaluar variables, proponer mejoras y explicar mecanismos de degradación.

La práctica experimental sirvió como un escenario auténtico que permitió aplicar, contrastar y profundizar los conocimientos adquiridos, pero su valor formativo radicó principalmente en que actuó como una plataforma para el desarrollo de competencias analíticas, no como un fin en sí misma. Los estudiantes lograron integrar el razonamiento químico, la comprensión ambiental y el análisis

instrumental para construir explicaciones coherentes sobre la remoción del acetaminofén en aguas residuales sintéticas. La observación de variaciones en la absorbancia, el cálculo de porcentajes de remoción y la interpretación del papel del catalizador TiO_2 se convirtieron en oportunidades para fortalecer el pensamiento crítico y la toma de decisiones fundamentadas.

La intervención permitió que los estudiantes asumieran un rol activo como analistas e investigadores en formación, evaluar la eficiencia de los procesos, interpretar datos experimentales, y justificar sus conclusiones con base en teorías fisicoquímicas y criterios de sostenibilidad ambiental. En este sentido, la experiencia de laboratorio se consolidó como un espacio de aprendizaje situado, donde convergieron saberes disciplinares, habilidades metodológicas y reflexión ética sobre el uso responsable del recurso hídrico.

En conclusión, el proyecto logró cumplir su propósito central: contribuir al fortalecimiento de las competencias analíticas mediante una estrategia formativa sustentada en la experiencia, la observación crítica, el análisis de datos y la interpretación científica. La integración entre teoría, práctica y reflexión permitió que los estudiantes desarrollaran un pensamiento investigativo más sólido, pertinente para la formación de licenciados en química comprometidos con la comprensión y abordaje de las problemáticas ambientales contemporáneas.

LIMITANTES

El desarrollo de esta investigación permitió avanzar en el fortalecimiento de las competencias analíticas de los estudiantes; sin embargo, su alcance estuvo condicionado por diversas limitaciones pedagógicas y disciplinares que deben considerarse para interpretar los resultados y proyectar futuros estudios.

Una de las principales limitantes fue el tiempo reducido de implementación, que restringió la posibilidad de desarrollar ciclos formativos más extensos y de profundizar en procesos de reflexión, discusión científica y retroalimentación detallada de los informes de laboratorio. Esto afectó particularmente el tránsito hacia las fases superiores del ciclo de Kolb (reflexión abstracta y conceptualización crítica), que requieren mayor continuidad temporal para consolidarse.

En el plano disciplinar, el estudio se vio limitado por la complejidad intrínseca de los procesos fotocatalíticos, que requieren un control riguroso de factores como intensidad lumínica, área superficial del catalizador, cinética de reacción y presencia de subproductos intermedios. Debido al corto tiempo disponible, no fue posible analizar estas variables de manera sistemática ni realizar replicaciones suficientes para consolidar modelos cuantitativos más robustos.

Finalmente, Las limitantes más relevantes fueron el tiempo reducido de implementación, la imposibilidad de analizar un mayor número de variables, las dificultades iniciales en competencias analíticas de los estudiantes y las restricciones metodológicas del proceso fotocatalítico. A pesar de ello, el estudio logró consolidar avances importantes y delimitar rutas claras para futuras investigaciones y mejoras pedagógicas.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Aus der Beek, T., Weber, F. A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., & Küster, A. (2016). Pharmaceuticals in the environment: Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(4), 823–835.
- Ayoub, S. S., et al. (2021). Paracetamol (acetaminophen): A familiar drug with an unexplained mechanism of action. *Journal of Pain Research*, 14, 3251–3261.
- Barbosa, M. O., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2016). Occurrence and removal of pharmaceutical compounds: A review on the role of photochemical processes. *Water Research*, 94, 257–279.
- Botero-Coy, A. M., et al. (2018). Occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian WWTPs (Bogotá y Medellín). Universidad de Antioquia.
- Brillas, E., et al. (2023). Removal of paracetamol by photocatalysis and related AOPs: A review. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139247.
- Cano, L., & García, J. (2020). Estrategias didácticas en la enseñanza de la química ambiental: un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista Colombiana de Educación en Ciencias*, 22(2), 45–59.
- Carbajo, J. (2013). Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. (Tesis Doctoral). Instituto de Catálisis y Petroleoquímica. Madrid, España.
- Chemat, F., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835.
- Cipriani-Ávila, I., et al. (2023). Occurrence of emerging contaminants in surface water (Ecuador). *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 12873–12890.
- Ebele, A. J., Abdallah, M. A.-E., & Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*, 3(1), 1–16.
- EPA. (2023). National Primary Drinking Water Regulations. Environmental Protection Agency.

European Commission. (2025). Water Framework Directive. Official Journal of the European Union.

Fernández, J., Quiroga, E., & Mansilla, H. D. (2021). *Photocatalytic degradation of methylene blue: A tool for assessing photocatalyst performance in educational and research settings*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105701.

García, C., & Ramírez, A. (2019). Estrategias de enseñanza de la investigación en programas de formación docente. *Revista Colombiana de Educación Científica*, 15(1), 78-93.

García, C., Lozano, S., & Hernández, M. (2018). Contaminantes emergentes en aguas: El caso de los fármacos. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 12(1), 45-60.

García-Muñoz, C., Gutiérrez, R., & Maldonado, M. I. (2021). Degradación de acetaminofén en aguas residuales mediante fotocátalisis con TiO₂: Revisión de avances recientes. *Journal of Environmental Chemistry*, 14(2), 91-104.

Giraldo-Aguirre, C., & Bernal, J. (2022). Aplicación de fotocátalisis heterogénea para la remoción de contaminantes emergentes: un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ingeniería Química*, 19(3), 85-98.

Giraldo-Aguirre, C., & Bernal, J. (2022). Aplicación de fotocátalisis heterogénea para la remoción de contaminantes emergentes: un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ingeniería Química*, 19(3), 85-98.

Gómez, M. y M. Alzate. 2009. Enseñanza y didáctica universitaria. Bogotá: ECOE.

Gómez-Pacheco, L., Torres-Palma, R., & Pino, R. (2020). Procesos avanzados de oxidación para la remoción de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales: Un análisis comparativo. *Ciencia & Tecnología del Agua*, 12(5), 173-189.

González, A., Martínez, L., & Silva, J. (2016). Fármacos en aguas residuales: Un desafío para la salud y el medio ambiente. *Química Nova*, 39(4), 97-109.

González, D., López, M., & Rodríguez, S. (2020). Metodologías activas para el desarrollo de competencias investigativas en estudiantes de educación superior. *Educación y Ciencia*, 18(2), 115-128.

González, D., López, M., & Rodríguez, S. (2020). Metodologías activas para el desarrollo de competencias investigativas en estudiantes de educación superior. *Educación y Ciencia*, 18(2), 115-128.

Guarín, C.Y., Mera, A.C. (2011). FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TIO₂ PARA EL TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS CON PRESENCIA DEL INDICADOR VERDE DE BROMOCRESOL. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10 (19), 79-88.

Harris, D. C. (2020). *Quantitative Chemical Analysis* (10th ed.). W. H. Freeman.

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2018). Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill Education.

Herrmann, J.-M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, 53(1), 115–129.

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96.

Ibhadon, A. O., & Fitzpatrick, P. (2013). Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications. *Catalysts*, 3(1), 189–218.

ICH Q2(R2). (2022). *Validation of Analytical Procedures*. International Council for Harmonisation.

IUPAC. (2014). Beer–Lambert law (Gold Book). International Union of Pure and Applied Chemistry.

Izquierdo, M.F. (2016). Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía *Bol. Grupo Español Carbón*. 41. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP- CSIC)

Jain, A., Singh, S., & Dubey, N. (2021). UV spectrophotometric determination of paracetamol in bulk and tablet formulation. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 68(2), 57–61.

Jiménez, H., Molina, C., & Vallejo, J. (2020). Educación e investigación interdisciplinaria: Hacia el desarrollo de competencias científicas en estudiantes universitarios. *Revista Latinoamericana de Educación Científica*, 18(1), 132-147.

Kolb, D. A. (1984). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Prentice-Hall.

Kolb, D. A. (2015). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development* (2nd ed.). Pearson Education.

- Lee, W. M. (2017). Acetaminophen (APAP) hepatotoxicity—Isn't it time for APAP to go away? *Journal of Hepatology*, 67(6), 1324–1331.
- López, S. F., Cárdenas, D. L., & Méndez, J. A. (2019). Determinación espectrofotométrica de acetaminofén por método directo UV. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 48(1), 23–31.
- Madriz, R., Parra, C., Vargas, R., Scharifker, B., Núñez, P., & Carvajal, C. (2016). Síntesis y caracterización de TiO_2 nanométrico y su aplicación en fotocátalisis heterogénea. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 17(2), 61–70.
- Madriz, R., Parra, C., Vargas, R., Scharifker, B., Núñez, P., & Carvajal, C. (2016). *Síntesis y caracterización de TiO_2 nanométrico y su aplicación en fotocátalisis heterogénea*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 17(2), 61–70.
- MADS. (2021). Resolución 699 de 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mansilla, H. D. (2018). Evaluación fotocatalítica del azul de metileno como compuesto modelo. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 5(1), 23–31.
- Martínez, L., & Pérez, N. (2019). Fotocatálisis heterogénea en la eliminación de acetaminofén en aguas residuales: Un estudio experimental. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 23(4), 205-213.
- Mason, T. J., & Lorimer, J. P. (2002). *Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*. Wiley-VCH.
- MEN. (2024). *Lineamientos para la formación en competencias del siglo XXI*. Ministerio de Educación Nacional.
- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2018). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry* (7th ed.). Pearson Education.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y suelos. *Diario Oficial*, 49.181.
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2016). *Política Nacional de Educación para la Investigación*. MEN.
- Minnesota Department of Health. (2025). *Comparison of state water guidance and federal drinking water standards*.

- OECD. (2016). OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2016. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2024). Pharmaceutical residues in freshwater: Hazards and policy responses.
- OMS. (2023). Lista de medicamentos esenciales de la OMS.
- Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura, O. (2020). Educación, productividad y competitividad en Iberoamérica. *PODIUM*, 3(8), 1-46. <https://oei.int/publicaciones/revista-podium-numero-8>
- Peralta-Hernández, J. M., et al. (2023). A critical review over the removal of paracetamol. *Chemosphere*, 311, 136994.
- Rodríguez, M., & López, P. (2019). La fotocatalisis en el tratamiento de aguas residuales: Avances y desafíos. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 15(2), 102-110.
- Rodríguez-Mozaz, S., Rico, A., & Barceló, D. (2020). Fármacos en aguas superficiales: Riesgos ecológicos y desafíos regulatorios. *Environmental International*, 143, 105-144.
- Ruiz, J., & Fernández, E. (2018). Cultura de investigación en estudiantes de secundaria: Una perspectiva latinoamericana. *Revista Iberoamericana de Educación*, 74(1), 95-112.
- Salazar, N., & Medina, R. (2021). La investigación como estrategia pedagógica en la enseñanza de las ciencias naturales. *Investigación Educativa*, 27(3), 56-70.
- Sampieri, R. H., Fernández, C. F., & Baptista, P. (2018). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw Hill.
- Sánchez, L., & López, F. (2023). Impacto de los recursos digitales en la formación investigativa de docentes y estudiantes en Colombia. *Revista Colombiana de Tecnología Educativa*, 12(4), 30-49.
- Sánchez, L., & López, F. (2024). Estrategias para el desarrollo de competencias analíticas en la educación superior en Colombia. *Revista Colombiana de Educación Superior*, 15(1), 35-50.
- Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. W. (2014). Understanding TiO₂ photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 114(19), 9919–9986.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principles of Instrumental Analysis* (6th ed.). Cengage Learning.

Souza, M. L., Rodrigues, R. M., Silva, D. G., & Santos, J. A. (2019). Toxicological effects of paracetamol exposure on aquatic organisms: histopathological and biochemical approaches. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 79–87.

Suárez, L., Muñoz, G., & Pérez, R. (2018). Degradación de acetaminofén mediante fotocátalisis con TiO₂ en aguas residuales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 12(3), 123-135.

Suárez, L., Muñoz, G., & Pérez, R. (2023). Formación investigativa en ciencias ambientales: Un enfoque multidisciplinario para la resolución de problemas ambientales complejos. *Educación y Ciencias*, 25(2), 103-117.

Suárez, M., Quiroga, E., & Ledezma, A. (2019). Fotocatálisis heterogénea en el aula: diseño y aplicación de reactores experimentales didácticos. *Educación Química*, 30(4), 124–132.

Tiedeken, E. J., Tahar, A., McHugh, B., & Rowan, N. J. (2017). Monitoring, sources, receptors, and control measures for three European Union watch list substances of emerging concern in receiving waters. *Science of the Total Environment*, 574, 1140–1163

Torres Salcedo, J. (2010). El desarrollo del pensamiento analítico en la educación superior: niveles de comprensión y estrategias de evaluación. Universidad Pedagógica Nacional.

Torres Salcedo, J. (2019). Desarrollo de competencias investigativas en estudiantes de educación superior en Colombia: un enfoque hacia el análisis crítico. *Revista Colombiana de Educación Superior*, 10(3), 143-157.

Torres-Salcedo, J. (2016). Competencias científicas y analíticas en la enseñanza de la química: fundamentos pedagógicos y evaluación. Universidad Pedagógica Nacional.

United States Pharmacopeia (USP). (2021). <857> Ultraviolet-Visible Spectroscopy; <1051> Pharmaceutical Dosage Forms; <1225> Validation of Compendial Procedures. USP Convention.

United States Pharmacopeia (USP). (2021). <857> *Ultraviolet–Visible Spectroscopy*. USP Convention.

Vo, H. N. P., et al. (2019). Acetaminophen micropollutant: Occurrence and removal. *Chemosphere*, 236, 124391.

Vo, H. N. P., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, T. M. H., Li, J., Liu, Y., & Nguyen, D. D. (2019). Acetaminophen micropollutant: Historical and current occurrences, and removal by biological systems: A review. *Chemosphere*, 236, 124391.

Zhou, H., et al. (2016). Occurrence and risk of pharmaceuticals in rivers. *Scientific Reports*, 6, 34928.

ANEXOS 1

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA**

FORTALECIMIENTO DE LAS COMPETENCIAS ANALÍTICAS: REMOCIÓN DE ANALGÉSICOS EN AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

***Realizado por: Alfonso Rafael Alean Garrido
Directora: Dora Luz Gómez Aguilar***

RÚBRICA DE VALIDACIÓN DE LA PRUEBA DIAGNÓSTICA

La presente rubrica de validación se realiza con la finalidad de evaluar por un par académico, los instrumentos de recolección de información en aras de dar cuenta de los principales planteamientos de la investigación en curso, resaltados a continuación:

Pregunta de investigación

¿Cómo fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes del programa de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional utilizando la fotocatálisis heterogénea para la remoción de analgésicos en aguas residuales?

Objetivo general

Fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional mediante la implementación de la fotocatálisis heterogénea para la remoción de analgésicos en aguas residuales

Objetivos específicos

- I. Caracterizar las competencias analíticas en los estudiantes aplicando los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo.
- II. Determinar el porcentaje de remoción de los analgésicos (acetaminofén e ibuprofeno) por medio de la fotocatálisis heterogénea en aguas residuales.

- III. Evaluar la implementación de la estrategia aplicada en el fortalecimiento de las competencias analíticas por medio del aprendizaje basado en proyectos

SOBRE LAS COMPETENCIAS:

Las competencias analíticas constituyen un conjunto de capacidades cognitivas que permiten al estudiante comprender, interpretar, relacionar, evaluar y transformar información para construir explicaciones fundamentadas y tomar decisiones científicas pertinentes. Estas competencias son esenciales en la formación de profesionales en ciencias, dado que posibilitan la interpretación de datos experimentales, el análisis de variables, la argumentación basada en evidencia y la comprensión de fenómenos desde una perspectiva interdisciplinaria (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Desde el enfoque del aprendizaje experiencial, David Kolb (1984) plantea que el desarrollo de competencias analíticas se da mediante un ciclo dinámico compuesto por cuatro fases: experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa. En este marco, las competencias analíticas emergen cuando el estudiante:

Reconoce y describe conceptos básicos a partir de la experiencia directa (experiencia concreta).

Interpreta la información y analiza relaciones entre variables (observación reflexiva).

Construye explicaciones y modelos conceptuales, integrando teoría y evidencia (conceptualización abstracta).

Aplica el conocimiento para resolver problemas, diseñar procedimientos o proponer mejoras (experimentación activa) (Kolb & Kolb, 2017).

Desde esta perspectiva, el análisis se entiende como un proceso progresivo mediante el cual el estudiante transforma la experiencia en conocimiento estructurado, integrando razonamiento, reflexión y acción.

Por su parte, Javier Torres Salcedo (2010) propone un modelo de comprensión que divide las competencias analíticas en tres niveles progresivos, los cuales describen el modo en que el estudiante procesa la información científica:

Nivel literal, donde identifica información explícita, reconoce conceptos y comprende definiciones básicas.

Nivel inferencial, donde el estudiante interpreta, explica causas, relaciona variables, deduce comportamientos y comprende significados implícitos en los datos.

Nivel crítico, nivel superior donde evalúa información, argumenta con sustento teórico, contrasta explicaciones, formula hipótesis y propone alternativas fundamentadas.

En conjunto, los modelos de Kolb (1984) y Torres Salcedo (2010) permiten comprender las competencias analíticas como un proceso continuo de complejización cognitiva, en el que el estudiante pasa de la identificación de conceptos a la interpretación profunda y, finalmente, al juicio crítico y la acción fundamentada. Esta articulación teórica es fundamental en procesos de validación de instrumentos, dado que ofrece criterios claros para determinar el nivel inicial de los estudiantes, su progreso y la pertinencia de las estrategias implementadas para fortalecer dichas competencias.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Criterio	Descripción	Escala de valoración (1 - 5)
1. Validez de contenido	¿Las preguntas abarcan los conceptos fundamentales del tema?	
2. Coherencia con el modelo de Kolb	¿Las preguntas evidencian las etapas del aprendizaje experiencial?	
3. Enfoque analítico según Torres Salcedo	¿Se favorece el análisis, inferencia y pensamiento crítico?	
4. Claridad en la redacción	¿Las preguntas están redactadas con precisión y sin ambigüedades?	

5. Pertinencia del formato	¿El formato permite evaluar adecuadamente las competencias buscadas?	
6. Equilibrio del nivel de dificultad	¿Hay preguntas fáciles, medias y complejas?	
7. Aplicabilidad en contexto educativo	¿La prueba se adapta al nivel académico del grupo objetivo?	
8. Utilidad diagnóstica	¿Permite tomar decisiones pedagógicas a partir de los resultados?	

OBSERVACIONES GENERALES DEL EVALUADOR

Nombre:

Firma:

BIBLIOGRAFIA

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill.

Kolb, D. A. (1984). Experiential learning: Experience as the source of learning and development. Prentice Hall.

Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2017). Experiential learning theory as a guide for experiential educators in higher education. ELThe Journal, 1(1), 7–44.

Torres Salcedo, J. (2010). La comprensión lectora: Niveles de lectura y estrategias para su desarrollo. Editorial Magisterio.

ANEXO 2

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LA QUÍMICA

**FORTALECIMIENTO DE LAS COMPETENCIAS ANALÍTICAS: REMOCIÓN DE ANALGÉSICOS
EN AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.**

*Realizado por: Alfonso Rafael Alean Garrido
Directora: Dora Luz Gómez Aguilar*

RÚBRICA DE VALIDACIÓN DE LA PRUEBA DIAGNÓSTICA

La presente rubrica de validación se realiza con la finalidad de evaluar por un par académico, los instrumentos de recolección de información en aras de dar cuenta de los principales planteamientos de la investigación en curso, resaltados a continuación:

Pregunta de investigación

¿Cómo fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes del programa de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional utilizando la fotocatalisis heterogénea para la remoción de analgésicos en aguas residuales?

Objetivo general

Fortalecer las competencias analíticas en un grupo de estudiantes de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional mediante la implementación de la fotocatalisis heterogénea para la remoción de analgésicos en aguas residuales

Objetivos específicos

- I. Caracterizar las competencias analíticas en los estudiantes aplicando los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo.
- II. Determinar el porcentaje de remoción de los analgésicos (acetaminofén e ibuprofeno) por medio de la fotocatalisis heterogénea en aguas residuales.
- III. Evaluar la implementación de la estrategia aplicada en el fortalecimiento de las competencias analíticas por medio del aprendizaje basado en proyectos

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Criterio	Descripción	Escala de valoración (1 - 5)
----------	-------------	------------------------------

1. Validez de contenido	¿Las preguntas abarcan los conceptos fundamentales del tema?	<p>En la prueba se pueden evidenciar los conceptos básicos y fundamentales que conforman la fotosíntesis, ya que sus preguntas contienen información de la definición, el funcionamiento, los tipos de catalizadores, las aplicaciones, su sostenibilidad, entre otros.</p> <p>Valoración: 5</p>
2. Coherencia con el modelo de Kolb	¿Las preguntas evidencian las etapas del aprendizaje experiencial?	<p>Se puede evidenciar una estructuración de las preguntas por categorías bien definidas, las cuales dan cuenta del modelo de Kolb, estas tienen diferentes niveles de comprensión en los procesos de asimilación, aplicación y análisis de la fotosíntesis.</p> <p>Valoración: 5</p>
3. Enfoque analítico según Torres Salcedo	¿Se favorece el análisis, inferencia y pensamiento crítico?	<p>Los conceptos de la fotocatalisis se pueden comprender y aplicar a partir de las preguntas propuestas en contextos reales, esto permite que los estudiantes reflexionen acerca de sus beneficios y posibles limitaciones en pro de la sostenibilidad.</p> <p>Un punto por mejorar podría ser la inclusión de preguntas abiertas, ya que estas permiten evidenciar la opinión real de las personas con información mucho más detallada, desarrollando aún más procesos de</p>

		argumentación y pensamiento crítico. Valoración: 4
4. Claridad en la redacción	¿Las preguntas están redactadas con precisión y sin ambigüedades?	Se evidencia que las preguntas que conforman la prueba se encuentran claras, concisas y precisas, con buena redacción y sin ambigüedades, lo que genera que el lector no llegue a tener interpretaciones inexactas. Valoración: 5
5. Pertinencia del formato	¿El formato permite evaluar adecuadamente las competencias buscadas?	El formato evidencia claramente una consistencia y secuencia que dan cuenta a los modelos de Kolby Torres Salcedo, es decir, que están alineados con las competencias buscadas en la presente investigación. Sin embargo, se podría llegar a incluir una mayor cantidad de casos prácticos y contextualizados, los cuales pueden ser la base para una mayor comprensión de la temática. Valoración: 4
6. Equilibrio del nivel de dificultad	¿Hay preguntas fáciles, medias y complejas?	Se identifica que la prueba contiene preguntas de diferentes niveles de complejidad, esto se puede ver evidenciado en su rúbrica de evaluación. Valoración: 5

7. Aplicabilidad en contexto educativo	¿La prueba se adapta al nivel académico del grupo objetivo?	La prueba diagnóstica para ser aplicada en los últimos semestres de la licenciatura en química, es completamente acorde con el nivel académico y conceptual, ya que en este punto se han trabajado y orientado los conocimientos básicos y necesarios para su óptima resolución. Valoración: 5
8. Utilidad diagnóstica	¿Permite tomar decisiones pedagógicas a partir de los resultados?	Sí, ya que se pueden tomar decisiones a partir de su rúbrica de evaluación, esta aporta una clasificación bien estructurada de las competencias buscadas y de las cuales se puede llegar a realizar ajustes en las diversas estrategias pedagógicas para la óptima comprensión de la temática. Valoración: 5

OBSERVACIONES GENERALES DEL EVALUADOR

Nombre:

Adriana Carolina Olarte Saavedra

Licenciada en Química – Magister en docencia de la química

Firma:



ANEXO 3

REMOCIÓN DE ACETAMINOFÉN POR FOTOCATÁLISIS HETEROGENEA

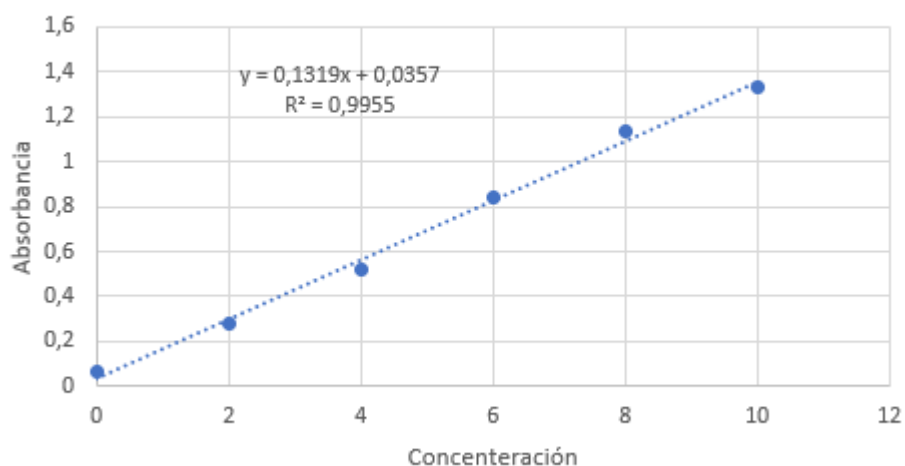
1. Construcción curva de calibración

Tabla 1 curva de calibración

Concentración (ppm)	Absorbancia (200.2 nm)
Blanco	0.062
2	0.281
4	0.522
6	0.837
8	1.137
10	1.332

Nota: Elaboración propia

Curva de calibración acetaminofén



Así, los patrones preparados para la curva de calibración tienen a seguir una secuencia y a reportar un buen coeficiente de correlación correspondiente a 0.9955, además que, según la ley de Lambert-beer las absorbancias se encuentran dentro de los estándares admitidos; por lo que, su tratamiento posterior será posible. (García Martínez, 2012)

2. Se degradaron 4 muestras objetivo con la variación de diferentes parámetros como: Concentración, tiempo, agitación y masa de TiO_2 , como se observa en la tabla 2
Tabla 2 parámetros de muestras

Muestra	Masa TiO ₂	Tiempo	Agitación	Abs. Inicial	Abs. Final
1	0.025g	45 min	Si	1.306	0.718
2	0.05g	90 min	Si	1.286	0.450
3	0.075g	120 min	Si	1.427	0.285
4	0.025g	45 min	No	1.361	1.021

Nota: Elaboración propia

Para calcular el porcentaje de remoción primero será necesario calcular la concentración a través de las absorbancias, así como la ley de Lambert-beer indica:

$$Y = mx + b$$

Donde:

Y= Absorbancia

m= 0.1319

x =Concentración

b=0.0357

Entonces para calcular la absorbancia inicial de la muestra 1 es necesario:

$$x = \frac{y - b}{m}$$

$$x = \frac{1.306 - 0.0357}{0.1319} = 9.63ppm$$

La absorbancia final se calcula de la misma manera, entonces=

$$x = \frac{0.718 - 0.0357}{0.1319} = 5.17ppm$$

De modo que, para las concentraciones iniciales y finales de la muestra se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 3 Concentraciones del analito

Muestra	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)
1	9.63	5.17
2	9.47	3.14

3	10.54	1.89
4	10.04	7.47

Nota: Elaboración propia

Conociendo la concentración inicial y final a simple vista podemos observar que efectivamente si degradó; sin embargo, se debe calcular el porcentaje de remoción con la siguiente formula:

$$\%remoción = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

Entonces para las pruebas su porcentaje de remoción fue:

Prueba 1

$$\%remoción = \frac{9.63 - 5.17}{9.63} * 100 = 46.28$$

Prueba 2

$$\%remoción = \frac{9.47 - 3.14}{9.47} * 100 = 66.86$$

Prueba 3

$$\%remoción = \frac{10.54 - 1.89}{10.54} * 100 = 82.08$$

Prueba 4

$$\%remoción = \frac{10.04 - 7.47}{10.04} * 100 = 25.65$$

Como se observó en la tabla 2 las concentraciones, tiempos la agitación de las muestras varió en cada una de ellas, por lo que, resulta posible inferir que dependiendo de la concentración del TiO₂ la degradación será mayor o menor, a pesar de que no se realizó un análisis cinético con respecto al tiempo tomado en intervalos, si se consideró el análisis final y se observó que a mayores concentraciones de TiO₂ mayor será el porcentaje de degradación, pues la muestra 1 que solo tenía 0.025g de TiO₂ degradó un 46.28%, mientras que la muestra 3 que contenía 0.075g de TiO₂ degradó 82.08%, entonces si aumentamos la concentración de TiO₂, este cambio será directamente proporcional al porcentaje de degradación, pues como lo menciona

Garcés Giraldo y Hernández Ángel (2006) las concentraciones más altas de TiO_2 supondrán una mejor mineralización del analito, aún en ausencia de otros oxidantes como el peróxido.

Otro parámetro relevante a la hora de la degradación del acetaminofén fue la agitación constante del medio, pues así como la muestra 1 y 4 lo evidencian, el porcentaje de degradación fue superior al agitar, de modo que, sin modificar ningún otro parámetro y agregando exactamente la misma masa de TiO_2 se encontró que el porcentaje de degradación para el medio agitado fue 46.28%, mientras que para el que no se agitó fue de 25.65, una disminución de más del 20% haciendo mucho más clara la idea de que la agitación frecuente permite degradar el analito con una mayor eficiencia comparado con una muestra sin agitación.

3. Conclusiones

- 3.1 Aumentando la concentración del TiO_2 obtendremos mejores porcentajes de degradación, por lo que, resulta eficaz agregar 0.075g o más; sin embargo deben realizarse los análisis pertinentes al agregarlo en las concentraciones.
- 3.2 El tiempo de exposición del analito en la cámara UV aparentemente al ser mayor, habrá un porcentaje de degradación; aunque, sin un estudio más profundo sobre este parámetro no será posible dar una conclusión significativa. Se sugiere modificar únicamente el tiempo de exposición para determinar que tanta inferencia tiene este en el porcentaje de degradación final.
- 3.3 La agitación del medio resultó ser un parámetro fundamental a la hora de la ejecución del experimento, entonces se considera que el medio debe mantenerse en constante agitación

REFERENCIAS:

- Garcia Martinez, G. M. E. (2012, 29 junio). Aplicación de la ley de Lambert-Beer en espectroscopía UV-visible. *Repositorio Institucional UPV*.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/16360>
- Garcés Giraldo, L., & Hernández Ángel, M. (2006). Comparación de los tratamientos con TiO_2 y FeCl_3 para aguas residuales coloreadas textiles. *Repositorio Unisallista*. Recuperado 2 de noviembre de 2025, de <https://repository.unilasallista.edu.co/items/4d06d89b-4685-425c-86d7-206742ac83c1>

ANEXO 4

PRÁCTICA DE LABORATORIO – REMOCIÓN DE ACETAMINOFÉN POR FOTOCÁTALISIS HETEROGÉNEA

Resumen

Esta práctica de laboratorio busca evaluar la eficiencia de la remoción fotocatalítica del acetaminofén en solución acuosa utilizando dióxido de titanio (TiO₂) bajo irradiación UV-Vis. Se pretende determinar cuantitativamente como el tiempo de exposición y la concentración del catalizador modulan la degradación del contaminante, seleccionando las condiciones óptimas del proceso.

Palabras clave: Remoción fotocatalítica, Radiación UV-Vis, acetaminofén.

Abstract

This laboratory practice aims to evaluate the efficiency of photocatalytic removal of acetaminophen in aqueous solution using titanium dioxide (TiO₂) under UV-Vis irradiation. The objective is to quantitatively determine how exposure time and catalyst concentration modulate contaminant degradation, selecting optimal process conditions.

Keywords: Photocatalytic removal, UV-Vis radiation, acetaminophen.

Introducción

El acetaminofén (C₆H₉NO₂) es uno de los analgésicos más usados globalmente y un contaminante emergente frecuente en aguas residuales hospitalarias y urbanas.

- En Portugal: 4.26-7.79 µg/L en afluentes de PTAR.
- En Colombia: Detección del 100% en aguas residuales hospitalarias.
- En Sudáfrica: durante la pandemia, hasta 480 µg/L en afluentes.

Su persistencia y posibles transformaciones químicas en NAPQI o 1,4-benzoquinona, implican riesgos eco toxicológicos y sanitarios, especialmente por sus efectos crónicos en organismos acuáticos. Por ello la eliminación mediante fotocátalisis TiO₂/UV se plantea como alternativa verde frente a procesos tradicionales.

Objetivos

- Evaluar la remoción foto catalítica de acetaminofén en solución acuosa utilizando TiO₂ bajo irradiación UV-Vis

- Evaluar de forma cuantitativa como el tiempo y la concentración de TiO₂ modulan la eficiencia de reacción, comparando porcentaje de degradación y tasa inicial para seleccionar las condiciones óptimas de proceso.

Marco teórico

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada basado en la activación de un semiconductor (TiO₂) por radiación, generando pares electrón-hueco (e⁻/h⁺) que inducen reacciones redox en la interfaz sólido-líquido.

- ✓ Los huecos oxidan agua o grupos hidroxilo para formar radical hidroxilo.
- ✓ Los electrones reducen el oxígeno generando radicales superóxido (O₂⁻).

Ambas especies reactivas del oxígeno (ROS) degradan contaminantes orgánicos hasta CO₂ y H₂O aplicación directa de la fotocatalisis heterogénea como tecnología de oxidación avanzada para eliminar contaminantes farmacéuticos.

El fotocatalizador fue fabricado de manera artesanal por el docente responsable, calibrado con la degradación de azul de metileno para comprobar el porcentaje de degradación y calibrado previo con su encendido 10 min antes de la práctica, uso de elementos de protección como gafas para reducir los rayos UV, garantizando las condiciones adecuadas de uso.

En aguas residuales con micro contaminantes como fármacos, colorantes y pesticidas, el TiO₂ se destaca por su estabilidad, bajo costo y baja toxicidad, siendo ampliamente utilizado en tratamiento de aguas contaminadas.

Metodología

-Preparación de solución Stock

- ☆ HCl 0.1 m (4.14 de HCl puro a 500 mL)
- ☆ Acetaminofen 500ppm (0.025 g en 50 mL)

-Fase de adsorción en oscuridad (15 min)

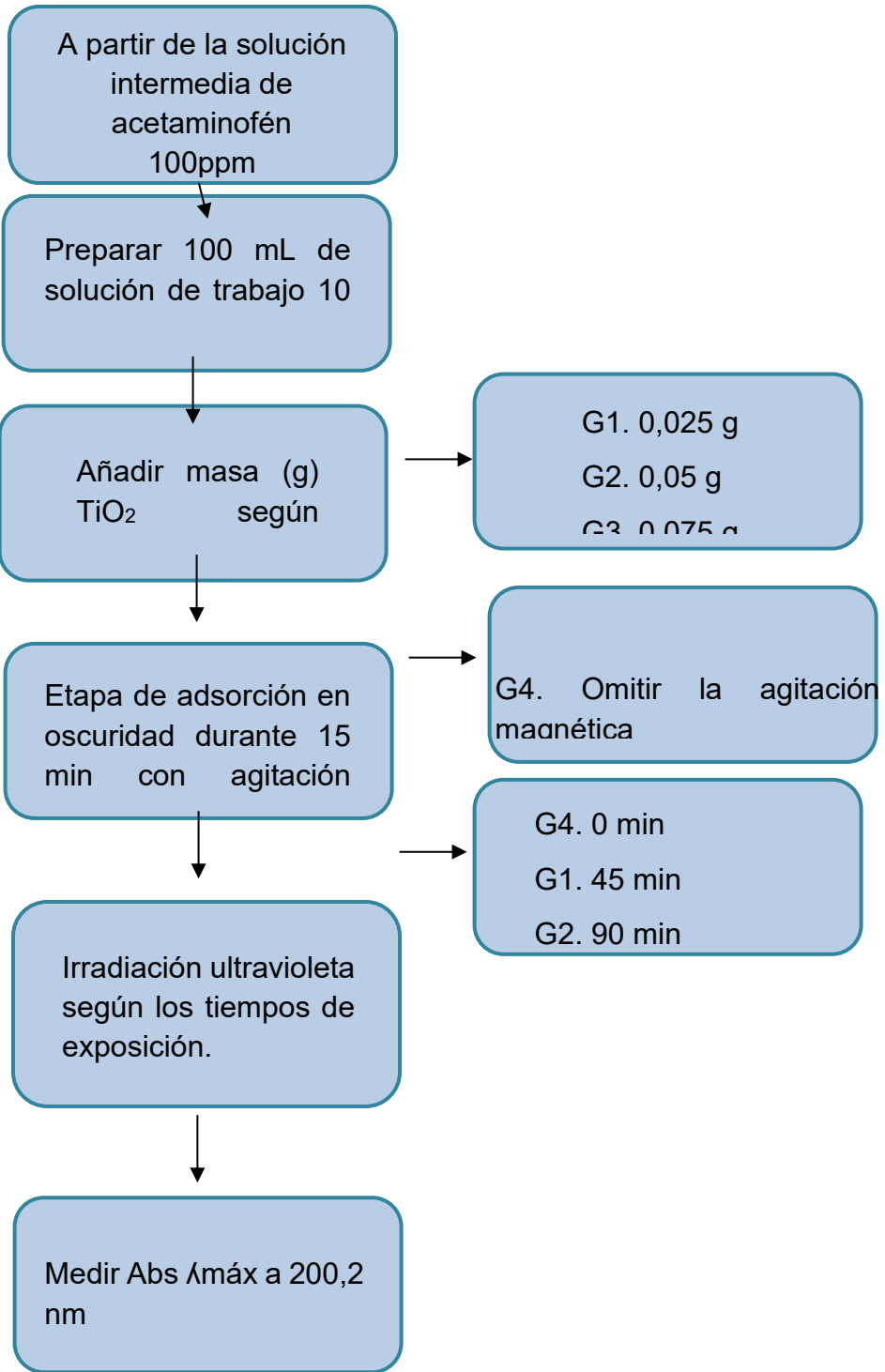
-Exposición a radiación UV con TiO₂ Toma de muestras agitadas en intervalos definidos por grupo

-Medición de absorbancia (UV-Vis) a λ_{máx} y cálculo de concentración mediante la curva de calibración.

-% de remoción calculado con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = (C_0 - C_f / C_0) * 100$$

Diagrama de procedimiento realizado por los grupos



Resultados

Preparación de curva de calibración, a partir de la solución intermedia de acetaminofén 100ppm.

Concentración deseada	Vol Sin Intermedia
2 ppm	2 mL
4 ppm	4 mL
6 ppm	6 mL
8 ppm	8 mL
10 ppm	10 mL

Tabla 1. Preparación curva de calibración

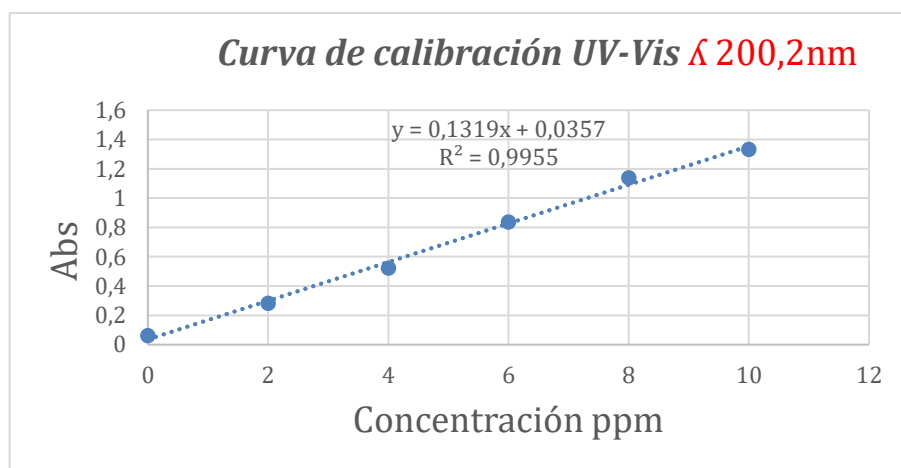
Todas las soluciones se aforan a 100mL con HCl 0,1M

Preparación de estándares

ppm	Abs
2	0,281
4	0,522
6	0,837
8	1,137
10	1,332

Tabla 2.

Preparación de estándares



Gráfica 1. Curva de calibración

Registro de datos experimentales

Grupo	Tiempo (min)	A (λMáx nm)	Ci (ppm)	Cf (ppm)	% Remoción
G4. Sin agitar	45	200,2	10	7,5	25,1
G1.	45	200,2	9,6	5,2	45,9
G2.	90	200,2	9,4	3,1	66,6
G3.	120	200,2	10,5	1,9	81,9

Tabla 3. Registro de datos experimentales

Discusión de resultados

- A partir de la ecuación de recta de la curva de calibración se realiza la corrección de la concentración inicial y se calcula la concentración final para calcular el % de Remoción mediante la Ecuación (1).
- Se observa variación en la concentración final de acetaminofén y el % de Remoción entre las cuatro muestras.

Observaciones
G4. Sin agitar. Tiene la Cf más alta, por ende su % de Remoción fue el más bajo.
G1. Tiene la mitad de la Ci y su % de Remoción fue menor de 50%.
G2. La Ci en este caso dio por debajo de lo esperado, por lo que el % de remoción fue de 66,6%.
G3. A pesar de estar 0,5ppm de Ci por encima de lo establecido , su Cf fue el más bajo y su % de Remoción fue casi del 82%.

Tabla 4. Observaciones discusión de resultados

- A nivel general se observa que a mayor tiempo de exposición a luz UV en el fotocalizador, hay eliminación del medicamento por lo que el % de Remoción es mayor.

Conclusiones

- ✓ Al comparar el tiempo (45 min) la muestra del Grupo 4, la cual no fue agitada con agitador magnético tuvo una **Cf** de acetaminofén más alta que la que si se agito al mismo tiempo de exposición de UV.

- ✓ Existe una relación inversamente proporcional; a menor **Cf**, el % de Remoción del medicamento es mayor.
- ✓ El sistema de degradación es muy eficiente cuando el tiempo de exposición de luz UV en el fotocatalizador es de 2 horas y con agitación magnética.
- ✓ La curva de calibración fue óptima para el cálculo de las concentraciones del analito, sin embargo, los errores en la **Ci** se puede deber a el analista, pero no afectan la tendencia general del proceso.
- ✓ Según la bibliografía en la guía la longitud de $\lambda_{\text{máx}}$ de la muestra es de 247nm, sin embargo, al hacerle el barrido al espectro dese 350 hasta 190 nm se demuestra que esta desplazada a 200,2 nm, donde se le atribuye a que el patrón de acetaminofén no es certificado grado USP.

Nota: Toda la información fue tomada de la guía de la práctica de laboratorio por el docente responsable y de la capacitación del uso de equipos por el personal del laboratorio UPN.

ANEXO 5

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL,
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
ÉNFASIS DISCIPLINAR II

Informe de laboratorio – Remoción de acetaminofén por fotocatalisis heterogénea

Juliana Suarez Varela jsuarezv@upn.edu.co, Cesar Danilo Tolosa Enciso cdtolosae@upn.edu.co, Kevin Santiago Torralba Molano kstorralbam@upn.edu.co

Resumen

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada que emplea un semiconductor como lo es el TiO_2 activado por medio de radiación para generar un par de electrones-Hueco (e^-/h^+) capaces de promover reacciones redox en la interfase de solido-liquido. Al absorber fotones con energía suficiente, se excitan electrones desde la banda de valencia a la conducción, mientras los huecos remanentes actúan como oxidantes y los electrones reducen aceptores como O_2 (Hoffmann, 1995; Herrmann, 1999).

El objetivo de la siguiente practica de laboratorio es poder analizar el efecto de la cantidad de masa proporcionada de TiO_2 y las condiciones óptimas dadas por tiempo de operación para el sistema de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 a partir del porcentaje de remoción y los niveles de concentración obtenidos mediante una preparación de stock de acetaminofén de 500 ppm. En el diseño experimental se obtuvo 3 masas distintas de TiO_2 en un tiempo estipulado máximo de 120 minutos, obteniendo una serie de patrones entre 2 y 10 ppm para la realización de la curva de calibración.

Palabras Claves: Fotocatalisis, TiO_2 , Fotones, Redox, Interfase, Oxidantes

Abstract

Heterogeneous photocatalysis is an advanced oxidation process that uses a semiconductor, such as TiO_2 , activated by radiation to generate an electron-hole pair (e^-/h^+) capable of promoting redox reactions at the solid-liquid interface. Upon absorbing photons with sufficient energy, electrons are excited from the valence band into conduction, while the remaining holes act as oxidants and the electrons reduce acceptors such as O_2 (Hoffmann, 1995; Herrmann, 1999).

The objective of the following laboratory exercise is to analyze the effect of the amount of TiO₂ provided and the optimal operating conditions (specifically, the operating time) on the heterogeneous photocatalysis system using TiO₂, based on the removal percentage and concentration levels obtained using a 500-ppm acetaminophen stock solution. In the experimental design, 3 different masses of TiO₂ were obtained in a maximum stipulated time of 120 minutes, obtaining a series of standards between 2 and 10 ppm for the realization of the calibration curve.

Keywords: Photocatalysis, TiO₂, Photons, Redox, Interface, Oxidants

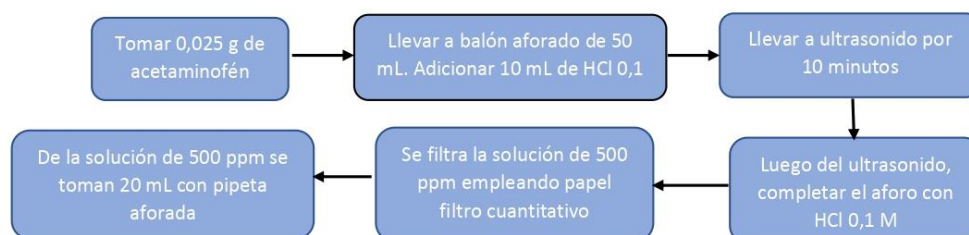
Introducción

La fotocatalisis heterogénea es una tecnología avanzada de oxidación que permite la degradación y oxidación en variedad de compuestos orgánicos (Garces, 2004), este proceso fotoquímico utiliza luz solar o artificial como lo es la luz UV para impulsar las reacciones químicas hacia la superficie de un catalizador sólido, generalmente un semiconductor, este proceso genera especies altamente reactivas, como lo son los radicales libres (OH)[•] el fotón incide con igual o superior energía a la banda prohibida del semiconductor como lo es dióxido de Titanio.

La presencia de contaminantes en el agua es tema de alta prioridad internacional, no solo se relaciona con la salud de los ecosistemas, sino con el abastecimiento del agua para los individuos y el desarrollo de diversas actividades económicas, por lo tanto, preservar la calidad de agua se ha convertido en un tema de seguridad nacional. Los agentes contaminantes pueden ser de tipo orgánico, inorgánico o microbiológico, debido a la constante contaminación en los cuerpos de agua algunos pueden ser persistentes y que se amplía en una variedad de contaminantes de manera emergente, para ello por eso se somete a una selección de tratamientos para la desinfección y eliminación de contaminantes como lo son los procesos de alta remoción en contaminantes emergentes como lo es la fotocatalisis heterogénea (Carlos Durán-Álvarez et al., 2015).

En aguas se aplica a la eliminación de contaminantes como lo son los fármacos, colorantes, pesticidas y otros compuestos refractarios bajo condiciones cercanas al ambiente, la eficiencia real exige considerar fenómenos de transporte, opacidad y ensuciamiento de la matriz para el diseño del reactor y maximizar la irradiación útil y el contacto de la superficie catalítica (Hoffmann, 1995. Hermann, 1999).

Procedimiento

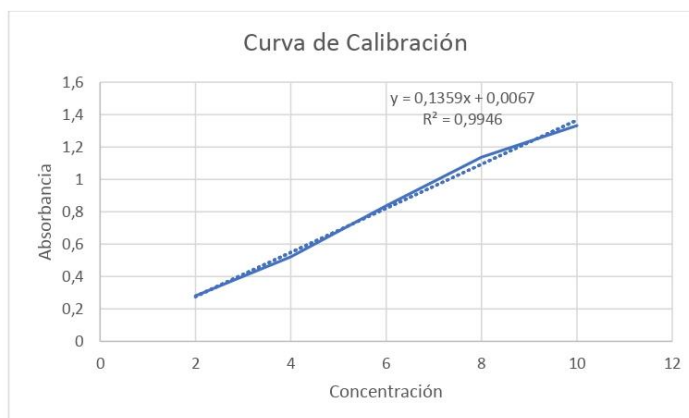


Resultados y registro de datos

Los experimentos se realizaron en un transcurso de 0 minutos hasta los 120 minutos, se realiza una preparación de solución de trabajo de 10 ppm a partir de una solución intermedia de 100 ppm, se añadió 100 mL de esta solución en el fotocatalizador y se añadió el TiO₂. Posteriormente se llevo a unos patrones de 2,4,6,8 y 10 ppm para obtener la curva de calibración y la absorbancia dada en la longitud máxima.

Grupo	Acetaminofén	Masa de TiO ₂	Tiempo (Min)	Propósito
1 y 2	10 ppm	0,025 g	45	Baja carga, bajo tiempo
3 y 4	10 ppm	0,050 g	90	Efecto de carga con tiempo medio
5,6 y 7	10 ppm	0,075 g	120	Efecto de carga alta, tiempo alto

Concentración	Absorbancia
2	0,281
4	0,522
6	0,837
8	1,137
10	1,332



Grupo 1 y 2

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,306	9,560	5,233	45,2%
45	0,718			

Grupo 3 y 4

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,286	9,413	3,261	65,3%
90	0,450			

Grupo 5, 6 y 7

Tiempo (minutos)	Absorbancia	Concentración Inicial	Concentración Final	% de Remoción
0	1,427	10,451	2,047	80,4%
120	0,285			

Mediante la ecuación de la recta obtenida en la curva de calibración se realiza el debido despeje para obtener la concentración obtenida por medio de las absorbancias resultantes en el tiempo estipulado.

$$y = 0,1359x + 0,0067$$

Para la absorbancia en el grupo 1 y 2 se determina de la siguiente forma

$$y = 0,1359x + 0,0067$$

$$1,306 = 0,1359x + 0,0067$$

$$x = 1,306 - 0,0067 / 0,1359$$

$$x = 9,560$$

Análisis de resultados

Al observar los datos obtenidos se logra determinar que a nivel general la concentración proporcionada por acetaminofén para remoción por medio de la fotocatalisis a partir de TiO_2 logra una proporción directamente relacionada a la solubilidad y el papel fundamental de los semiconductores, como lo es el caso del Dióxido de Titanio para poder disolverse rápidamente. Los resultados mostraron que el tiempo en el cual se intensifico la muestra contaminada por fármacos, fue influenciada para la obtención del porcentaje de remoción para cada uno, viendo optimo que la muestra que estuvo durante 120 minutos obtuvo un mayor porcentaje de remoción, siendo la muestra que mayor factor contaminante en masa se agregó, Cuando se habla de la concentración del fotocatalizador está siendo relacionada la cantidad o concentración del fotocatalizador en un volumen

definido de solución, usualmente cuando se han desarrollado trabajos que se hacen en efluentes simulados, se toma un volumen definido, siendo la metodología más usual, para poder establecer el volumen correcto y con ello la dosificación del fotocatalizador, la unidad del tiempo generalmente es el minuto, refiriéndose al tiempo que requiere el fotocatalizador para estar en contacto con la solución del contaminante, para que logre su proceso de degradación y cuando se habla del ciclo de vida del fotocatalizador, se refiere al número de veces que es posible utilizar el fotocatalizador, manteniendo sus propiedades fotocatalíticas (Laura Isabel Castaño, 2020).

Se pudo evidenciar que el proceso de fotocátalisis tiene una gran efectividad al trascurso de un mayor tiempo establecido, debido a que su porcentaje de remoción fue clave al trascurso de los 120 minutos, además, la concentración del contaminante es directamente proporcional al porcentaje de remoción, debido, que la remoción se obtuvo en la concentración inicial de 10,451 ppm, el proceso de fotodegradación son eficientes cuando la concentración de los contaminantes es baja o media.

Es así como el acetaminofén demostró que, a una misma concentración, pero con diferente cantidad de semiconductor como lo es el TiO_2 (Dióxido de Titanio) demostró una buena eficiencia en la remoción del fármaco obtenido en la muestra.

El rango de diluciones puede ser un factor clave o de bajas concentraciones, ya que permite que los sitios activos de la superficie del fotocatalizador puedan ser accesible y que este pueda adsorber en la superficie del catalizador.

Conclusiones

La fotocátalisis heterogénea es una de las tecnologías que ayuda a la remoción en fármacos, esto debido, a la presencia de un buen semiconductor como lo es el dióxido de Titanio (TiO_2) que lo hace como agente de remoción altamente efectivo, demostrando una eficacia mayor al 80% en un rango de tiempo superior a los 60 minutos

Esta técnica de remoción es muy eficiente en el tratamiento de aguas residuales, siendo eficiente en un tiempo establecido de 2 horas y que a pesar de las radiaciones UV fueron bajas, se considera que es de alta eficiencia en condiciones que regularmente podrían ser optimas y que ayudarían a procesos en los cuales traerían menores costos.

Bibliografía

Carlos Durán-Álvarez, J., Avella, E., & Zanella, R. (2015). *Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos*. 8(14).

<https://www.scielo.org.mx/pdf/mn/v8n14/2448-5691-mn-8-14-17.pdf>

Garcés L., Mejía E., Santamaria J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, volumen 1, pp. 83-92.

Hoffmann, M, R, Martin, S, T, Choi. W, y Bahnemann (1995) Environmental Applications of semiconductor Photocatalysis. Chemical

Laura Isabel Castaño. (2020) Revisión sistemática del proceso de degradación de contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales, provenientes de la industria farmacéutica por fotocatalisis heterogénea.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36791/licastano.pdf?sequence=3>

ANEXO 6

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
ÉNFASIS DISCIPLINAR II**

**REMOCIÓN DE ACETAMINOFEN EN MUESTRAS DE AGUA A PARTIR DE LA
FOTOCATÁLISIS HETEROGENEA**

LAURA RIVERA - YENY ROJAS - SAMUEL VELOZA

DOCENTE – DORA LUZ GOMÉZ AGUILAR

LICENCIATURA EN QUÍMICA

2025

RESUMEN

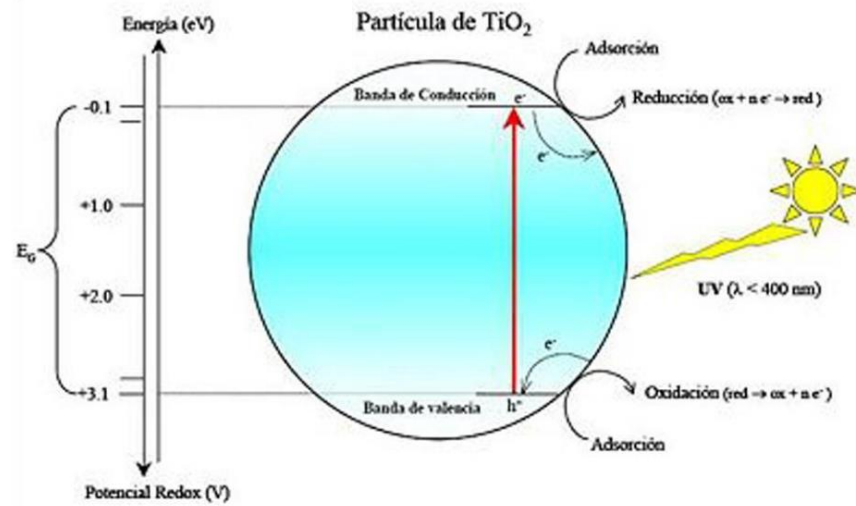
La presente práctica se realizó con el fin de estudiar el porcentaje de remoción de acetaminofén en aguas, esto es también conocido como análisis de compuestos orgánicos emergentes (COEs), en el cual involucra tratamientos de orden cuaternario (tratamientos avanzados) como la fotocatalisis heterogénea a partir de TiO_2 . En primer lugar, se realizó una solución trabajo de 10ppm de acetaminofén a partir de una solución intermedia de 100 ppm desde un stock de 500 ppm a un volumen de 500mL, seguido a ello, se preparó una solución de HCl 1M para la disolución del fármaco. Después, se calibro el fotocatalizador en oscuridad por 15min (adsorción) y se dispuso a realizar el análisis. El tratamiento se efectuó en 7 grupos de trabajo los cuales parten de una solución de 10 ppm de acetaminofén a un volumen de 100mL. Luego, para el grupo 1 y 2 se agregó una masa de TiO_2 de 0.025g en un tiempo de reacción de 45min, después, para el grupo 3 y 4 se agregó una masa de TiO_2 de 0.050g en un tiempo de reacción de 90 min y, finalmente, para el grupo 5,6 y 7, se agregó una masa de TiO_2 de 0.075g en un tiempo de reacción de 120 min. El análisis de la remoción del fármaco a partir de la fotocatalisis demostró una alta eficiencia en tiempos mayores de 45 min y 90 min y 120min, dando así una alternativa interesante de estudio para el tratamiento de aguas residuales

PALABRAS CLAVE: Fotocatalisis, COEs, agua residual, óxido de Titanio.

INTRODUCCIÓN

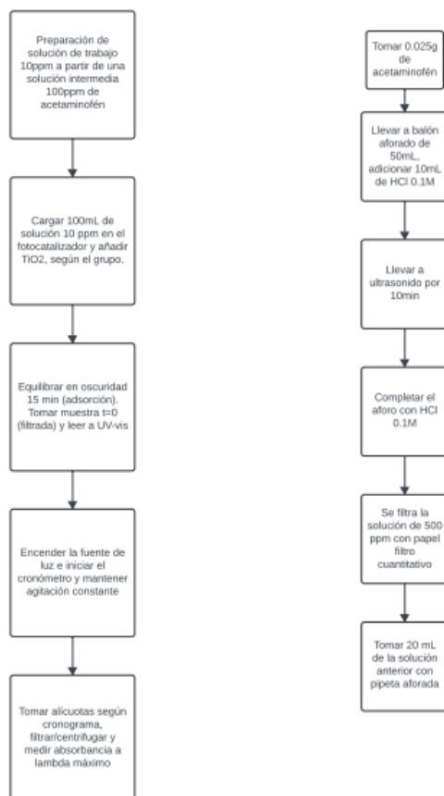
La fotocatalisis parte en principio de los procesos fotoquímicos naturales como por ejemplo la fotosíntesis, la cual toma la energía de la luz solar para producir compuestos orgánicos para la obtención de nutrientes en las plantas a partir del dióxido de carbono. La fotocatalisis implica la combinación de procesos fotoquímicos con la catálisis, los cuales son dependientes uno del otro para que ocurran las reacciones de oxidación y reducción correspondientes. Así, la fotocatalisis puede ser definida como la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador, es una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato (Fluidmecanicasur S.L.). El proceso inicial de la fotocatalisis implica la generación de un par electrón-hueco en las partículas del dióxido de titanio, en este caso el semiconductor, allí, se generan radicales libres como los hidroxilo. En la fotocatalisis heterogénea (se define de esta manera porque el catalizador ni los reactantes se encuentran en el mismo estado de agregación), se utiliza el dióxido de titanio como catalizador el cual a partir de luz ultra violeta genera radicales hidroxilo, la generación de estos radicales se debe a los huecos producidos en el semiconductor, gracias a estos radicales los cuales son sumamente oxidantes, la materia orgánica como COEs gradualmente va reaccionando hacia dióxido de carbono y agua.

El uso del óxido de titanio es de gran ayuda pues este es inerte tanto químicamente como biológicamente, no es tóxico, es resistente a la degradación fotoquímica y química, además de que es barato y debido a su $\lambda < 387\text{nm}$ de energía puede ser excitado mediante la luz solar (Fluidmecanicasur S.L.). En aguas residuales, la forma más usada del TiO_2 es la Degussa o P-25 dado que posee un área superficial más grande y de alta densidad para los sitios activos de los huecos y con ello, mayor degradación de contaminantes ambientales.



Tomado de: (Fluidmecanicasur S.L.)

METODOLOGÍA

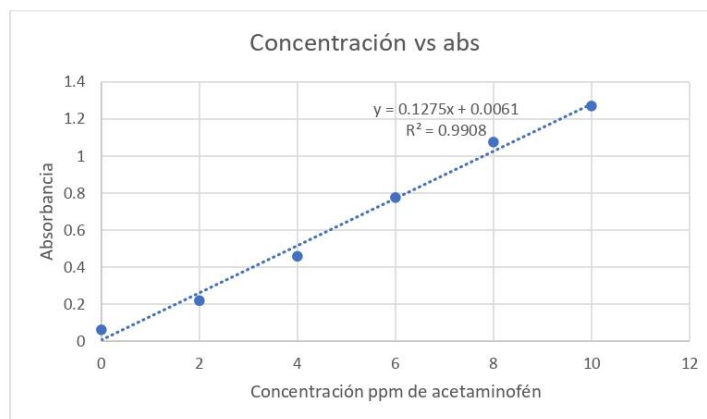


RESULTADOS

Dentro de los resultados, en primer lugar, se realizó la curva de calibración de 0,2,4,6,8,10 ppm.

Curva de calibración acetaminofen				Observaciones
ppm acetaminofen	Absorbancia	Absorbancia corregida		
Blanco	0	0,062	0,062	Algunos patrones estuvieron desfasados lo que produjo una correlación lineal de R2=0,990
	2	0,281	0,219	
	4	0,522	0,46	
	6	0,837	0,775	
	8	1,137	1,075	
	10	1,332	1,27	

Lo cual dio la siguiente correlación lineal



Después de la curva de calibración, los grupos 1,2,3,4,5,6 y 7 realizaron las respectivas lecturas en 3 tiempos diferentes y con una masa de catalizador diferente. Cabe aclarar que la concentración de acetaminofén se tomó como 10ppm, pero esta se corrigió con respecto al blanco.

Grupo	Acetaminofén (ppm)	Masa TiO2(g)	Tiempo (min)	Propósito
1 y 2	10	0,025	45	Línea base (baja carga, tiempo bajo)
3 y 4	10	0,05	90	Efecto de mayor carga con tiempo medio
5,6 y 7	10	0,075	120	Efecto de carga alta a tiempo alto

Se obtuvieron los siguientes resultados después del tratamiento

Grupo 1 y 2					
Tiempo (min)	Abs	Abs corregida	Ci(ppm)	Cf(ppm)	%Remoción
0	1,306	1,244	9,709	4,67	51,9
45	0,718	0,656			

Grupo 3 y 4					
Tiempo (min)	Abs	Abs corregida	Ci(ppm)	Cf(ppm)	%Remoción
0	1,286	1,224	9,552	3,00	68,6
90	0,45	0,388			

Grupo 5,6 y 7					
Tiempo (min)	Abs	Abs corregida	Ci(ppm)	Cf(ppm)	%Remoción
0	1,427	1,365	10,658	1,701	84,04
120	0,285	0,223			

Específicamente para el grupo 3 y 4, el cálculo de la concentración se realizó a partir de la interpolación de la absorbancia obtenida con respecto a la ecuación lineal presentada en la curva de calibración, donde X es la concentración en partes por millón (ppm) de acetaminofén.

$$y = 0.1275x + 0.0061$$

Despejando con respecto a X

$$x = \frac{y - 0.0061}{0.1275}$$

Concentración de acetaminofén después de 90 min

$$x = \frac{0.388 - 0.0061}{0.1275} = 3$$

Cálculo del % de remoción del fármaco

$$\%Remoción = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100$$

$$\%remoción = \frac{9.552 - 3}{9.552} * 100 = 68.6\%$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Haciendo un paneo general se pudo notar que hay variables que alteran en gran medida el porcentaje de remoción del acetaminofén, como por ejemplo el tiempo y la concentración del TiO_2 , para el grupo 1 y 2 se notó que hubo un gran porcentaje de remoción, alrededor del 52%, solamente con una masa de 0.025g de TiO_2 en un tiempo de 45min, seguido a ello, para el grupo 3 y 4 tuvo un porcentaje del 68.6% con el doble de masa del catalizador y con el doble de tiempo, es decir en 90min de reacción. Finalmente, para el grupo 5,6 y 7 se obtuvo un porcentaje del 84% de remoción en un tiempo de 120min.

Como se pudo observar, los porcentajes de remoción van aumentando en función de la concentración del catalizador y entre más tiempo se dispone. Además, se evidenció que el mayor aumento de remoción se dio con el grupo de 45 min y el de 90 min con un aumento del 17% en remoción, mientras que, el aumento entre el grupo de 120 min con respecto al grupo de 90 min tuvo un aumento del 15,4%. Ahora bien, los porcentajes de remoción individuales demuestran que entre más tiempo de contacto del coagulante con la solución hay mayores sitios activos o huecos en donde se pueda generar los procesos de oxidación y reducción de la materia orgánica, además el uso del TiO_2 como P-25 fue clave también porque permitió que hubiera mayor porcentaje de remoción debido a que su superficie de reacción o área de contacto es más grande.

CONCLUSIONES

La aplicación de la fotocatalisis con el catalizador TiO_2 o P-25 demostró ser eficiente y amigable con el ambiente de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio.

El mecanismo clave para la remoción de los contaminantes es gracias a la generación de radicales libres o especies activas de oxígeno como los hidroxilos, que, oxidan a los fármacos y pasan por diferentes estructuras para finalmente sintetizarse en dióxido de carbono y agua.

La presencia de contaminantes orgánicos emergentes farmacéuticos en las aguas residuales representan una amenaza para la vida humana, animal y marina, por ello, los procesos como la fotocatalisis son de gran ayuda pues implican un tratamiento avanzado para estas matrices de agua, sin embargo, es importante destacar que puede haber subproductos debido a la fotocatalisis que creen agentes que igualmente sean perjudiciales para nuestras aguas.

Bibliografía

Fluidmecanicasur S.L. . (s.f.). <http://www.fluidmecanicasur.es/>. Obtenido de <http://www.fluidmecanicasur.es/>: https://www.fluidmecanicasur.es/content/uploads/13_GAINA%20-%20Fotocatalisis%20TiO2.pdf

Bakbolat, B., Daulbayev, C., Sultanov, F., Beissenov, R., Umirzakov, A., Mereke, A., ... & Chuprakov, I. (2020). Recent developments of TiO_2 -based photocatalysis in the hydrogen evolution and photodegradation: a review. *Nanomaterials*, 10(9), 1790.

Srivastava, S. K. (2024). Recent advances in removal of pharmaceutical pollutants in wastewater using metal oxides and carbonaceous materials as photocatalysts: a review. *RSC Applied Interfaces*, 1(3), 340-429.

ANEXO 7

PRUEBA DIAGNÓSTICA – FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

Esta prueba busca caracterizar los conocimientos previos de los estudiantes en torno a los principios de la fotocatalisis heterogénea, así como su capacidad de comprensión, razonamiento analítico, aplicación e interpretación crítica, de acuerdo con los modelos de David Kolb y Javier Torres Salcedo.

Nombre del estudiante: _____

Curso: _____

Fecha: _____

Sección 1 – Conceptos Básicos

1. 1. ¿Qué es la fotocatalisis heterogénea?

- a) Un proceso biológico para generar energía solar.
- b) Un proceso químico en el que la luz activa un catalizador para degradar contaminantes.
- c) Un mecanismo de absorción de calor en aguas residuales.
- d) Una reacción enzimática realizada por bacterias fotosintéticas.

2. 2. ¿Qué compuesto se utiliza comúnmente como catalizador en la fotocatalisis?

- a) Óxido de cobre (CuO)
- b) Dióxido de titanio (TiO₂)
- c) Sulfato de aluminio
- d) Ácido clorhídrico

3. 3. ¿Qué tipo de luz es más efectiva para activar el TiO₂?

- a) Luz infrarroja
- b) Luz ultravioleta (UV)
- c) Luz visible
- d) Luz fluorescente

Sección 2 – Aplicación y Comprensión

4. 4. ¿Cuál es una de las principales aplicaciones de la fotocatalisis en el tratamiento de aguas?

- a) Estabilización térmica
- b) Degradación de compuestos orgánicos persistentes
- c) Floculación de metales pesados

- d) Eliminación de bacterias anaerobias

5. 5. ¿Cómo se genera la actividad fotocatalítica en el TiO₂?

- a) Disolviéndose completamente en el agua
- b) Absorbiendo luz UV y generando radicales oxidantes
- c) Atrayendo polvo en suspensión
- d) Liberando CO₂ al medio

Sección 3 – Razonamiento e Interpretación Crítica

6. 6. ¿Por qué se prefiere el TiO₂ en procesos fotocatalíticos?

- a) Es costoso pero muy sensible
- b) Tiene alta eficiencia bajo luz UV y es estable
- c) Cambia de estado fácilmente
- d) Se descompone en radicales sin luz

7. 7. ¿Cuál es una limitación relevante del uso de TiO₂ en la fotocatálisis?

- a) Reacciona lentamente con luz UV
- b) Solo se activa bajo luz UV, no visible
- c) Es poco reactivo con contaminantes orgánicos
- d) Tiene baja resistencia al calor

Sección 4 – Transferencia de Conocimientos

8. 8. ¿Qué estrategia mejora la eficiencia del TiO₂ bajo luz visible?

- a) Dopado con nitrógeno o carbono
- b) Mezclarlo con ácidos fuertes
- c) Aumentar el pH del medio
- d) Disolverlo en alcohol

9. 9. ¿Qué variable NO influye directamente en la eficiencia del proceso fotocatalítico?

- a) Concentración del contaminante
- b) Intensidad de luz
- c) Conductividad eléctrica del agua
- d) Superficie activa del catalizador

10. 10. ¿Por qué la fotocatalisis se considera una tecnología sostenible?

- a) Porque reduce el uso de catalizadores artificiales
- b) Porque no genera residuos tóxicos y utiliza luz como fuente de energía
- c) Porque requiere menos agua en el proceso
- d) Porque actúa mejor con productos químicos agresivos

RÚBRICA DE EVALUACIÓN – COMPETENCIAS ANALÍTICAS EN FOTOCATÁLISIS

Este instrumento permite analizar las respuestas de la prueba diagnóstica sobre fotocatalisis, caracterizando las competencias analíticas en los estudiantes según los modelos de David Kolb (aprendizaje experiencial) y Javier Torres Salcedo (niveles cognitivos).

CATEGORÍAS EVALUADAS

Categoría	Modelo	Descripción	Preguntas asociadas
Concreción experiencial	Kolb	Recuerdo y comprensión básica de conceptos.	1, 2, 3
Experimentación activa	Kolb	Aplicación de conocimientos en contextos reales.	4, 5
Reflexión abstracta	Kolb	Análisis de relaciones causa-efecto; explicación profunda.	6, 7
Conceptualización activa	Kolb	Transferencia de conocimientos y solución de problemas.	8, 9, 10
Nivel Inferencial	Torres Salcedo	Interpreta datos y deduce relaciones lógicas.	6, 7, 9
Nivel Crítico	Torres Salcedo	Evalúa la pertinencia o impacto de una solución.	8, 10

INSTRUMENTO DE ANÁLISIS POR ESTUDIANTE

Pregunta	Respuesta correcta	Competencia principal (Kolb)	Nivel (Torres Salcedo)
1	b	Concreción experiencial	Literal
2	b	Concreción experiencial	Literal
3	b	Concreción experiencial	Literal
4	b	Experimentación activa	Inferencial
5	b	Experimentación activa	Inferencial
6	b	Reflexión abstracta	Inferencial
7	b	Reflexión abstracta	Inferencial
8	a	Conceptualización activa	Crítico
9	c	Conceptualización activa	Inferencial
10	b	Conceptualización activa	Crítico

NIVELES DE DESEMPEÑO

Nivel de desempeño - Criterio

- Avanzado: 9-10 respuestas correctas. Demuestra dominio conceptual y capacidad de análisis transferible.
- Satisfactorio: 7-8 respuestas correctas. Comprende los fundamentos y los aplica en contextos conocidos.
- En desarrollo: 4-6 respuestas correctas. Requiere fortalecer la transferencia y análisis crítico.
- Inicial: 0-3 respuestas correctas. Necesita reforzar conceptos básicos y conectar teoría con práctica.

ANEXO 8

PRÁCTICA DE LABORATORIO – REMOCIÓN DE ACETAMINOFÉN POR FOTOCÁTALISIS HETEROGÉNEA

1. Objetivo

- Evaluar la **remoción fotocatalítica de acetaminofén** en solución acuosa utilizando **TiO₂** bajo irradiación UV – Vis.
- Evaluar, de forma cuantitativa, cómo el tiempo y la concentración de TiO₂ modulan la eficiencia de reacción, comparando porcentaje de degradación y tasa inicial para seleccionar las condiciones óptimas de proceso.

2. Fundamento Fotocatalítico

La **fotocatálisis heterogénea** es un proceso de **oxidación avanzada** que emplea un **semiconductor** (p. ej., TiO₂) activado por radiación para generar pares **electrón–hueco (e⁻/h⁺)** capaces de promover reacciones redox en la interfase sólido-líquido. Al absorber fotones con energía suficiente, se excitan electrones desde la banda de valencia a la de conducción, mientras los huecos remanentes actúan como oxidantes y los electrones reducen aceptores como O₂, habilitando la transformación o mineralización de contaminantes orgánicos (Hoffmann et al., 1995; Herrmann, 1999).

Un hito fundacional fue la **fotoelectrólisis del agua en TiO₂** demostrada por **Fujishima y Honda (1972)**, que conectó la fotoelectroquímica con la fotocatalisis moderna y posicionó al TiO₂ como material de referencia para procesos impulsados por luz (Fujishima & Honda, 1972).

Mecanísticamente, tras la generación del par **e⁻/h⁺**, los **h⁺** pueden oxidar H₂O o –OH superficiales formando **•OH**, mientras los **e⁻** reducen O₂ a **O₂•⁻** y otras **ROS**; estas especies atacan enlaces en los contaminantes y favorecen rutas de oxidación hacia productos menos tóxicos o mineralización, moduladas por adsorción, transferencia de carga y recombinación (Hoffmann et al., 1995; Schneider et al., 2014).

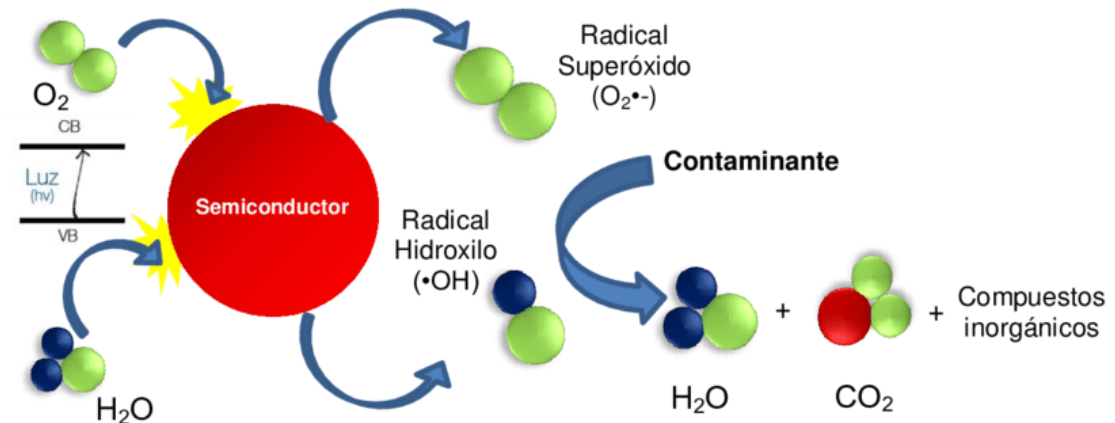


Imagen 1. Mecanismo fotocatalítico. tomada de (Hoffmann 1995; Schneider 2014).

El TiO_2 (anatasa o mezclas anatasa/rutilo) destaca por su **estabilidad, baja toxicidad relativa y costo**, pero su desempeño depende de **área superficial, morfología, defectos/dopaje, tamaño de cristalita, pH, O_2 disuelto e intensidad/longitud de onda** de la luz, factores que controlan adsorción, generación/recombinación de cargas y formación de ROS (Herrmann, 1999; Schneider et al., 2014).

En **aguas** se aplica a la eliminación de **microcontaminantes** (fármacos, colorantes, pesticidas) y otros compuestos refractarios bajo condiciones cercanas a ambiente; no obstante, la eficiencia real exige considerar **fenómenos de transporte, opacidad de la matriz, ensuciamiento del catalizador y diseño de reactor** para maximizar la irradiación útil y el contacto con la superficie catalítica (Hoffmann et al., 1995; Herrmann, 1999).

Para **cuantificar la eficiencia**, se usa típicamente **UV-Vis** y la **ley de Beer-Lambert**, relacionando **absorbancia** y **concentración** en un rango lineal validado, lo que permite calcular **% de remoción** a partir de A_t/A_0 o concentraciones calibradas; es esencial corregir **diluciones** y verificar **linealidad** (p. ej., R^2 alto) según definiciones metroológicas de referencia (IUPAC, 2014).

Metodológicamente, deben incluirse **controles** para discriminar contribuciones no catalíticas: (i) **adsorción en oscuridad** (suspensión con TiO_2 sin irradiación) y (ii) **fotólisis directa** (irradiación sin catalizador). Así, la disminución neta atribuible

a **fotocatálisis** se sustenta con validez metrológica (Hoffmann et al., 1995; Herrmann, 1999).

Desarrollos recientes integran **modificaciones de materiales** (dopaje, compósitos, sensibilización), **ingeniería de superficies** y **diseño de reactores** para ampliar el espectro útil, reducir recombinación y mejorar **selectividad** y **estabilidad** bajo condiciones reales, articulando relaciones entre **material–mecanismo–desempeño** (Schneider et al., 2014).

3. Contaminación por acetaminofén: estructura y efectos

El **acetaminofén** (también conocido como **paracetamol**) es uno de los analgésicos–antipiréticos más consumidos a nivel mundial y, en consecuencia, un **contaminante farmacéutico emergente** frecuente en matrices acuáticas. Estructuralmente, corresponde a **N-(4-hidroxifenil)acetamida** (fórmula $C_8H_9NO_2$), un anillo fenólico para-sustituido con un grupo acetamida que condiciona su reactividad, solubilidad y rutas de transformación químico-biológicas en el ambiente (PubChem, 1983).

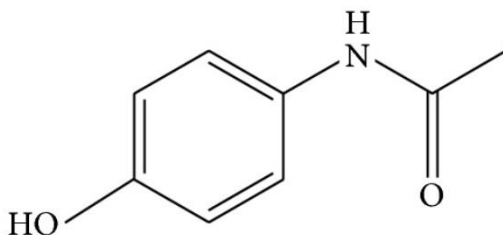


Imagen 2. Estructura de paracetamol (acetaminofén). tomada de (PubChem, 1983).

La evidencia reciente muestra que el acetaminofén aparece con **altas frecuencias de detección** en afluentes de plantas de tratamiento y en aguas hospitalarias, con concentraciones que pueden alcanzar **decenas a centenas de $\mu\text{g/L}$** ; por ejemplo, en **Portugal** se han reportado medianas en afluentes y efluentes de varias PTAR ($\mu\text{g/L}$) y porcentajes de detección elevados, en **Colombia** el acetaminofén figura con **100% de ocurrencia** en aguas residuales hospitalarias de tres ciudades, y en **Sudáfrica** durante la pandemia se observaron rangos desde **no detectado hasta $480 \mu\text{g/L}$** en afluentes y hasta **$289 \mu\text{g/L}$** en efluentes, evidenciando picos de consumo y presión sobre los sistemas de tratamiento. (Vo et al., 2019).

País	Matriz	Métrica reportada	Valor / Rango	Frecuencia de detección
Portugal	Afluente de PTAR (5 plantas)	Medianas ($\mu\text{g/L}$) por planta	4.26–7.79 $\mu\text{g/L}$ por (ejemplos por instalación)	Alta (reportada entre los fármacos más frecuentes)
Portugal	Efluente de PTAR	Medianas ($\mu\text{g/L}$)	0.11–0.18 $\mu\text{g/L}$ por (ejemplos por instalación)	Variable (menor que en afluente)
Colombia	Aguas residuales hospitalarias (3 ciudades)	Frecuencia de detección (%)	100% (20 de 38 fármacos, incluido acetaminofén)	100% en la campaña estudiada
Sudáfrica (pandemia COVID-19)	Afluente de PTAR	Rango ($\mu\text{g/L}$)	ND–480 $\mu\text{g/L}$	Frecuente durante picos de consumo
Sudáfrica (pandemia COVID-19)	Efluente de PTAR	Rango ($\mu\text{g/L}$)	ND–289 $\mu\text{g/L}$	—

Tabla 1. Rangos de detección de acetaminofén. Tomada de (Serna, Galvis 2022)

En **aguas superficiales** (ríos y lagos), donde el compuesto llega tras descargas urbanas o insuficiencias de tratamiento, las concentraciones suelen ubicarse en el rango **ng/L–baja $\mu\text{g/L}$** , con variaciones asociadas a caudal, estacionalidad y eficiencia de las plantas de tratamiento (Hernández-Tenorio et al., 2022; Vo et al., 2019). En **agua de consumo**, si bien no existe un límite federal específico en EE. UU., algunos estados han emitido **valores guía sanitarios**; por ejemplo, Minnesota dispone de guías y fichas técnicas para la evaluación de riesgos por presencia de acetaminofén en agua potable, lo que refuerza la necesidad de vigilancia y mejora de tratamiento (Minnesota Department of Health, 2025; Minnesota Department of Health, s. f.).

Más allá de su presencia, un motivo crítico para **remover acetaminofén** de corrientes de agua es la **formación de subproductos más tóxicos** durante

la **desinfección con cloro** u otras etapas del tratamiento. Estudios experimentales mostraron que el acetaminofén puede transformarse en **N-acetil-p-benzoquinona imina (NAPQI)** y **1,4-benzoquinona**, especies más reactivas y potencialmente más tóxicas que el precursor, observadas tanto en condiciones controladas como en matrices reales (Bedner & MacCrehan, 2006; Huguet et al., 2014). En escenarios reales, minimizar el sustrato antes de la desinfección reduce la probabilidad de generar estos subproductos y, por tanto, el riesgo asociado a **mezclas complejas** en agua tratada (Bedner & MacCrehan, 2006).

En relación con los **efectos sobre ecosistemas acuáticos**, la toxicidad **aguda** del acetaminofén suele ser **baja a moderada** para diversas especies; no obstante, a **concentraciones ambientalmente realistas** y en **exposiciones crónicas**, se han documentado **efectos subletales** tales como **estrés oxidativo**, **alteraciones fisiológicas y neurotoxicidad**, así como **impactos reproductivos** en peces e invertebrados (Kim et al., 2007; Daniel et al., 2022). Estas evidencias sostienen que, incluso cuando las concentraciones no son letales, la exposición prolongada puede comprometer la **salud de las comunidades acuáticas** y, por extensión, el **funcionamiento de los ecosistemas** (Daniel et al., 2022; Kim et al., 2007).

Para la **salud humana**, los análisis disponibles sugieren que las **trazas** usuales en agua tratada (**ng/L–baja µg/L**) implican **riesgo directo bajo** frente a guías sanitarias; sin embargo, persisten **incertidumbres** por **exposición crónica**, **ocurrencia** con otros fármacos y la **generación de subproductos** más reactivos, por lo que se recomienda **control en la fuente** (gestión de usos y descargas) y **tecnologías de tratamiento avanzadas** (p. ej., oxidación avanzada, adsorción, membranas, fotocatalisis) que aseguren la remoción del compuesto y limiten su transformación a especies indeseables (Minnesota Department of Health, 2025; Bedner & MacCrehan, 2006; Vo et al., 2019).

4. Seguridad y manejo ambiental

- Usar bata, guantes de nitrilo y gafas de seguridad.
- Evitar exposición directa a luz UV; usar pantalla protectora.
- Filtrar el TiO₂ antes de analizar; disponer sólidos como residuo peligroso.
- El sobrenadante con fármacos debe ir a contenedor de aguas contaminadas para disposición adecuada.

5. Materiales y equipos

- Fotocatalizador con agitación magnética.
- Fuente de luz UV-A 247 nm

- TiO_2 (P25 o equivalente).
- Acetaminofén grado analítico; agua destilada/desionizada.
- Papel filtro
- Espectrofotómetro UV-Vis y cubetas apropiadas.

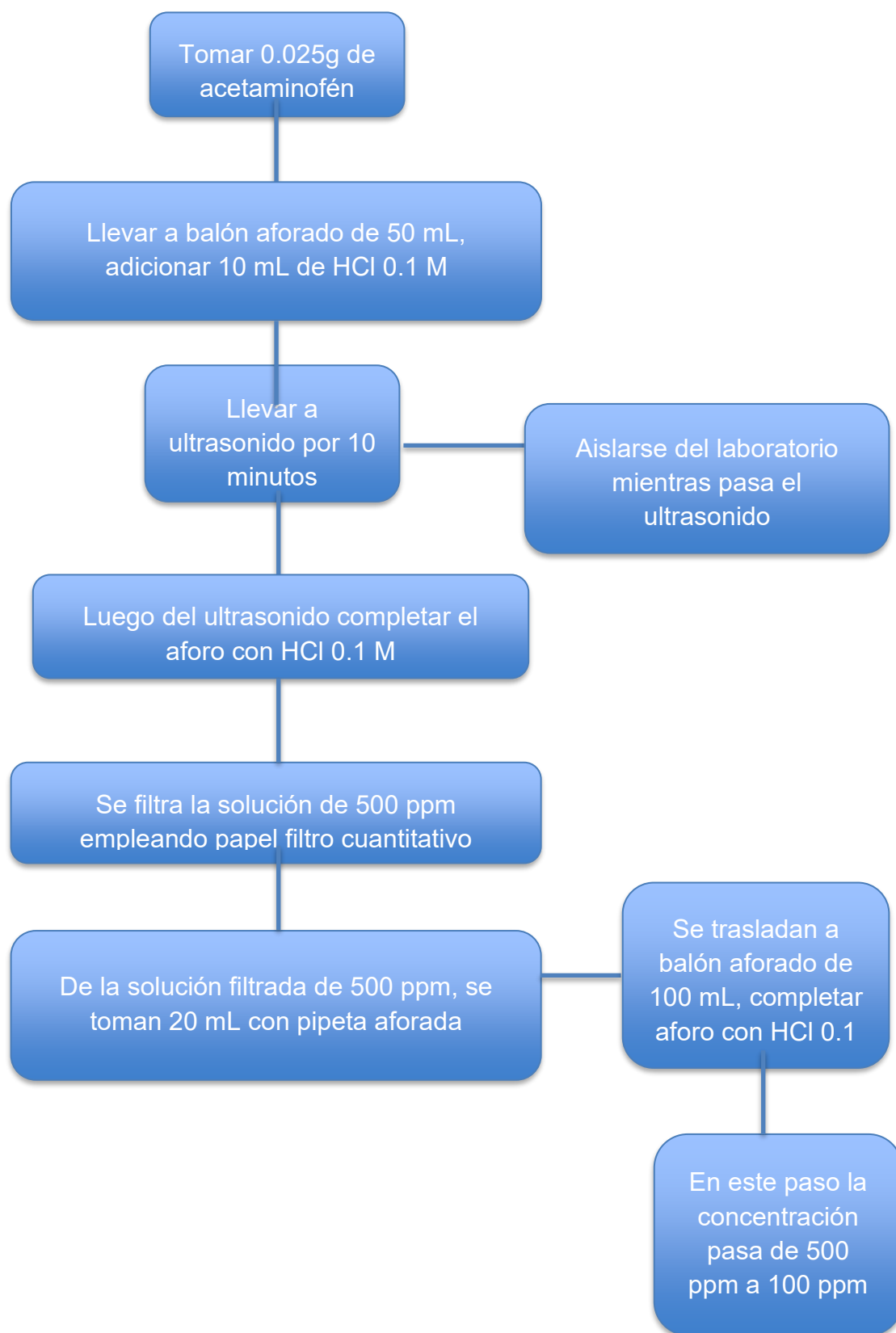
6. Preparación Stock HCl 0.1M

$$\frac{0.1 \text{ mol HCl}}{L} * \frac{(0.5L)}{1 \text{ mol HCl}} * \frac{36.46g \text{ HhCl}}{37g \text{ Puro HCl}} * \frac{100g \text{ R.Q HCl}}{1.19g} = 4.14 \text{ mL HCl}$$

y se lleva a 500 mL con agua destilada.

Preparación Stock Acetaminofén 500 ppm

$$\frac{500 \text{ mg}}{L} * \frac{(0.05L)}{1 \text{ mg}} * \frac{1 * 10^{-3} g}{1 \text{ mg}} = 0.025g \text{ de acetaminofén}$$



7. Diseño experimental

Concentración de acetaminofén: 10 ppm. Volumen de trabajo sugerido: 100 mL en el fotocatalizador

Grupo	Acetaminofén	Masa TiO ₂ (g)	Tiempo (min)	Propósito
1 y 2	10 ppm	0.025	45	Línea base (baja carga, tiempo bajo)
3 y 4	10 ppm	0.050	90	Efecto de ↑carga con tiempo medio
5,6,7	10 ppm	0.075	120	Efecto de carga alta a tiempo alto

8. Procedimiento

1. Preparación de solución de trabajo (10 ppm) a partir de una solución intermedia (100 ppm).
2. Cargar 100 mL de solución 10 ppm en el fotocatalizador y añadir TiO₂ según el grupo.
3. Equilibrar en oscuridad 15 min (adsorción). Tomar muestra t=0 (filtrada) y leer UV-Vis.
4. Encender la fuente de luz e iniciar el cronómetro.
5. Tomar alícuotas según cronograma, filtrar/centrifugar y medir absorbancia a $\lambda_{\text{máx}}$.
6. Mantener agitación constante.
7. Gestionar adecuadamente los residuos.

9. Cronograma de muestreo por grupo

Grupo	Tiempos sugeridos (min)	Responsable de toma de muestra
1 y 2	45	_____
3 y 4	90	_____
5,6,7	120	_____

10. Curva de calibración (UV-Vis)

Preparar estándares: 2, 4, 6, 8, 10 ppm. Medir absorbancia a la $\lambda_{\text{máx}}$ confirmada.

Concentración (ppm)	Absorbancia	Observaciones
2		
4		
6		
8		
10		

11. Registro de datos experimentales

Grupo 1 y 2

Tiempo (min)	A(λ máx)	C _i (ppm)	C _f (ppm)	% Remoción	Observaciones
0					
45					

Grupo

3

y

4

Tiempo (min)	A(λ máx)	C _i (ppm)	C _f (ppm)	% Remoción	Observaciones
0					
90					

Grupo 5, 6, 7

Tiempo (min)	A(λ máx)	C _i (ppm)	C _f (ppm)	% Remoción	Observaciones
0					
120					

12. Cálculos % de remoción

$$\frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

13. Resultados y discusión

Analice el efecto de la masa de TiO_2 y del tiempo de irradiación sobre el % de remoción.

14. Conclusiones

Redacte conclusiones claras y específicas sobre el desempeño fotocatalítico bajo las tres condiciones evaluadas y recomendaciones para optimización.

15. Bibliografía

- Bedner, M., & MacCrehan, W. A. (2006). Transformation of acetaminophen by chlorination produces the toxicants 1,4-benzoquinone and N-acetyl-p-benzoquinone imine. *Environmental Science & Technology*, 40(2), 516–522.
- Dalas. D, Ajab, H., Opoku, E. M., Al-Abed, S. R., & Dionysiou, D. D. (2022). Assessment of paracetamol toxic effects under varying environmental conditions: A review. *Toxics*, 10(4), 153.
- Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*.

- Hernández-Tenorio, R., López-Velandia, C., & González-Castro, M. (2022). Review of occurrence of pharmaceuticals worldwide for environmental risk assessment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 30, 100401.
- Herrmann, J.-M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, 53(1), 115–129.
- Herrmann, J.-M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to water treatment. *Topics in Catalysis*.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96.
- Huguet, M., Gallard, H., & Croué, J.-P. (2014). Transformation of paracetamol into 1,4-benzoquinone by a granular manganese oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 273, 224–231.
- IUPAC. (2014). *Beer–Lambert law (Gold Book)*. International Union of Pure and Applied Chemistry.
- Kim, Y., Choi, K., Jung, J., Park, S., Kim, P.-G., & Park, J. (2007). Aquatic toxicity of acetaminophen, carbamazepine, cimetidine, diltiazem and six NSAIDs. *Environment International*, 33(3), 370–375.
- Minnesota Department of Health. (2025). *Comparison of state water guidance and federal drinking water standards*.
- Minnesota Department of Health. (s. f.). *Acetaminophen in drinking water* (Ficha informativa).
- PubChem. (s. f.). *Acetaminophen | C₈H₉NO₂ | CID 1983*. National Center for Biotechnology Information.
- Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. W. (2014). Understanding TiO₂ photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 114(19), 9919–9986.
- Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Rosero-Moreano, M., Lee, J., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2022). An initial approach to the presence of pharmaceuticals in wastewater from hospitals in Colombia and their environmental risk. *Water*, 14(6), 950.
- Vo, H. N. P., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, T. M. H., Li, J., Liu, Y., ... Nguyen, D. D. (2019). Acetaminophen micropollutant: Historical and current occurrences, and removal by biological systems: A review. *Chemosphere*, 236, 124391.

ANEXO 9

REMOCIÓN DE ACETAMINOFÉN POR FOTOCATÁLISIS HETEROGENEA

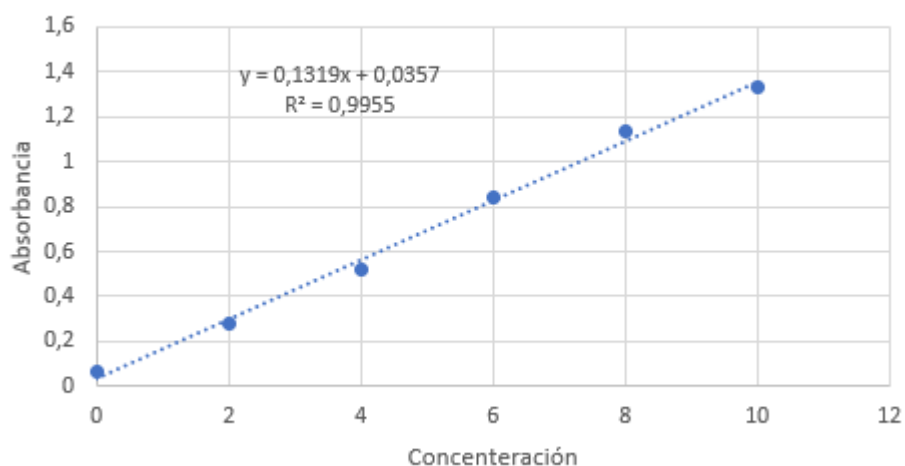
4. Construcción curva de calibración

Tabla 1 curva de calibración

Concentración (ppm)	Absorbancia (200.2 nm)
Blanco	0.062
2	0.281
4	0.522
6	0.837
8	1.137
10	1.332

Nota: Elaboración propia

Curva de calibración acetaminofén



Así, los patrones preparados para la curva de calibración tienen a seguir una secuencia y a reportar un buen coeficiente de correlación correspondiente a 0.9955, además que, según la ley de Lambert-beer las absorbancias se encuentran dentro de los estándares admitidos; por lo que, su tratamiento posterior será posible. (García Martínez, 2012)

5. Se degradaron 4 muestras objetivo con la variación de diferentes parámetros como: Concentración, tiempo, agitación y masa de TiO_2 , como se observa en la tabla 2
Tabla 2 parámetros de muestras

Muestra	Masa TiO ₂	Tiempo	Agitación	Abs. Inicial	Abs. Final
1	0.025g	45 min	Si	1.306	0.718
2	0.05g	90 min	Si	1.286	0.450
3	0.075g	120 min	Si	1.427	0.285
4	0.025g	45 min	No	1.361	1.021

Nota: Elaboración propia

Para calcular el porcentaje de remoción primero será necesario calcular la concentración a través de las absorbancias, así como la ley de Lambert-beer indica:

$$Y = mx + b$$

Donde:

Y= Absorbancia

m= 0.1319

x =Concentración

b=0.0357

Entonces para calcular la absorbancia inicial de la muestra 1 es necesario:

$$x = \frac{y - b}{m}$$

$$x = \frac{1.306 - 0.0357}{0.1319} = 9.63ppm$$

La absorbancia final se calcula de la misma manera, entonces=

$$x = \frac{0.718 - 0.0357}{0.1319} = 5.17ppm$$

De modo que, para las concentraciones iniciales y finales de la muestra se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 3 Concentraciones del analito

Muestra	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)
1	9.63	5.17
2	9.47	3.14

3	10.54	1.89
4	10.04	7.47

Nota: Elaboración propia

Conociendo la concentración inicial y final a simple vista podemos observar que efectivamente si degradó; sin embargo, se debe calcular el porcentaje de remoción con la siguiente formula:

$$\%remoción = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

Entonces para las pruebas su porcentaje de remoción fue:

Prueba 1

$$\%remoción = \frac{9.63 - 5.17}{9.63} * 100 = 46.28$$

Prueba 2

$$\%remoción = \frac{9.47 - 3.14}{9.47} * 100 = 66.86$$

Prueba 3

$$\%remoción = \frac{10.54 - 1.89}{10.54} * 100 = 82.08$$

Prueba 4

$$\%remoción = \frac{10.04 - 7.47}{10.04} * 100 = 25.65$$

Como se observó en la tabla 2 las concentraciones, tiempos la agitación de las muestras varió en cada una de ellas, por lo que, resulta posible inferir que dependiendo de la concentración del TiO₂ la degradación será mayor o menor, a pesar de que no se realizó un análisis cinético con respecto al tiempo tomado en intervalos, si se consideró el análisis final y se observó que a mayores concentraciones de TiO₂ mayor será el porcentaje de degradación, pues la muestra 1 que solo tenía 0.025g de TiO₂ degradó un 46.28%, mientras que la muestra 3 que contenía 0.075g de TiO₂ degradó 82.08%, entonces si aumentamos la concentración de TiO₂, este cambio será directamente proporcional al porcentaje de degradación, pues como lo menciona

Garcés Giraldo y Hernández Ángel (2006) las concentraciones mas altas de TiO_2 supondrán una mejor mineralización del analito, aún en ausencia de otros oxidantes como el peróxido.

Otro parámetro relevante a la hora de la degradación del acetaminofén fue la agitación constante del medio, pues así como la muestra 1 y 4 lo evidencian, el porcentaje de degradación fue superior al agitar, de modo que, sin modificar ningún otro parámetro y agregando exactamente la misma masa de TiO_2 se encontró que el porcentaje de degradación para el medio agitado fue 46.28%, mientras que para el que no se agitó fue de 25.65, una disminución de más del 20% haciendo mucho más clara la idea de que la agitación frecuente permite degradar el analito con una mayor eficiencia comparado con una muestra sin agitación.

6. Conclusiones

- 6.1 Aumentando la concentración del TiO_2 obtendremos mejores porcentajes de degradación, por lo que, resulta eficaz agregar 0.075g o más; sin embargo deben realizarse los análisis pertinentes al agregarlo en las concentraciones.
- 6.2 El tiempo de exposición del analito en la cámara UV aparentemente al ser mayor, habrá un porcentaje de degradación; aunque, sin un estudio más profundo sobre este parámetro no será posible dar una conclusión significativa. Se sugiere modificar únicamente el tiempo de exposición para determinar que tanta inferencia tiene este en el porcentaje de degradación final.
- 6.3 La agitación del medio resulto ser un parámetro fundamental a la hora de la ejecución del experimento, entonces se considera que el medio debe mantenerse en constante agitación

REFERENCIAS:

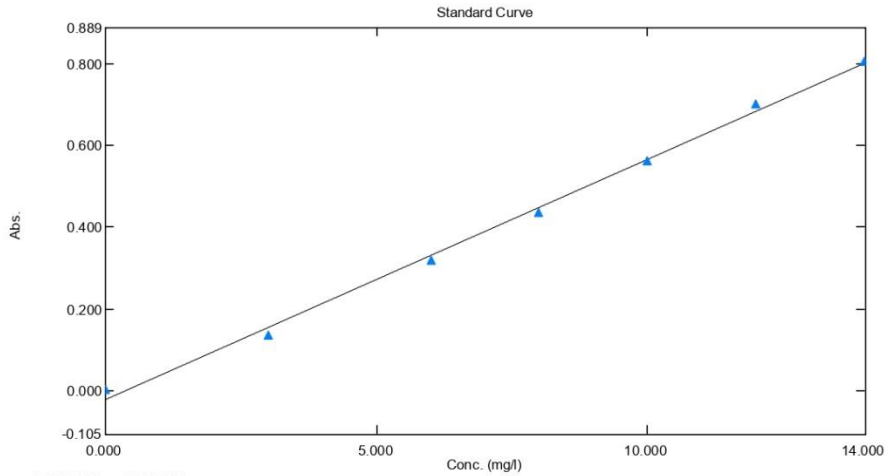
- Garcia Martinez, G. M. E. (2012, 29 junio). Aplicación de la ley de Lambert-Beer en espectroscopía UV-visible. *Repositorio Institucional UPV*.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/16360>
- Garcés Giraldo, L., & Hernández Ángel, M. (2006). Comparación de los tratamientos con TiO₂ y FeCl₃ para aguas residuales coloreadas textiles. *Repositorio Unisallista*. Recuperado 2 de noviembre de 2025, de
<https://repository.unilasallista.edu.co/items/4d06d89b-4685-425c-86d7-206742ac83c1>
-

ANEXO 10

Standard Table Report

11/04/2025 13:55:13

File Name: C:\Users\ESPECTROFOTOMETRO\Documents\2025\Dora Aguilar\Trabajo de grado Alfonso\acetaminofen 11.04.2025.pho



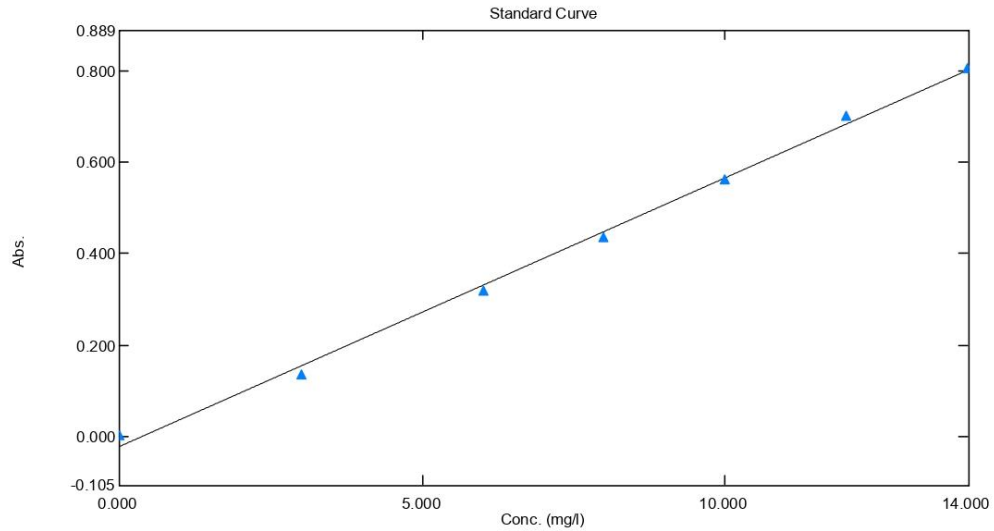
Standard Table

	Sample ID	Type	Ex	Conc	WL242.0	Wgt.Factor	Comments
1	Blanco	Std-Repeat		0.000	0.003	1.000	
2	Blanco-2	Std-Repeat		0.000	0.003	1.000	
3	Blanco-3	Std-Repeat		0.000	0.003	1.000	
4	Blanco-Avg	Average		0.000	0.003	1.000	Avg of preceding 3 Samples
5	Patron 1	Std-Repeat		3.000	0.136	1.000	
6	Patron 1-2	Std-Repeat		3.000	0.136	1.000	
7	Patron 1-3	Std-Repeat		3.000	0.136	1.000	
8	Patron 1-Avg	Average		3.000	0.136	1.000	Avg of preceding 3 Samples
9	Patron 2	Std-Repeat		6.000	0.320	1.000	
10	Patron 2-2	Std-Repeat		6.000	0.320	1.000	
11	Patron 2-3	Std-Repeat		6.000	0.320	1.000	
12	Patron 2-Avg	Average		6.000	0.320	1.000	Avg of preceding 3 Samples
13	Patron 3	Std-Repeat		8.000	0.436	1.000	
14	Patron 3-2	Std-Repeat		8.000	0.436	1.000	
15	Patron 3-3	Std-Repeat		8.000	0.436	1.000	
16	Patron 3-Avg	Average		8.000	0.436	1.000	Avg of preceding 3 Samples
17	Patron 4	Std-Repeat		10.000	0.562	1.000	
18	Patron 4-2	Std-Repeat		10.000	0.562	1.000	

Standard Table Report

11/04/2025 13:55:13

File Name: C:\Users\ESPECTROFOTOMETRO\Documents\2025\Dora Aguilar\Trabajo de grado Alfonso\acetaminofen 11.04.2025.pho



Standard Table

	Sample ID	Type	Ex	Conc	WL242.0	Wgt.Factor	Comments
19	Patron 4-3	Std-Repeat		10.000	0.562	1.000	
20	Patron 4-Avg	Average		10.000	0.562	1.000	Avg of preceding 3 Samples
21	Patron 5	Std-Repeat		12.000	0.704	1.000	
22	Patron 5-2	Std-Repeat		12.000	0.704	1.000	
23	Patron 5-3	Std-Repeat		12.000	0.704	1.000	
24	Patron 5-Avg	Average		12.000	0.704	1.000	Avg of preceding 3 Samples
25	Patron 6	Std-Repeat		14.000	0.806	1.000	
26	Patron 6-2	Std-Repeat		14.000	0.806	1.000	
27	Patron 6-3	Std-Repeat		14.000	0.806	1.000	
28	Patron 6-Avg	Average		14.000	0.806	1.000	Avg of preceding 3 Samples
29							

ANEXO 11

Overlay Spectrum Graph Report

24/06/2025 18:29:47

