



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BÁSICAS

“FOTOCATALIZADORES $ZnO-WO_3-CeO_2$ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO(A) QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

PRESENTA:

Est. YARA DEL SOCORRO HERNÁNDEZ CORZO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

Dr. ADIB ABIU SILAHUA PAVÓN (DACB-UJAT)

EN CODIRECCIÓN DE:

Dr. ADRIÁN CERVANTES URIBE (DACB-UJAT)

CUNDUACÁN, TABASCO, MÉXICO, MARZO DE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 19 del mes de Marzo del año 2025, el que suscribe Yara del Socorro Hernández Corzo egresada del Programa de Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo con número de matrícula 182A20030, adscrito a la División Académica de Ciencias Básicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del título en Licenciado(a) Químico Farmacéutico Biólogo y titulada “**FOTOCATALIZADORES ZnO-WO₃-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)**” dirigida por el Dr. Adib Abiu Silahua Pavón y el Dr. Adrián Cervantes Uribe.

DECLARO QUE: La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 19 de marzo de 2025.



Yara del Socorro Hernández Corzo



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División
Académica
de Ciencias
Básicas



DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco; a 05 de marzo de 2025.

**C. YARA DEL SOCORRO HERNÁNDEZ CORZO
PASANTE DE LA LIC. EN QUÍMICO
FARMACÉUTICO BIÓLOGO
PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado **“FOTOCATALIZADORES ZnO-WO₃-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFEN (PARACETAMOL)”**, dirigido por el Dr. Adib Abiu Silahua Pavón con la codirección del Dr. Adrián Cervantes Uribe, bajo la modalidad de titulación por **TESIS**. La comisión de revisión conformada por el Dr. Adrián Cordero García, Dr. Srinivas Godavarthi, Dr. Adrián Cervantes Uribe, Dra. María Antonia Lunagómez Rocha y Mtra. Cecilia Sánchez Trinidad, libero el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente.

Sin otro particular, reciba usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

**DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA**

C.c.p. Archivo.

DIR DRA.HPV/kfvg

Km.1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de autorización

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis denominada **“FOTOCATALIZADORES ZnO-WO₃-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)”**, de la cual soy autor y titular de los derechos de autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional. Por lo antes mencionado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los 19 días del mes de Marzo del año 2025.

Autorizó



Yara del Socorro Hernández Corzo
Tesisista.

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 19 de marzo 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORA y/o AUTORES en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“FOTOCATALIZADORES ZnO-WO₃-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)”**. Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Egresado
Yara del Socorro
Hernández Corzo



Director
Dr. Adib Abiu Silahua
Pavón

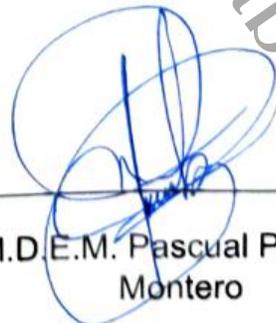


Codirector
Dr. Adrián Cervantes
Uribe

TESTIGOS



Dr. José Arnold González
Garrido



M.D.E.M. Pascual Pedraza
Montero

LICENCIATURA - FOTOCATALIZADORES ZnO-WO3-CeO2 PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Internet	305 palabras – 3%
2	eprints.uanl.mx Internet	175 palabras – 1%
3	www.scielo.org.mx Internet	123 palabras – 1%
4	repositorio.uta.edu.ec Internet	78 palabras – 1%
5	ri.ujat.mx Internet	66 palabras – 1%
6	www.scielo.org.co Internet	65 palabras – 1%
7	farmaciainformativa.com Internet	63 palabras – 1%
8	repositoriodigital.uns.edu.ar Internet	54 palabras – 1%
9	bdigital.unal.edu.co Internet	44 palabras – < 1%
10	www.slideshare.net Internet	



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

ESTUDIOS

TERMINALES

Ri

Dedicatoria.

A mi abuelita Yara:

Quien físicamente ya no me acompaña, pero que su recuerdo y la promesa de un título universitario siempre han vivido en mí.

A mis padres:

Sra. Trinidad Elena Corzo Palma y Sr. Miguel Hernández Reyes, quienes me brindaron todo su apoyo, me tuvieron mucha paciencia a lo largo de mi etapa como universitaria y fueron un pilar importante en mi vida para forjar la persona que soy hoy.

A mis amigos:

Ana Hernández, Bianca Pérez, César Camacho, Esperanza Vargas, Fryda Cruz, Itzel Urquín, José M. Jiménez y María Jiménez quienes me brindaron su amistad y apoyo durante todos esos años de desvelos, estrés y cansancio y con quienes olvidaba todo aquello antes mencionado llenándome de alegría esos días de agobio.

A mis asesores:

Dr. Adib Abiu Silahua Pavón y Dr. Adrián Cervantes Uribe, por su apoyo incondicional, por brindarme sus enseñanzas y tenerme mucha paciencia.

Agradecimientos.

A Dios por darme vida y fortaleza para poder llegar hasta aquí y darme la capacidad de lograr convertirme en la persona que soy hoy.

Al Dr. Adib Abiu Silahua Pavón y al Dr. Adrián Cervantes Uribe, por transmitirme parte de sus conocimientos, por tenerme paciencia cuando no lograba entender aspectos del proyecto, por motivarme a continuar con la tesis y aconsejarme durante el proceso de elaboración de la misma.

Al laboratorio de Nanomateriales catalíticos, fuentes de Energía y Remediación Ambiental, ubicado en el Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT) en la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por brindarme un espacio y a sus integrantes quienes me brindaron el apoyo y la facilidad para utilizar los equipos durante la elaboración del proyecto.

Al comité revisor de la tesis: M.C. Cecilia Sánchez Trinidad, Dr. Adrián Cordero García, Dr. Adrián Cervantes Uribe, Dra. María Antonia Lunagómez Rocha y Dr. Srinivas Godavarthi por dedicar su tiempo a la revisión de este trabajo y contribuir con sus certeros comentarios a la elaboración del mismo.

A todos los profesores que me impartieron clases, compartieron sus conocimientos, brindaron su amistad y me dieron sabios consejos durante mi estadía en la universidad y a quienes llevaré conmigo como valiosos recuerdos.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por ser mi máxima casa de estudios y quien me brindó un espacio en sus instalaciones para completar una etapa en mi vida académica.

Índice.

Resumen.....	14
Abstract.....	15
1. Introducción.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1. Acetaminofén (Paracetamol).....	17
2.2. Farmacología.....	19
2.3. Farmacodinamia y farmacocinética.....	19
2.4. Mecanismo de acción.....	21
2.5. Absorción y metabolismo.....	21
2.6. Ruta de eliminación y vida media.....	22
2.7. Acetaminofén: riesgos toxicológicos en la salud humana y el ambiente.....	23
2.7.1. Etapas de la intoxicación por paracetamol.....	24
2.8. Fotocatálisis.....	26
2.9. Tipos de fotocatálisis.....	26
2.9.1. Fotocatálisis homogénea.....	26
2.9.2. Fotocatálisis heterogénea.....	27
2.10. Remediación ambiental a través de reacciones fotocatalíticas.....	28
2.11. Características de los compuestos: ZnO, CeO ₂ y WO ₃	28
2.12. Fotodegradación de fármacos.....	31
2.13. Farmacia y química verde.....	32
3. Justificación.....	34
4. Pregunta de Investigación.....	34
5. Hipótesis.....	35
6. Objetivos.....	35

6.1. Objetivo general.....	35
6.2. Objetivos específicos.....	35
7. Metodología.....	35
7.1. Preparación de los fotocatalizadores mediante el método de combustión en estado sólido.....	36
7.2. Técnicas de caracterización.....	37
7.2.1. Adsorción/Desorción de N ₂	38
7.2.2. Espectrofotometría UV-Vis con Reflectancia Difusa.....	38
7.2.3. Difracción de rayos X (DRX).....	38
7.2.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	39
7.3. Reacción fotocatalítica.....	39
8. Resultados.....	41
8.1. Adsorción/Desorción de N ₂	41
8.2. Uv-Vis con Reflectancia Difusa.....	42
8.3. Difracción de rayos X.....	44
8.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	46
8.5. Reacción fotocatalítica.....	48
9. Discusión.....	51
9.1. Adsorción/Desorción de N ₂	51
9.3. Difracción de rayos X.....	52
9.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	53
9.5. Reacción fotocatalítica.....	54
10. Conclusiones.....	56
11. Referencias.....	57
12. Anexos.....	74

Índice de tablas.

Tabla 1. Propiedades de los precursores.	30
Tabla 2. Heterouniones semiconductoras de los precursores.	30
Tabla 3. Clave de identificación del catalizador y variación del porcentaje de cada precursor.	36
Tabla 4. Área Específica, Diámetro Promedio de Poro y Volumen de Poro de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂ a diferentes relaciones atómicas.	42
Tabla 5. Energía de Banda Prohibida (E _g) de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂ . .	43
Tabla 6. Tamaño de Cristalito de las fases de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂ . .	46
Tabla 7. Porcentaje de degradación y constante de velocidad de la degradación del acetaminofén utilizando fotocatalizadores Zn-W-Ce.	49

Índice de figuras.

Figura 1. Estructura química del acetaminofén.	18
Figura 2. Estructura química del 4-aminofenol.	18
Figura 3. Esquema simple del Sistema LADME.	20
Figura 4. Estructura química del NAPQI.	22
Figura 5. Esquema del metabolismo y rutas de eliminación del Acetaminofén.	23
Figura 6. Esquema de las fuentes y el destino del APAP.	25
Figura 7. Mecanismo de acción de la Fotocatálisis Heterogénea.	27
Figura 8. Celdas unitarias del a) ZnO, b) CeO ₂ y c) WO ₃ [43].	29
Figura 9. Los 12 principios de la química verde descrita por John C. Warner y Paul T. Anastas (1988).	33
Figura 10. Esquema de síntesis de los fotocatalizadores por el método de Combustión en Estado Sólido.	37
Figura 11. Esquema del sistema de síntesis y almacenamiento del catalizador.	37
Figura 12. Esquema del sistema de degradación fotocatalítica del acetaminofén.	40

Figura 13. Isotermas de Adsorción-Desorción de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂ sintetizados a 500°C.	41
Figura 14. Espectros Uv-Vis de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂ sintetizados a 500°C.	42
Figura 15. Cálculo por Tauc Plot de los fotocatalizadores ZnO-WO ₃ -CeO ₂	43
Figura 16. Difractogramas de cada uno de los materiales sintetizados por el método de combustión en estado sólido.	44
Figura 17. Celda unitaria del ZnWO ₄ [71].	45
Figura 18. Celda unitaria del Ce ₂ (WO ₄) ₃ [72].	45
Figura 19. Espectros de FTIR obtenidos de los materiales sintetizados.	47
Figura 20. Degradación fotocatalítica del acetaminofén utilizando los fotocatalizadores Zn-W-Ce sintetizados por el método de combustión en estado sólido a 500 °C.	48
Figura 21. Efecto de la concentración de los fotocatalizadores Zn-W-Ce en la constante de degradación del acetaminofén (pseudoprimer orden).	49
Figura 22. Número de reúsos del fotocatalizador ZnWCe ₄ sintetizado por el método de combustión en estado sólido a 500 °C.	50
Figura 23. Posibles rutas de fotodegradación del Acetaminofén [106, 107, 108].	55

**“FOTOCATALIZADORES ZnO-WO₃-CeO₂ PARA
LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN
(PARACETAMOL)”**

Resumen.

La contaminación del agua es una de las principales problemáticas que se busca abordar mediante diversas estrategias. La fotocatalisis se destaca como un método de oxidación avanzada que emplea un catalizador semiconductor junto con luz solar o radiación ultravioleta (UV) para generar radicales hidroxilos altamente reactivos, capaces de oxidar y degradar contaminantes orgánicos, como los fármacos. En esta investigación, se planteó la síntesis de un óxido mixto compuesto por ZnO-WO₃-CeO₂, utilizando el método de combustión en estado sólido, con el objetivo de degradar acetaminofén (paracetamol) mediante fotocatalisis. Los materiales se sintetizaron a diferentes % atómicos (50:25:25, 25:50:25, 25:25:50 y 33:33:33) y fueron calcinados a 500 °C por 12 horas con una rampa de calentamiento de 2°C/min. La caracterización de los fotocatalizadores se realizó mediante las técnicas de Absorción/Desorción de N₂, Espectrofotometría Uv-Vis con Reflectancia Difusa, Difracción de rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). La degradación del acetaminofén se realizó utilizando un sistema de evaluación fotocatalítica de luz UV, en un reactor de vidrio de 200 mL con una solución de acetaminofén a 30 ppm en agua destilada con una concentración de catalizador de 0.5 mg/L. La reacción se realizó durante un período de 180 minutos donde se tomaron alícuotas a diferentes tiempos (0, 1, 5, 15, 30, 60, 90, 120 y 180 minutos). La muestra se analizó mediante la técnica de espectrofotometría UV-Vis con el equipo GENESYS g10 s-2|5t313207 a una longitud de onda máxima de 243 nm. El fotocatalizador con mejor desempeño fue el ZnWCe4, que alcanzó una degradación de un 65.5% del fármaco.

PALABRAS CLAVES

Contaminación, fotocatalisis, acetaminofén, ZnO-WO₃-CeO₂, degradación.

Abstract.

Water pollution is one of the main problems that is being addressed through various strategies. Photocatalysis stands out as an advanced oxidation method that employs a semiconductor catalyst together with sunlight or ultraviolet (UV) radiation to generate highly reactive hydroxyl radicals, capable of oxidizing and degrading organic pollutants, such as pharmaceuticals. In this research, the synthesis of a mixed oxide composed of ZnO-WO₃-CeO₂, using the solid-state combustion method, was proposed with the objective of degrading acetaminophen (paracetamol) by photocatalysis. The materials were synthesized at different atomic % (50:25:25, 25:50:25, 25:25:50 and 33:33:33) and were calcined at 500 °C for 12 h with a heating ramp of 2°C/min. Characterization of the photocatalysts was performed by N₂ Adsorption/Desorption, Uv-Vis Spectrophotometry with Diffuse Reflectance, X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) techniques. The degradation of acetaminophen was performed using a UV light photocatalytic evaluation system, in a 200 mL glass reactor with a solution of acetaminophen at 30 ppm in distilled water with a catalyst concentration of 0.5 mg/L. The reaction was carried out over a period of 180 minutes where aliquots were taken at different times (0, 1, 5, 15, 30, 30, 60, 60, 90, 120 and 180 minutes). The sample was analyzed by UV-Vis spectrophotometry technique with GENESYS g10 s-2I5t313207 equipment at a maximum wavelength of 243 nm. The best performing photocatalyst was ZnWCe4, which achieved 65.5% degradation of the drug.

KEYWORDS:

Contamination, photocatalysis, acetaminophen, ZnO-WO₃-CeO₂, degradation.

1. Introducción.

La contaminación es una de las principales problemáticas de las que se busca erradicar con diversas estrategias; la de los mantos acuíferos es una de las más alarmantes y preocupada por la demanda en crecimiento de agua limpia [1]. Existen diferentes contaminantes, desde agentes biológicos como las bacterias, virus y parásitos, hasta sustancias como pesticidas, fertilizantes, sustancias radiactivas, compuestos farmacéuticos, etc. Siendo el último mencionado como uno de los más frecuentes. La mayor parte de la contaminación derivada de estos compuestos farmacéuticos procede del último paso del sistema LADME; la excreción tras su ingesta en el organismo a través de los residuos fecales. No obstante, no es la única forma en la que estos compuestos llegan al agua, paralelamente encontramos la eliminación inadecuada de los productos farmacéuticos (PFs), ya sea que estos se desechen a través de las aguas residuales o la basura doméstica [2].

Existe una gran variedad de PFs dentro de la medicina moderna para el alivio y prevención de diversas patologías que afectan no solamente a la sociedad humana, sino también para fines veterinarios, estos PFs están conformados por grupos compuestos como por ejemplo: antibióticos, antiinflamatorios, antidepresivos, antidiabéticos, analgésicos, etc. [3] Dentro de los analgésicos más comunes encontramos el acetaminofén (APAP), comúnmente conocido como "paracetamol", este fármaco presenta una alta hidrosolubilidad y es capaz de ser eliminado hasta un 90% por las vías de gluconación o sulfación que se llevan a cabo dentro del organismo a través del hígado; sin embargo el metabolito N-acetil-para-benzoilquinoneimina (NAPQI) por lo regular se expulsa por medio de la excreción, es decir, de las heces y orina, convirtiéndose en un compuesto tóxico persistente en el agua y suelo [4].

Existen diferentes métodos de oxidación avanzada, como es Foto-Fenton, Electroquímica, Fotocatálisis entre otros [5]. La fotocatálisis es un método de oxidación avanzada que utiliza un catalizador semiconductor y la luz solar o radiación ultravioleta (UV) para generar radicales hidroxilos altamente reactivos, que oxidan y degradan contaminantes orgánicos (Fármacos) [6].

Los semiconductores más comúnmente utilizados en procesos de degradación fotocatalítica son el dióxido de titanio (TiO_2), valorado por su alta estabilidad, bajo costo y eficiencia en la generación de radicales hidroxilos; el óxido de zinc (ZnO), que posee una banda prohibida amplia y es eficaz, aunque puede experimentar recombinación de electrones y huecos; el trióxido de tungsteno (WO_3) es conocido por su alta estabilidad química, actividad fotocatalítica y capacidad para absorber luz visible, el óxido de cerio (CeO_2) es apreciado por su alta actividad catalítica, capacidad de reducción-oxidación (redox) y estabilidad térmica [7].

De acuerdo con todo lo anterior, en este trabajo de investigación se propone la síntesis del óxido mixto $\text{ZnO-WO}_3\text{-CeO}_2$ por el Método de Combustión en Estado sólido para la degradación del Acetaminofén (paracetamol) por Fotocatálisis.

2. Marco Teórico.

2.1. Acetaminofén (Paracetamol).

El acetaminofén o paracetamol es uno de los medicamentos analgésicos y antipiréticos de mayor uso domiciliario y hospitalario por su libre comercialización, alta efectividad y accesibilidad económica, gracias a eso es uno de los más utilizados en el mundo. Introducido a la medicina en 1893 por Joseph Von Mering, hoy en día cuenta con una alta gama de presentaciones en el mercado, ya sea solo o combinado con algún otro principio activo para incrementar su efectividad. El acetaminofén es clasificado como uno de los medicamentos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), a pesar de estar dentro de esta clasificación donde se da la inhibición de la Ciclooxygenasa 1 y 2, difiere de los demás medicamentos del grupo ya que su acción antiinflamatoria es baja y los otros miembros del grupo no presentan efecto antipirético. A pesar de su descubrimiento en el siglo XIX, fue hasta la segunda mitad del siglo XX que el APAP alcanzó la popularidad que hoy posee. En cuanto a su estructura, el paracetamol (Figura 1) se encuentra dentro del grupo de los derivados de la fenacetina [8].

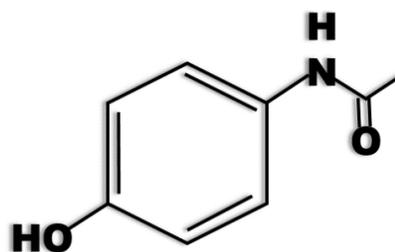


Figura 1. Estructura química del acetaminofén.

A pesar de su introducción a la medicina en 1893, fue hasta la década de los 60's cuando este medicamento fue aprobado por la FDA (Food and Drug Administration), como tableta de liberación inmediata de 325 mg. Las cápsulas y tabletas de 500 mg fueron aprobadas en 1973 y 1975 respectivamente. La FDA en Estados Unidos ha determinado que el acetaminofén es seguro y efectivo a una dosis máxima diaria de 4 gramos en 24 horas [9].

El acetaminofén o paracetamol puede ser encontrado no solo con esos nombres; también se le puede encontrar como APAP o N-acetil-p-aminofenol. Se puede encontrar en diferentes formas farmacéuticas, como: solución, suspensión, capsulas o tabletas, siendo esta ultima la de mayor auge dentro del mercado y la favorita por los consumidores. La molécula del APAP es una amida aromática acetilada y durante la degradación hidrolítica, podemos encontrar que su principal producto es el 4-aminofenol (4-AP) (Figura 2), que tiene nefrotoxicidad y efectos teratogénicos significativos [10].

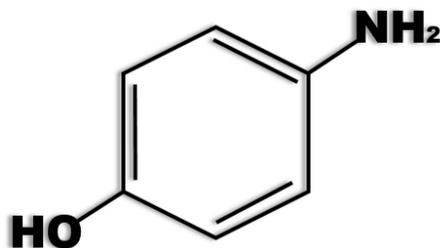


Figura 2. Estructura química del 4-aminofenol.

2.2. Farmacología.

El acetaminofén es uno de los medicamentos a los que podemos conocer como Over The Counter (OTC) o de venta y libre sin receta. Como se ha mencionado antes, este medicamento tiene acción antipirética, analgésica y aunque casi escasa, también presenta acción antiinflamatoria. Dentro de los usos comerciales del APAP podemos incluir tratamientos para dolor de cabeza, problemas del sueño, supresores de la tos y formulaciones para el resfriado por mencionar algunos de sus usos, esto aunado al hecho de que se le puede encontrar de forma combinada con otros principios activos o como monofármaco. El uso predominante de este medicamento recae en que sus dosis terapéuticas tienen un mínimo riesgo de eventos adversos, siendo recomendado para niños, adultos y geriátricos. Aun así, la dosificación para neonatos y pediátricos debe ser específica y seguirse adecuadamente a las indicadas por el médico. La actividad analgésica se da en concentraciones en plasma de 10 µg/mL y su actividad antipirética a los 4-18 µg/mL [11].

El metabolismo del paracetamol en los niños cambia a medida que crecen. En los recién nacidos, la eliminación del paracetamol se realiza a través de la sulfatación, un proceso que se desarrolló desde el nacimiento de este. En contraste, la vía de gluconación, que también participa en la eliminación del paracetamol, no madura completamente hasta alrededor de los dos años de edad. La oxidación del paracetamol, que se lleva a cabo en gran parte por la enzima CYP2E1, es muy baja en los recién nacidos. La actividad de CYP2E1 aumenta con la edad, alcanzando niveles comparables a los de los adultos entre los 1 y 10 años [12]. En adultos, el paracetamol se emplea para tratar diversas condiciones dolorosas agudas. La dosis terapéutica habitual es de 2 comprimidos de 500 mg cada uno, administrados por vía oral cada 4 horas, sin superar un total de 8 comprimidos en un período de 24 horas [13].

2.3. Farmacodinamia y farmacocinética.

La farmacodinamia o farmacodinámica como lo llaman algunos autores se puede definir como el estudio de los efectos del fármaco sobre el paciente, estos pueden ser tanto terapéuticos como no deseados o mejor conocidos como efectos adversos. La farmacodinamia de un fármaco puede afectarse por factores como: diferencias en la

morfología del receptor, concentraciones en el sitio efecto o efectos después de receptores de medicamentos y uniones como diferencia en el mecanismo de catecoles de la enzima COMT [14]. El APAP parece inhibir la síntesis y los efectos de otros mediadores químicos que llegan a sensibilizar los receptores del dolor a estímulos mecánicos y químicos, los efectos antipiréticos se dan al bloquear el pirógeno endógeno en el centro hipotalámico (regulador de la temperatura) inhibiendo así la síntesis de las prostaglandinas [15].

La farmacocinética, por su parte, se define como el estudio que se encarga de observar el tránsito de los fármacos en el paciente. La farmacocinética se puede ver afectada por la liberación, absorción, distribución, el metabolismo o la eliminación del fármaco esto se conoce como sistema LADME como se muestra en la figura 3 y a su vez como procesos de la farmacocinética. La comprensión de la interacción de estos procesos garantiza la probabilidad de éxito terapéutico y reducen la aparición de eventos adversos farmacológicos e interacciones farmacológicas [16]. Para el paracetamol después de que este ha entrado al cuerpo, se absorbe de manera rápida por el tracto digestivo, las concentraciones plasmáticas máximas se alcanzan a los 30–60 min. Se une a las proteínas del plasma en 25 %. Aproximadamente una cuarta parte de la dosis experimenta en el hígado un metabolismo de primer paso [17].

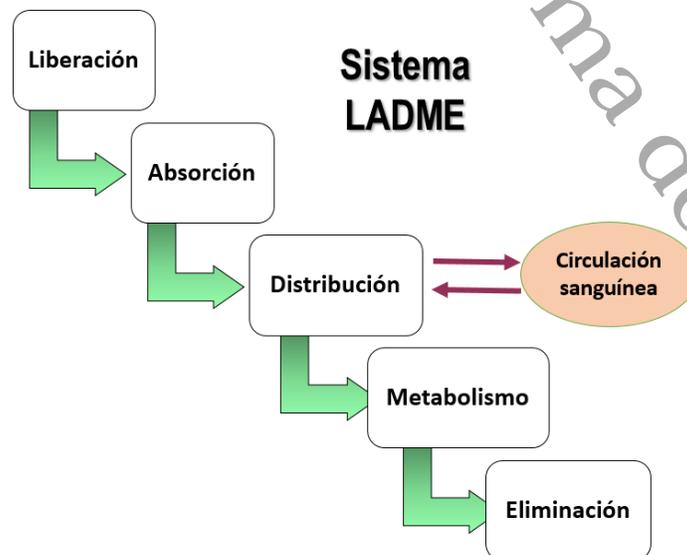


Figura 3. Esquema simple del Sistema LADME.

2.4. Mecanismo de acción.

El APAP es un AINE, por lo tanto, es un medicamento mediado por un mecanismo periférico de inhibición del enzima ciclooxigenasa (COX) que facilita el paso de ácido araquidónico a endoperóxido PGG₂, disminuyendo la síntesis de prostaglandinas y tromboxanos, obteniendo como resultado de dicha acción la reducción de la concentración tisular de compuestos que son capaces de sensibilizar o activar los nociceptores periféricos. Además, el APAP posee un efecto inhibitor de la COX a nivel del sistema nervioso central reduciendo la formación de prostaglandinas en la médula espinal y en el cerebro disminuyendo los procesos de sensibilización central [18].

Hay un debate en curso sobre el principal mecanismo de acción del paracetamol, ya que podría actuar inhibiendo la síntesis de prostaglandinas (PG) o a través de un metabolito activo que afecta a los receptores cannabinoides. La prostaglandina H₂ sintetasa es la enzima responsable de convertir el ácido araquidónico en la inestable PGH₂. Esta enzima tiene dos formas principales: PGHS-1, que es constitutiva, y PGHS-2, que es inducible. Estas formas se conocen comúnmente como COX-1 y COX-2, respectivamente. No obstante, se prefiere usar la nomenclatura PGHS, ya que la enzima posee dos sitios activos: uno COX y otro POX. La actividad de la enzima COX está relacionada con su forma oxidada, y se ha sugerido que el paracetamol actúa reduciendo la cantidad de forma oxidada mediante su acción en el sitio POX. Además, se postula una variante de PGHS, llamada COX-3, en el sistema nervioso central (SNC), que sería sensible al paracetamol [19].

2.5. Absorción y metabolismo.

El paracetamol tiene una alta biodisponibilidad oral del 88% y se absorbe eficazmente, alcanzando su concentración máxima en la sangre aproximadamente 90 minutos después de la ingestión. No se une en gran medida a las proteínas plasmáticas y su vida media en el plasma es de entre 1,5 y 2,5 horas con dosis recomendadas. El principal órgano responsable del metabolismo del paracetamol es el hígado, aunque también intervienen en menor medida el riñón y el intestino. Tras una dosis terapéutica, el paracetamol se metaboliza mayoritariamente en conjugados inactivos de glucurónido

(52-57% de los metabolitos urinarios) y sulfato (30-44%), con una pequeña fracción oxidada a un metabolito reactivo, el NAPQI. Menos del 5% del paracetamol se excreta sin cambios. El NAPQI (Figura 4), altamente reactivo, es el principal responsable de la hepatotoxicidad asociada con el paracetamol. La desintoxicación de NAPQI ocurre mediante su conjugación con glutatión (GSH) para formar APAP-GSH, que se excreta en la orina como conjugados de cisteína y ácido mercaptúrico (APAP cys). El proceso de eliminación del paracetamol implica un complejo transporte de metabolitos entre el hígado, los riñones y el intestino, a través de la bilis y el torrente sanguíneo. La mayoría de los metabolitos de glucurónido y sulfato son transportados desde el hígado a los riñones a través de la sangre, mientras que parte del APAP-gluc también se elimina en la bilis y es transportado de nuevo a la sangre a través del intestino [20].

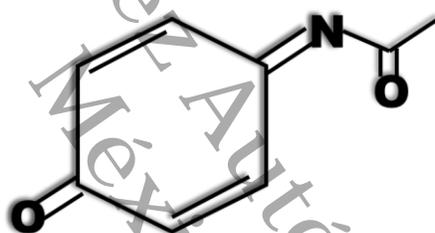


Figura 4. Estructura química del NAPQI.

2.6. Ruta de eliminación y vida media.

El paracetamol se metaboliza principalmente en el hígado, donde la mayor parte del fármaco se convierte en metabolitos conjugados con sulfato y glucurónido. Solo una pequeña fracción del paracetamol se transforma en un metabolito altamente reactivo que se une al glutatión reducido. Este metabolito reactivo se inactiva con el glutatión y se excreta en la orina en forma de conjugados de cisteína y ácido mercaptúrico. En casos de sobredosis, el daño hepático agudo se produce debido a la depleción del glutatión y a la formación de enlaces entre el metabolito reactivo y los componentes celulares esenciales. La administración temprana de agentes sulfhidrilo, como la metionina y la N-acetilcisteína, puede prevenir este daño. En personas sanas, entre el 85% y el 95% de una dosis terapéutica de paracetamol se excreta en la orina en 24 horas. De esta cantidad, aproximadamente el 4% aparece como paracetamol inalterado, y el resto se

encuentra como conjugados con glucurónido (55%), sulfato (30%), ácido mercaptúrico (4%) y cisteína (4%). La vida media plasmática del paracetamol en estos sujetos varía entre 1,9 y 2,5 horas, y el aclaramiento corporal total está en el rango de 4,5 a 5,5 ml/kg/min. La edad tiene un impacto menor en la vida media plasmática, la cual tiende a acortarse en pacientes que usan anticonvulsivos. En pacientes con enfermedad hepática crónica leve, la vida media generalmente se mantiene dentro de los valores normales, pero puede prolongarse en aquellos con enfermedad hepática severa. Tras una sobredosis, la vida media puede extenderse de 4 a 8 horas, dependiendo de la magnitud del daño hepático, ya que el hígado metaboliza intensamente el paracetamol [21].

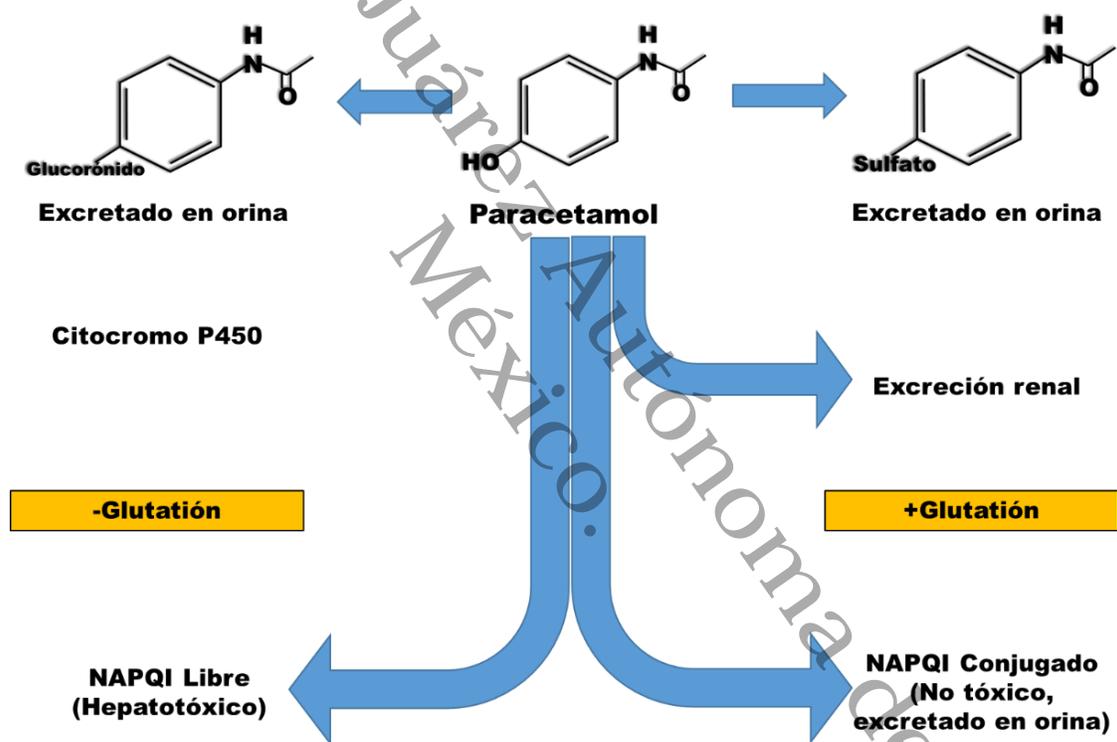


Figura 5. Esquema del metabolismo y rutas de eliminación del Acetaminofén.

2.7. Acetaminofén: riesgos toxicológicos en la salud humana y el ambiente.

El acetaminofén, mayormente conocido como paracetamol es utilizado para la reducción de la fiebre por su acción antipirética y para el alivio del dolor como agente analgésico, debido a esto, se ha incrementado el uso generalizado del mismo y con ello la amenaza hacia la salud pública [22].

El consumo creciente de este y otros PFs ha provocado el incremento de su presencia en aguas superficiales y a las destinadas al consumo humano, afectando no solo la vida humana sino también a la vida acuática. Aunque su presencia no es en altas concentraciones, a la larga puede resultar perjudicial porque se puede acumular. Por este motivo, estos residuos han sido nombrados “contaminantes emergentes”, ya que en muchos casos solo son tratados con procesos biológicos que no llegan a removerlos del agua debido a que estos compuestos no son biodegradables. En el caso del paracetamol, al estar en contacto con el cloro, muy utilizado en los procesos de desinfección de las aguas residuales, puede originar subproductos clorados y otros de oxidación asociados a efectos tóxicos en la salud humana [23].

Los efectos tóxicos del paracetamol pueden presentar diferentes reacciones como: náuseas, vómitos, dolor abdominal, reacciones de hipersensibilidad y en casos más graves; nefropatía, alteración en la función hepática, hepatotoxicidad y pancreatitis [24].

2.7.1. Etapas de la intoxicación por paracetamol.

1. Primeras 24 horas: el paciente puede presentarse asintomático o presentar síntomas inespecíficos como: náuseas, dolor abdominal, vómitos, sudoración.
2. De las 24 a 72 horas: el dolor puede concentrarse en el hipocondrio derecho (parte del abdomen superior derecho), durante ese lapso se elevan las transaminasas hepáticas.
3. Del tercer al cuarto día se da el mayor daño hepático. Síntomas: diátesis hemorrágica, encefalopatía, convulsiones, hipoglucemia y marcadores de insuficiencia hepática.
4. Sobrevivientes: comienza la recuperación y el declive de los niveles enzimáticos, (recuperación de tres a cuatro semanas). Si el daño es grave: sepsis, coagulación intravascular diseminada, insuficiencia renal, infarto agudo de miocardio y hemólisis [25].

En el tema de ecotoxicología, están los contaminantes emergentes, llamados así porque son compuestos que actualmente no son vigilados por las regulaciones y normativas existentes sobre la calidad del agua. Cuando estos contaminantes han llegado al

ambiente, se exponen a diferentes procesos para eliminarlos; biodegradación, degradación química y fotoquímica [26]. Las principales fuentes de ingreso del APAP a los mantos acuíferos son: la ingesta humana y su excreción por aguas residuales, aguas residuales hospitalarias y de los fabricantes y lixiviados de vertederos, conteniendo una cifra significativa del paracetamol que no se elimina por la desinfección convencional, aumentando el riesgo de contaminación de ríos, lagos, estuarios y en ocasiones de agua potable [27].

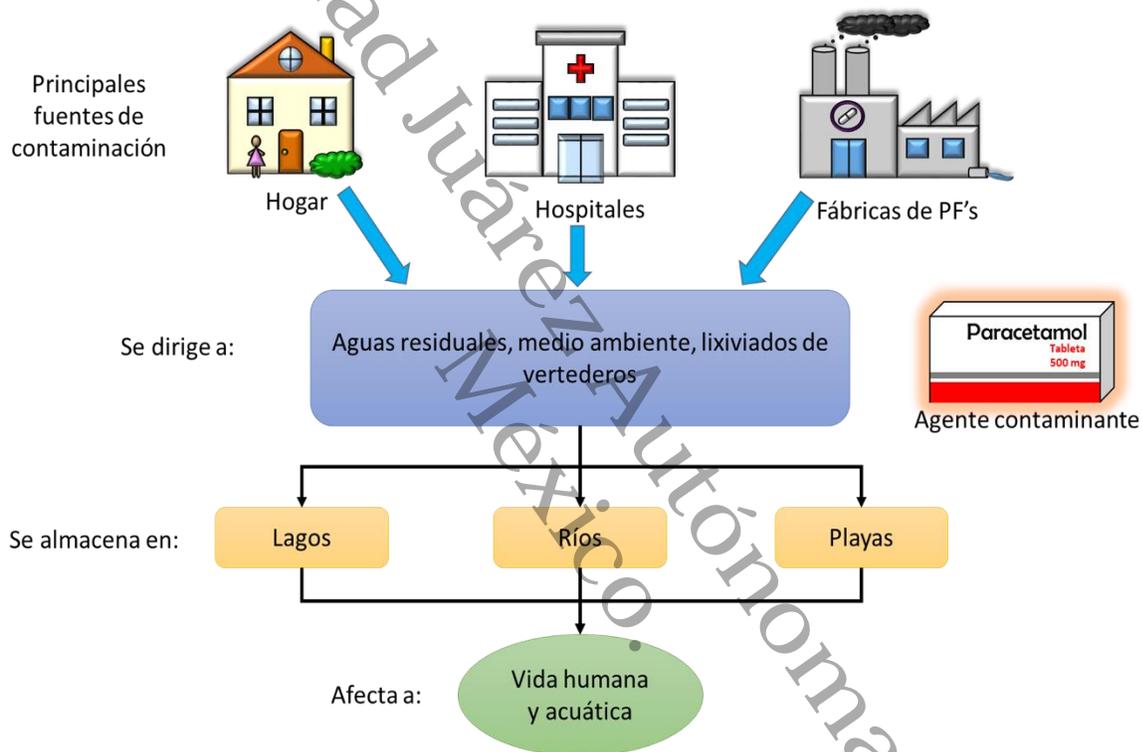


Figura 6. Esquema de las fuentes y el destino del APAP.

Para la detección del paracetamol en los mantos acuíferos se utilizan bioensayos, como el uso de la comunidad zooplanctónica, por su facilidad de cultivo y su extensa distribución geográfica. Esta especie ayuda a evaluar sustancias puras en el agua observando su crecimiento o tasa de reproducción [28]. Según estudios sobre los efectos del fármaco hacia la vida acuática se detectó que algunas especies de peces tienen problemas para su reproducción debido a la feminización de peces machos que estuvieron en contacto con estrógenos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales [29].

2.8. Fotocatálisis.

En el siglo XXI, la humanidad enfrenta problemas graves y urgentes relacionados con el agotamiento de recursos energéticos y la degradación ambiental. Muchos de los recientes premios Nobel en física y química han abordado temas relacionados con la fotoquímica y la química catalítica, así como con materiales o sistemas vinculados a estas disciplinas. La fotocatálisis ha captado gran atención debido a su capacidad para inducir reacciones eficientes y efectivas a temperatura ambiente bajo la irradiación solar, y se considera una tecnología prometedora para convertir la energía solar, limpia, segura y abundante en energía eléctrica y/o química [30]. En 1911, 76 años después de que Berzelius introdujera el término catálisis, el concepto de fotocatálisis comenzó a aparecer en diversas publicaciones científicas. En Alemania, Eibner aplicó este concepto en sus estudios sobre el efecto de la luz en el blanqueo del azul de Prusia utilizando ZnO. Al mismo tiempo, el término fotocatálisis ganó mayor relevancia al ser utilizado en los títulos de artículos que investigaban la degradación del ácido oxálico bajo iluminación en presencia de sales de uranilo (UO_2^{+}) [31].

Se han realizado investigaciones extensas sobre la degradación de sustratos orgánicos en productos finales seguros en medios de aire y agua, utilizando la excitación UV de fotocatalizadores de óxidos metálicos. La elección del fotocatalizador se basa en factores como la banda prohibida adecuada, la alta superficie específica, la disponibilidad y la morfología idónea. Además, la eficacia de la degradación se ve afectada por varios parámetros, como la intensidad de la luz, la naturaleza y concentración del sustrato, el pH, el tiempo de residencia y la temperatura de reacción [32].

2.9. Tipos de fotocatálisis.

2.9.1. Fotocatálisis homogénea.

En los procesos de fotocatálisis homogénea, la habilidad para absorber fotones permite que tanto el contaminante como la luz puedan provocar cambios químicos en el sustrato. Este tipo de fotocatálisis se desarrolló cuando se descubrió que el peróxido de hidrógeno podía ser activado por sales de hierro (Fe) para oxidar el ácido tartárico, lo que dio lugar a lo que se conoce como la “vía de radicales libres” [33]. Este tipo de fotocatálisis se da cuando se observa una activación del peróxido de hidrógeno por sales (Fe), este estímulo

es conocido como reactivo Fenton, aquí se produce radicales hidroxilos formando así un agente oxidante potente a pH ácidos.

2.9.2. Fotocatálisis heterogénea.

Esta reacción consiste en la transformación de energía solar en química sobre la superficie de un compuesto semiconductor que tomará el papel de fotocatalizador [34].

El mecanismo de acción de los fotocatalizadores consiste en la irradiación con luz a una longitud de onda que sea mayor o igual a su banda, se lleva a cabo la absorción de energía lo que provoca que los electrones den un salto de la banda de valencia a la banda de conducción y se induce a la formación de pares electrón-hueco (e^- y h^+) como se observa en la figura 7. Esto se aprovecha para catalizar a través de una reacción redox en el sistema partícula-solución [35]. Durante las investigaciones realizadas para encontrar los fotocatalizadores adecuados para las reacciones fotocatalíticas se han encontrado como posibles materiales a los semiconductores, los óxidos metálicos como: TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , Fe_2O_3 , CeO_2 , WO_3 y SnO_2 por mencionar algunos [36].

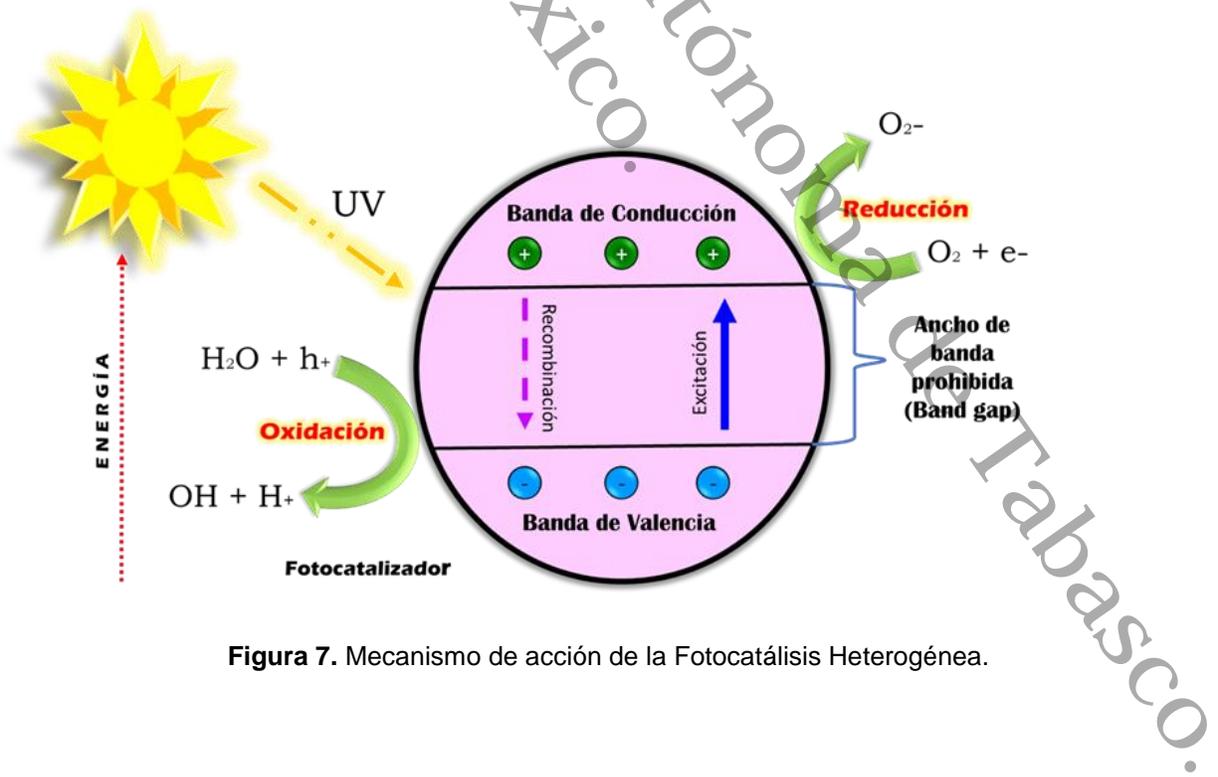


Figura 7. Mecanismo de acción de la Fotocatálisis Heterogénea.

2.10. Remediación ambiental a través de reacciones fotocatalíticas.

Durante las últimas décadas se ha pensado en la preservación del medio ambiente como una necesidad, por lo que se han creado nuevas técnicas para erradicar los contaminantes orgánicos que alteran el ambiente que nos rodea. La contaminación del agua es uno de los focos de mayor importancia e impacto para la sociedad humana ya que los contaminantes llegan a acumularse y resultan dañinos para los seres humanos y para la vida acuática [37].

Utilizar luz solar para un catalizador es considerado hoy en día como una de las aplicaciones de la química verde que cumple con los siguientes objetivos:

1. Economía atómica.
2. Eficiencia energética.
3. Catalizadores mejor que reactivos.
4. Prevención de accidentes [38].

Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO's) son una excelente alternativa para la degradación de compuestos orgánicos que afectan los mantos acuíferos, ya que tienen la capacidad de degradar y mineralizar estos compuestos [39]. Para saber la eficacia de un catalizador usualmente se construye una curva de calibración cuantitativa en el espectrofotómetro Uv-Vis en fase acuosa, esto con la finalidad de saber la concentración del compuesto que se busca degradar en el medio [40].

2.11. Características de los compuestos: ZnO, CeO₂ y WO₃.

El óxido de zinc (ZnO) generalmente se presenta como un polvo blanco en su forma inorgánica. Se utiliza como aditivo en una amplia variedad de productos, que incluyen lubricantes, cosméticos, plásticos, cauchos, ungüentos, suplementos alimenticios, papel, pigmentos, baterías, cerámica, retardantes de fuego, cintas de primeros auxilios y cemento. El ZnO es un semiconductor binario con un ancho de banda de 3,37 eV, perteneciente al grupo de semiconductores II-VI. La ausencia de centrosimetría en su estructura da lugar a superficies polares, lo que convierte al ZnO en un material piezoeléctrico. Esta propiedad le confiere potencial para su uso en sensores y sistemas micromecánicos [41].

El ZnO (Figura 8, a) tiene diversas propiedades las cuales lo hacen ser un compuesto muy utilizado en la síntesis de catalizadores ya que aparte de su actividad fotocatalítica, también cuenta con propiedades antimicrobianas. Las nanopartículas de este compuesto son consideradas no tóxicas, bioseguras y biocompatibles, por lo que su uso en la remediación ambiental no propicia un efecto negativo en el ambiente [42].

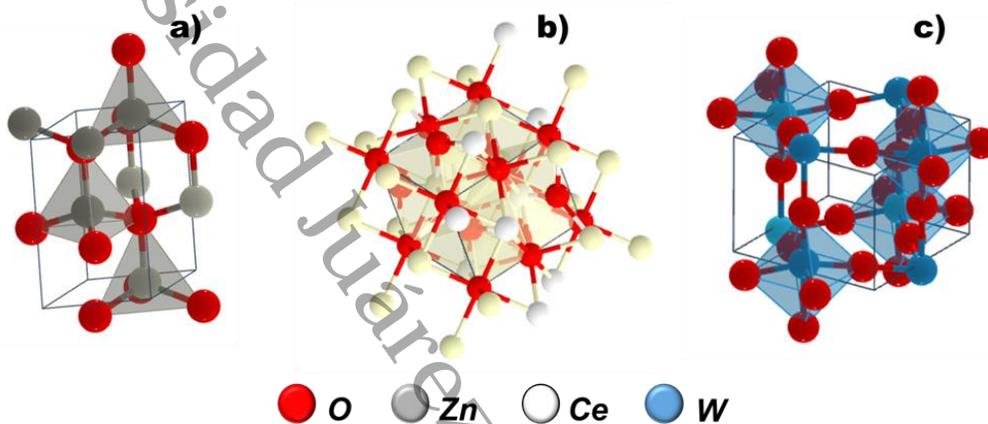


Figura 8. Celdas unitarias del a) ZnO, b) CeO₂ y c) WO₃ [43].

El óxido de cerio (CeO₂) pertenece al grupo de los óxidos de tierras raras dentro de los lantánidos. Su estructura se caracteriza por un empaquetamiento cúbico cerrado de iones de cerio, mientras que los iones de oxígeno ocupan todos los sitios tetraédricos disponibles. Aunque el cerio puede formar óxidos en los estados de oxidación +3 (Ce₂O₃) y +4 (CeO₂), el CeO₂ es más estable y se usa más ampliamente en comparación con Ce₂O₃, debido a su estructura orbital con vacíos en el nivel 4f. El óxido de cerio tiene una constante dieléctrica de 24.5 [44].

El CeO₂ (Figura 8, b) es de interés porque posee propiedades ópticas y eléctricas, una alta capacidad de absorción y almacenamiento del oxígeno. Tiene buena biocompatibilidad ya que es capaz de adherirse a proteínas e incorporarse a células. Compuesto utilizado en la remediación de aguas residuales [45].

Desde principios del siglo XX, el tungsteno y sus óxidos han sido objeto de estudio extensivo. Se han investigado diversas composiciones de aleaciones y óxidos de tungsteno para una amplia gama de aplicaciones. El óxido de tungsteno, WO_x, es un material naturalmente abundante, económico, y de baja toxicidad para los organismos

vivos, además de ser respetuoso con el medio ambiente. Sus propiedades físico-químicas, que incluyen una alta estabilidad química, una combinación favorable de banda prohibida, estructuras cristalinas y características eléctricas y semiconductoras, lo hacen extremadamente versátil para diversas aplicaciones [46].

Finalmente, el trióxido de Tungsteno (WO_3) (Figura 8, c) se caracteriza por ser un material semiconductor con diversas aplicaciones por sus propiedades fotocromáticas, gascromáticas, fotoluminiscencia y para la formación de fotocatalizadores [47]. En la tabla 1 se muestran las propiedades de importancia que se toman en cuenta para la actividad fotocatalítica.

Tabla 1. Propiedades de los precursores.

Nombre	Fórmula	Morfología	Band gap (eV)	Referencia
Óxido de Zinc	ZnO	Cristalino de wurtzita	3.37	[48]
Óxido de Cerio	CeO ₂	Cúbica de fluorita	2.9 y 3.2	[49]
Trióxido de Tungsteno	WO ₃	Monoclínica	2.5 a 2.8	[50]

Los fotocatalizadores puros han sido de gran utilidad para la degradación de compuestos de todo tipo en medios acuosos, sin embargo, en los últimos años se ha considerado como una opción más viable las heterouniones de semiconductores de óxido metálico. Estas heterouniones muestran efectos sinérgicos que mejoran la separación y transferencia de carga, lo que eleva las propiedades redox para reacciones como la detección electroquímica, la biodetección, la detección de gases y reacciones de fotocatalisis [51]. En la tabla 2 se muestran algunas mezclas reportadas en la literatura.

Tabla 2. Heterouniones semiconductoras de los precursores.

Catalizador	Método de síntesis	Rendimiento (%)	Band gap (eV)	Referencia
CeO ₂ -WO ₃	Vía asistida por ultrasonidos junto con el	88.74	2.81	[52]

	método de impregnación húmeda.			
ZnO-WO ₃	Método hidrotermal	70.41	2.42	[53]
CeO ₂ -ZnO	Método hidrotermal	97.10	1.88	[54]

2.12. Fotodegradación de fármacos.

Como se ha mencionado antes, en los últimos años, se ha incrementado la atención hacia los compuestos farmacéuticos como contaminantes ambientales. Estos compuestos, diseñados originalmente para tener efectos biológicos específicos en los seres humanos, también pueden impactar de manera impredecible a otros organismos vivos. Los fármacos ingresan al medio acuático principalmente a través de la ingestión y excreción, ya sea en su forma original o como metabolitos no modificados. Se estima que hay más de 4000 principios activos en aproximadamente 10,000 medicamentos. Diversas investigaciones han demostrado que algunos de estos compuestos farmacéuticos no se eliminan adecuadamente durante el tratamiento de aguas residuales y no se biodegradan en el medio ambiente. En este contexto, la fotocatalisis heterogénea emerge como una solución efectiva para la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos de aguas residuales, utilizando óxidos semiconductores. Este método ha mostrado ser eficaz en la mineralización de fármacos y sus metabolitos en fase acuosa [55].

El acetaminofén es uno de los fármacos más prevalentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Incluso a niveles bajos, este compuesto puede resultar altamente tóxico para los organismos acuáticos [56]. Una alternativa para eliminar este fármaco es a través de procesos de oxidación avanzada. La fotocatalisis heterogénea con semiconductores es uno de los métodos de oxidación avanzada más prometedores para la degradación de acetaminofén, gracias a su alta eficiencia en la degradación y mineralización, su bajo costo, su baja toxicidad y su capacidad para funcionar en condiciones ambientales. La oxidación del acetaminofén puede producir NAPQI y, en consecuencia, 1,4-benzoquinona, lo que puede causar una grave contaminación ambiental. Dado que el acetaminofén y sus metabolitos tienen el potencial de acumularse

en la cadena alimentaria, es urgente desarrollar métodos efectivos para eliminar estos productos farmacéuticos de las soluciones acuosas [57].

2.13. Farmacia y química verde.

Desde 1990, la presencia de medicamentos en el agua potable preocupa tanto a investigadores como al público. Aunque el problema de la contaminación por medicamentos no es reciente, su relevancia aumentó notablemente debido a dos hallazgos importantes. El primero lo realizaron varios químicos analíticos, entre ellos Thomas Ternes, que descubrieron que muchos residuos farmacéuticos humanos estaban en efluentes de aguas tratadas. El segundo hallazgo mostró que el etinilestradiol (EE2) estaba contribuyendo a la feminización de los peces machos en ríos. En la actualidad, no existe un consenso claro sobre cómo denominar este campo de estudio, pero se le ha referido como "Farmacia verde", Farmacia ambiental, o Ecofarmacovigilancia. A continuación, se presentan las definiciones de algunos de estos términos:

- **Ecofarmacovigilancia:** Es la actividad científica que se ocupa de detectar, evaluar, comprender y prevenir los efectos adversos o problemas relacionados con la presencia de fármacos en el medio ambiente, que afectan tanto a humanos como a animales.
- **Farmacia verde y sustentable:** Se refiere al diseño de productos farmacéuticos y procesos que buscan eliminar o reducir significativamente la generación de sustancias peligrosas, así como prevenir y/o reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente y la seguridad [58].

Para evaluar de manera más precisa el riesgo que un fármaco representa para el medio ambiente, es necesario realizar nuevos ensayos de toxicidad que consideren factores específicos como la concentración, el tipo y la distribución de los productos farmacéuticos, así como la farmacocinética de cada fármaco, las dosis terapéuticas, la exposición ambiental, la sensibilidad de los organismos y la transformación estructural de los compuestos químicos a través del metabolismo o la degradación natural. También es crucial evaluar el potencial de bioacumulación de los medicamentos, su toxicidad, biodegradabilidad y capacidad de adsorción. Para abordar esta problemática, la Agencia

de Protección Ambiental (EPA) y otras entidades están desarrollando programas para detectar, priorizar y eliminar estos químicos. Los procesos de oxidación avanzada se presentan como una tecnología prometedora para tratar aguas residuales que contienen productos farmacéuticos y químicos, especialmente aquellos con potencial de alteración endocrina [59].

Por otra parte, la química verde suele asociarse con nuevas tecnologías, pero en esencia, la química verde no es un tipo de química novedosa ni un movimiento ambientalista en contra de la industria o de las nuevas tecnologías. Más bien, se trata de una nueva prioridad ambiental que se integra en la ciencia que ya se está llevando a cabo, sin importar la disciplina científica o las técnicas utilizadas. La química verde se enfoca en la eficiencia combinada con la responsabilidad ambiental. Ambas disciplinas se relacionan ya que ambas se basan en los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental como se muestra en la figura 9 [60].



Figura 9. Los 12 principios de la química verde descrita por John C. Warner y Paul T. Anastas (1988).

3. Justificación.

La degradación de fármacos en agua es esencial para mitigar los impactos negativos en el medio ambiente acuático y la salud pública. La presencia de compuestos farmacéuticos en el agua puede afectar la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, así como representar un riesgo para la salud humana al contaminar el suministro de agua potable [61]. Además, la regulación ambiental cada vez más estricta requiere la reducción de la presencia de contaminantes farmacéuticos en el agua. Por lo tanto, la degradación de fármacos en agua es crucial para proteger la calidad del agua, prevenir la contaminación y cumplir con los estándares ambientales, contribuyendo así a la sostenibilidad y salud de los ecosistemas acuáticos y la sociedad en general [62]. El método de fotocátalisis es un método esencial para la degradación de estos compuestos farmacéuticos, sin embargo, es necesario sintetizar un fotocatalizador con propiedades adecuadas para obtener una eficiente degradación y mineralización a compuestos inocuos [63]. La síntesis de óxidos mixtos en fotocátalisis proporciona una estrategia efectiva para mejorar la actividad catalítica en comparación con los óxidos simples. Estos materiales combinan diferentes óxidos en una estructura mixta, lo que genera sinergia entre los componentes, aumenta la cantidad de sitios activos, mejora la transferencia de carga y amplía el espectro de absorción de luz. Además, la modulación de propiedades fisicoquímicas permite optimizar la eficiencia fotocatalítica y la selectividad [64].

Por tal motivo, en este trabajo de investigación se propone la síntesis del óxido mixto $\text{ZnO-WO}_3\text{-CeO}_2$, para la fotodegradación del acetaminofén en medio acuoso.

4. Pregunta de Investigación.

Los fármacos de consumo humano son contaminantes de gran importancia para el medio ambiente, y el paracetamol, es uno de los más utilizados para tratar varios síntomas, generalmente llega disuelto a las aguas residuales, pero es resistente a los procesos que se utilizan para degradarlo, por lo que en ellas puede acumularse y transformarse en compuestos tóxicos.

¿Los catalizadores de ZnO-WO₃-CeO₂ sintetizados por el método de Combustión en Estado Sólido utilizados en una reacción fotocatalítica son eficaces en la degradación de compuestos farmacéuticos como el paracetamol?

5. Hipótesis.

Las reacciones fotocatalíticas utilizando catalizadores de ZnO, WO₃ y CeO₂, sintetizados por el método Combustión en Estado Sólido pueden ser eficientes en la degradación del paracetamol

6. Objetivos.

6.1. Objetivo general.

Sintetizar los fotocatalizadores ternarios ZnO-WO₃-CeO₂, para la degradación y mineralización del Paracetamol mediante reacciones fotocatalíticas.

6.2. Objetivos específicos.

- Sintetizar los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂ (Relación en % atómico, 50:25:25, 25:50:50, 25:25:50 y 33:33:33) por el método Combustión en Estado Sólido.
- Caracterizar fisicoquímicamente los materiales sintetizados por: DRX, UV-Vis con reflectancia difusa, Adsorción-desorción de N₂, Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).
- Relacionar las propiedades fisicoquímicas con la evaluación catalítica de compuestos farmacéuticos (Paracetamol) mediante reacciones fotocatalíticas.

7. Metodología.

Los fotocatalizadores se sintetizaron en el laboratorio de Nanomateriales catalíticos, fuentes de Energía y Remediación Ambiental, ubicado en el Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT) en la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACB-UJAT), por el método de “combustión en estado sólido”.

7.1. Preparación de los fotocatalizadores mediante el método de combustión en estado sólido.

El proceso de combustión en estado sólido es un método utilizado como una vía alternativa de la síntesis de fotocatalizadores. Este proceso es empleado para la obtención de materiales en forma de polvos cerámicos, metálicos, vidriosos y cementos, de forma eficaz y viable. Esta técnica consiste en utilizar como fuente de energía el calor liberado en la reacción a partir de los reactivos, de esta forma se da lugar a un proceso autosostenido. [65].

Se sintetizaron los fotocatalizadores de ZnO-WO₃-CeO₂ con los precursores: Nitrato de Zinc hexahidratado (Zn(NO₃)₂ * 6H₂O); Nitrato de Cerio hexahidratado (Ce(NO₃)₃ * 6 H₂O) y Metatungstato amónico hidratado ((NH₄)₆ H₂W₁₂O₄₀ * xH₂O) en las proporciones en % atómico 50:25:25, 25:50:25, 25:25:50 y 33:33:33. En la tabla 3 se muestra la clave de identificación de los fotocatalizadores, así como el % asignado a cada uno.

Tabla 3. Clave de identificación del catalizador y variación del porcentaje de cada precursor.

Fotocatalizador	Clave	Zn (%)	W (%)	Ce (%)
ZnO-WO ₃ -CeO ₂	ZnWCe1	50	25	25
	ZnWCe2	25	50	25
	ZnWCe3	25	25	50
	ZnWCe4	33.33	33.33	33.33

Seguidamente de la propuesta de los porcentajes atómicos correspondientes a cada catalizador, se realizó el cálculo correspondiente para la obtención de las cantidades utilizadas de los precursores: (Zn(NO₃)₂, Ce(NO₃)₃ y (NH₄)₆ H₂W₁₂O₄₀), para la síntesis de los materiales. En un vaso de precipitado de 50 mL se añadieron los precursores previamente pesados en 20 mL de una disolución con relación de volumen 1:1 de agua destilada y etanol al 96 % y se homogenizó con agitación constante durante 30 minutos (Figura 10).

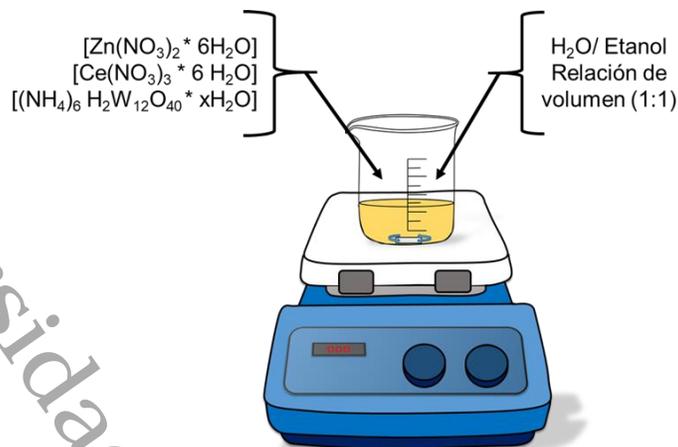


Figura 10. Esquema de síntesis de los fotocatalizadores por el método de Combustión en Estado Sólido. Posteriormente, los materiales fueron secados a una temperatura de 80°C durante 72 hrs. Pasado ese tiempo, se verificó que los materiales estuvieran libres de humedad para extraerlos y llevarlos a calcinación a una temperatura de 500 °C por 720 minutos (12 horas) con una rampa de calentamiento de 2°C/min.

Finalmente, los fotocatalizadores fueron triturados en un mortero de ágata hasta convertirlos en polvo fino para poder ser envasados en viales de vidrio color ámbar y protegerlos de la luz (Figura 11).

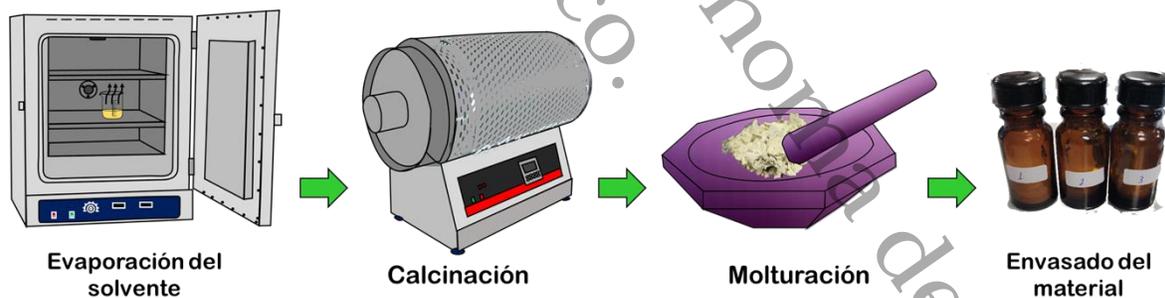


Figura 11. Esquema del sistema de síntesis y almacenamiento del catalizador.

7.2. Técnicas de caracterización.

Se realizaron análisis utilizando técnicas de UV-Vis con reflectancia difusa, Adsorción/Desorción de Nitrógeno (N₂), Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

7.2.1. Adsorción/Desorción de N₂.

La determinación del área específica, el diámetro de poro y el volumen de poro de los fotocatalizadores se llevó a cabo utilizando el método BET en un equipo de medición de áreas superficiales y sistemas porosimétricos, modelo MICROMERITICS TRISTAR 3020 II, operado a 77 K (-196 °C). Se pesó una muestra de 0.1 g, que luego se desgasificó durante 2 horas a 300 °C para eliminar impurezas y obtener el peso neto de la muestra, que se utilizó como dato de referencia en el equipo.

7.2.2. Espectrofotometría UV-Vis con Reflectancia Difusa.

El análisis se realizó utilizando un espectrómetro Shimadzu UV-2600, con un rango de 225 a 600 nm. Este equipo permitió determinar las transiciones electrónicas presentes en los materiales Zn-W-Ce, lo que resultó en la identificación de las bandas de absorción asociadas a la actividad óptica de los fotocatalizadores. Con base en estos datos, se calculó la energía de banda prohibida (E_g), mediante el método de Tauc plot, utilizando la siguiente ecuación para materiales con banda indirecta:

$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

Donde:

α = coeficiente de adsorción del material.

$h\nu$ = energía del fotón incidente (h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la radiación).

A = constante relacionada con las propiedades del material.

E_g = energía de banda prohibida.

n = 2 para transiciones indirectas permitidas.

7.2.3. Difracción de rayos X (DRX).

Los datos de difracción de rayos X se obtuvieron utilizando un difractómetro BRUKER modelo D-8, con radiación CuK α ($\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$), operado a 40 kV y 30 mA. Esta

caracterización permitió identificar los planos y fases cristalinas. Para calcular el tamaño de cristal, se empleó la ecuación de Scherrer [66]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2)$$

Donde:

D= tamaño de la partícula.

K= constante de Scherrer que toma un valor medio de 0.94.

λ = longitud de onda de la radiación.

β = anchura del pico a altura media expresada en radianes.

θ = ángulo de difracción.

7.2.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

El estudio FT-IR de los fotocatalizadores sólidos sintetizados se realizó a temperatura ambiente y presión atmosférica, utilizando un espectrómetro Shimadzu IRAffinity-1 en el rango de frecuencia de 4000 a 400 cm^{-1} . Los espectros FT-IR de los materiales sólidos se obtuvieron a temperatura ambiente y presión atmosférica. Para la preparación de las muestras, el material sólido se comprimió en una pastilla delgada, que luego se colocó en una celda de vidrio Pyrex con ventanas de CaF_2 , acoplada a una línea de vacío. La celda se evacuó in situ a 400 °C durante 30 minutos.

7.3. Reacción fotocatalítica.

La degradación del acetaminofén se realizó utilizando un sistema de evaluación fotocatalítica de luz UV. Se empleó una lámpara UV de 13W y un reactor de vidrio con una capacidad de 250 mL. Antes de iniciar la reacción, se mantuvo el sistema en oscuridad durante 30 minutos para permitir el equilibrio de absorción entre el fármaco y el catalizador.

En el reactor se añadieron 200 mL de una solución de acetaminofén a 30 ppm en agua destilada, a temperatura ambiente, con una concentración de catalizador de 0.5 mg/L de

solución. El reactor se mantuvo en agitación constante y además se utilizó el aire como suministro de oxígeno al sistema (Figura 12). La reacción se llevó a cabo durante un período de 180 minutos (3 horas).

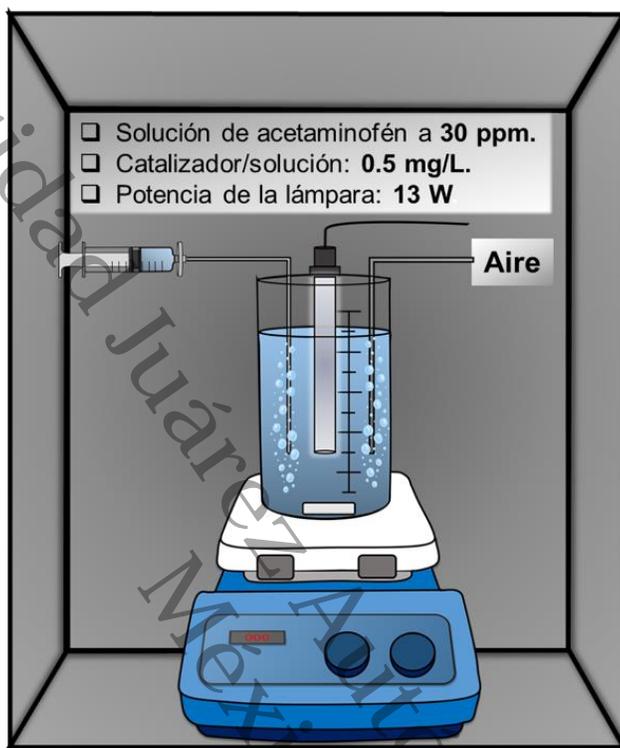


Figura 12. Esquema del sistema de degradación fotocatalítica del acetaminofén.

Para monitorear la actividad catalítica de la reacción, se tomaron muestras de aproximadamente 8 mL de la solución en diferentes intervalos de tiempo (0, 1, 5, 15, 30, 60, 90, 120 y 180 minutos). Las muestras se analizaron posteriormente mediante la técnica de espectrofotometría UV-Vis con el equipo GENESYS g10 s-215t313207 a una longitud de onda máxima de 243 nm. La cuantificación del acetaminofén se realizó mediante una curva de calibración que abarcaba concentraciones de 30, 20, 10, 5, 2 y 1 ppm (anexo A). El porcentaje de degradación (%D) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\%D = \left[\frac{C_t}{C_0} \times 100 \right] \quad (3)$$

Donde:

C_t = la concentración en el tiempo de Acetaminofén.

C_0 = la concentración inicial de Acetaminofén.

8. Resultados.

8.1. Adsorción/Desorción de N_2 .

Los resultados por Adsorción-Desorción de nitrógeno de los fotocatalizadores Zn-W-Ce sintetizados por el método de combustión en estado sólido, se muestran en la tabla 4 y figura 13.

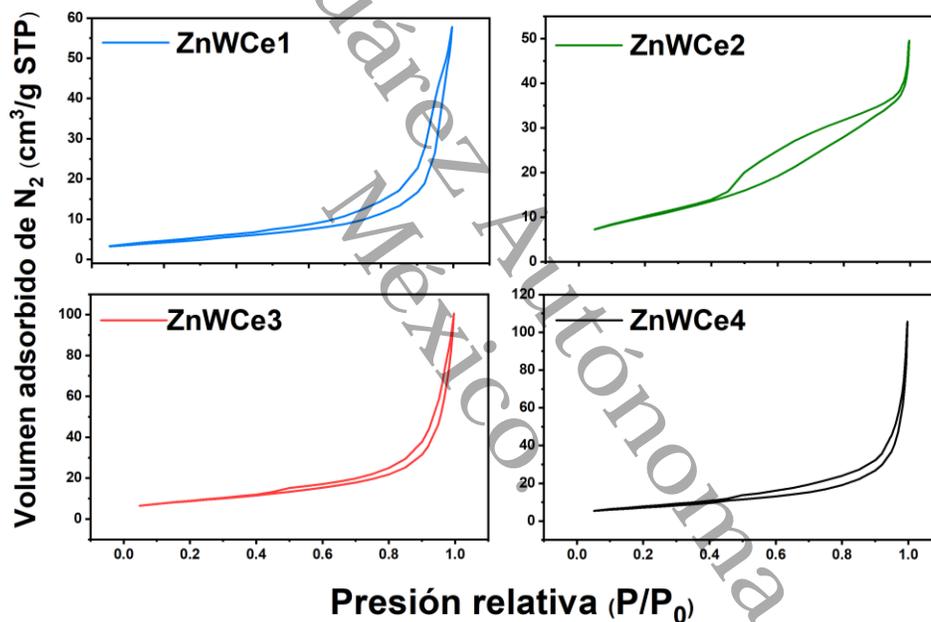


Figura 13. Isothermas de Adsorción-Desorción de los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂ sintetizados a 500°C.

En la figura 13, los fotocatalizadores presentaron un comportamiento adsorción-desorción con una isoterma tipo IV(a), característico de materiales mesoporosos (2-50 nm), por otro lado, los materiales exhibieron un lazo de histeresis tipo H3, característico de la presencia de macroporos que no están completamente llenos de condensado en los poros [67]. En la tabla 4 se muestran los resultados de área específica (A_{Bet}), volumen de poro (V_p) y diámetro de poro (D_p). Los materiales presentaron un área específica entre 15.1 a 36.3 m²/g. El diámetro promedio de poro se determinó por la

ecuación BJH, no se observó un efecto significativo ya que todos los materiales se encuentran alrededor de 3.83 nm.

Tabla 4. Área Específica, Diámetro Promedio de Poro y Volumen de Poro de los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂ a diferentes relaciones atómicas.

Catalizador	A _{Bet}	V _p	D _p
ZnWCe1	15.1 m ² /g	0.089 cc/g	3.83 nm
ZnWCe2	36.3 m ² /g	0.077 cc/g	3.83 nm
ZnWCe3	31.5 m ² /g	0.153 cc/g	3.82 nm
ZnWCe4	25.8 m ² /g	0.163 cc/g	3.83 nm

Por otro lado, se mostraron volúmenes promedio de poro (tabla 4) entre 0.077 y 0.163 cc/g donde los fotocatalizadores que exhibieron un mayor volumen fueron el ZnWCe3 y ZnWCe4 con 0.153 y 0.163 respectivamente.

8.2. Uv-Vis con Reflectancia Difusa.

En esta sección se estudian los espectros de Uv-Vis de los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂ con diferentes porcentajes atómicos de 50:25:25, 25:50:50, 25:25:50 y 33:33:33 respectivamente. Se analizaron las muestras en un intervalo de 225-600 nm.

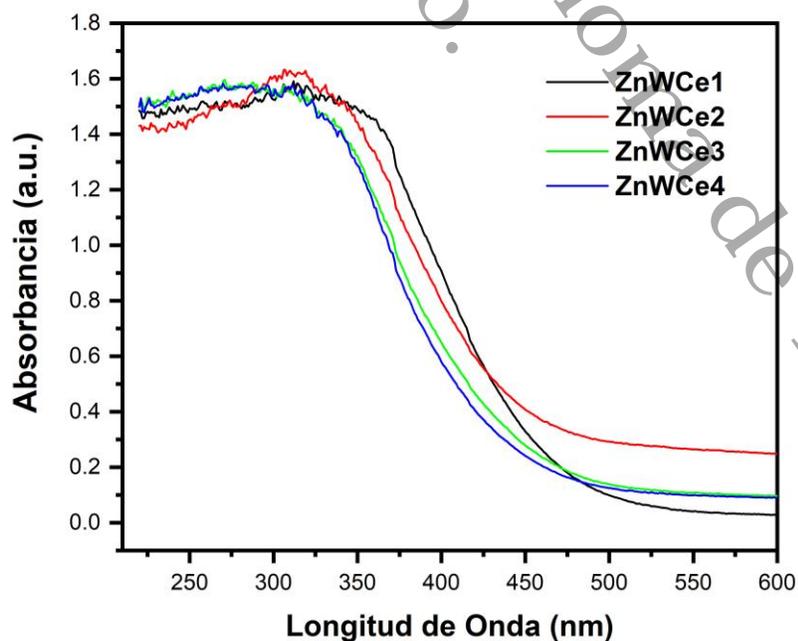


Figura 14. Espectros Uv-Vis de los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂ sintetizados a 500°C.

En la Figura 14 se presentan los espectros de UV-Vis de los fotocatalizadores sintetizados por el método de combustión en estado sólido. De acuerdo con el espectro, se observan las bandas características del estado de oxidación Zn^{2+} , Ce^{4+} y W^{6+} con una longitud de onda de 285, 325 y 385 respectivamente. Asimismo, se exhibió que los fotocatalizadores que contienen mayor concentración de Zn y W presentaron un corrimiento en el borde de absorción desde la región UV hasta la región visible entre 350-450 nm. Este ensanchamiento podría estar asociado a la presencia del $ZnWO_4$ y por la deficiencia de oxígenos de los estados cercanos a la banda de conducción, lo que de acuerdo con Osotsi M. I. et al. favorece la utilización de más fotones hacia la luz solar [68].

Tabla 5. Energía de Banda Prohibida (E_g) de los fotocatalizadores $ZnO-WO_3-CeO_2$.

Catalizador	E_g (eV)
ZnWCe1	2.63
ZnWCe2	2.58
ZnWCe3	2.89
ZnWCe4	2.90

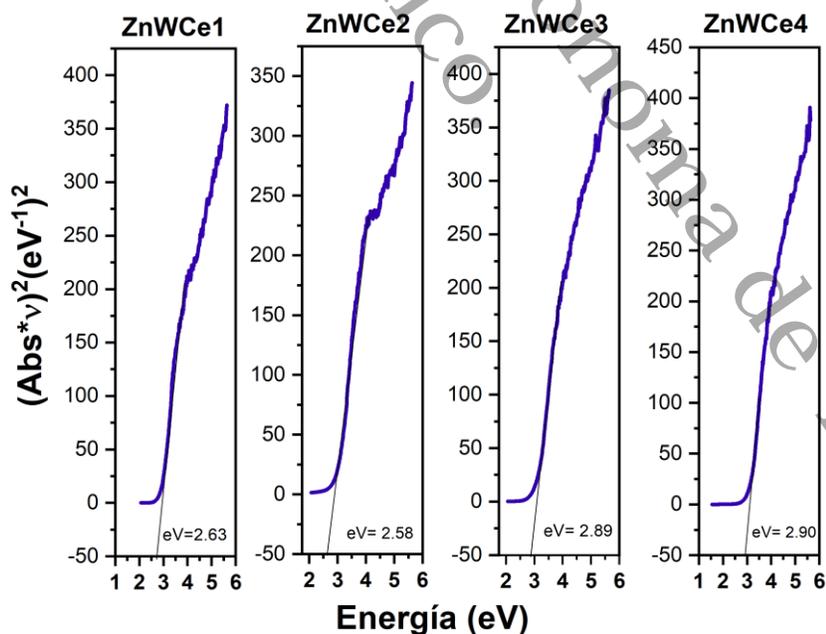


Figura 15. Cálculo por Tauc Plot de los fotocatalizadores $ZnO-WO_3-CeO_2$.

En la tabla 5 se presentan los valores calculados de la energía de Banda Prohibida (E_g) de los fotocatalizadores calculada por la ecuación de Tauc Plot para bandas indirectas. De acuerdo con los resultados obtenidos los fotocatalizadores ZnWCe1 y ZnWCe2 presentaron la menor energía de E_g con 2.63 y 2.58 respectivamente. De acuerdo con esto, este comportamiento favorece a la absorción de fotones de menor energía, es decir, longitudes de onda más largas como lo es la luz visible [69]. En el caso de los ZnWCe3 y ZnWCe4 que tienen mayor concentración de Cerio tienen una E_g más anchas, con 2.89 y 2.90 respectivamente, tal y como se muestra en la figura 15.

8.3. Difracción de rayos X.

Para determinar la estructura del material sintetizado y la cristalinidad se realizó el análisis por la técnica de difracción de rayos x. El estudio se realizó de 20 a 80° en 2θ de los fotocatalizadores sintetizados por el método de combustión en estado sólido y calcinados a 500°C con una rampa de $2^\circ/\text{min}$.

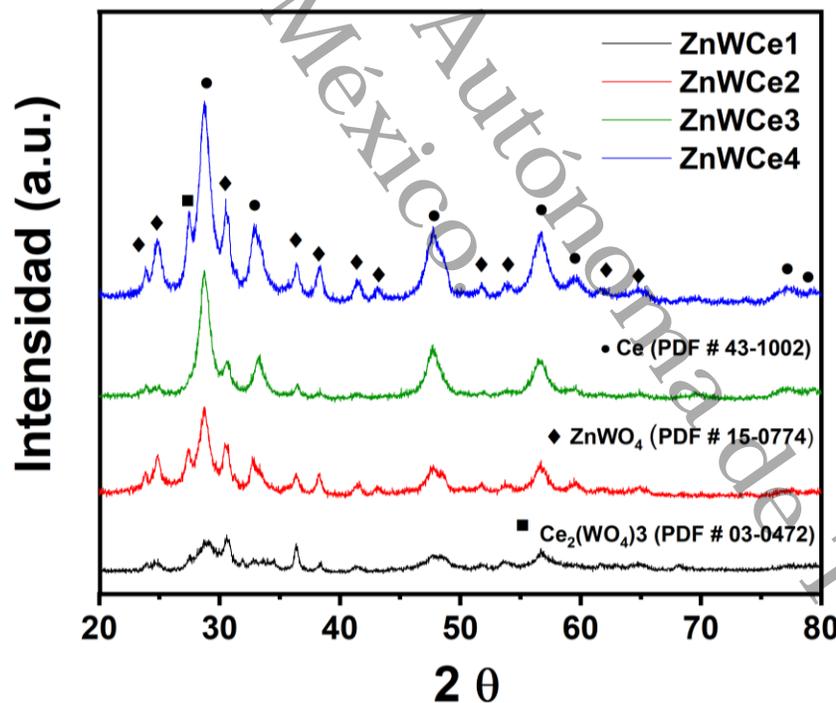


Figura 16. Difractogramas de cada uno de los materiales sintetizados por el método de combustión en estado sólido.

En la figura 16 se muestran los difractogramas de los materiales Zn-W-Ce. Se observaron en todos los fotocatalizadores las señales características de la estructura

del Tungstato de Zinc (ZnWO_4). Esta estructura cristalina está compuesta por la interacción entre el Zinc y el tungstato, el cual cristaliza en una estructura monoclinica. En esta estructura, los átomos de tungsteno (W^{6+}) se encuentran en el centro de tetraedros formados por átomos de oxígeno, y estos tetraedros se conectan entre sí en forma tridimensional. Los átomos de zinc (Zn^{2+}) se encuentran en los espacios intersticiales de esta red (Figura 17) [70]. Donde la señal más intensa se encuentra alrededor de 30.7 grados de 2θ , con un plano cristalino característico de [111].

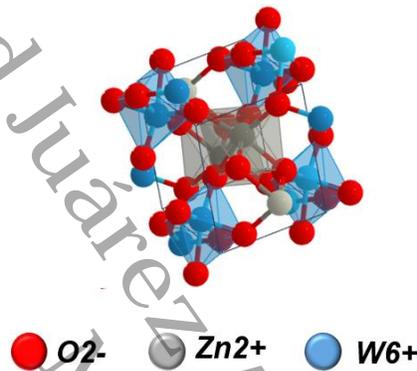


Figura 17. Celda unitaria del ZnWO_4 [71].

En el caso de los fotocatalizadores ZnWCe 1, 2 y 4 se encontró la formación de otro compuesto inorgánico ($\text{Ce}_2(\text{WO}_4)_3$) (Figura 18) el cual fue el Tungstato de Cerio [221], que presenta una estructura monoclinica.

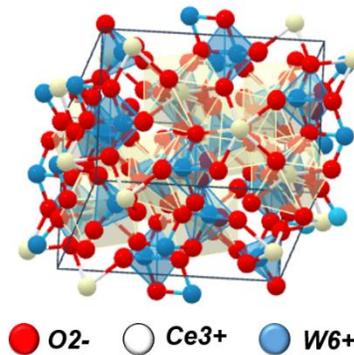


Figura 18. Celda unitaria del $\text{Ce}_2(\text{WO}_4)_3$ [72].

En la Tabla 6. Se presentan los resultados del cálculo del tamaño de Cristalito, utilizando la ecuación de Sherrer, para los fotocatalizadores $\text{ZnO-WO}_3\text{-CeO}_2$. Se estudiaron los planos más abundantes de las fases que coexisten en los fotocatalizadores (CeO_2 [111],

ZnWO₄ [111] y Ce(WO₄)₃ [221]). En el caso del plano característico de CeO₂ se encontraron tamaños de entre 7 y 9 nm, donde el catalizador de ZnWCe2 mostro el mayor tamaño. Por otro lado, el plano [111] del ZnWO₄, exhibio un menor tamaño de cristalito en los materiales ZnWCe1 y ZnWCe3. Para los fotocatalizadores que mostraron la presencia del plano [221] del Ce(WO₄)₃, se encontró que el ZnWCe1 mostro un tamaño de cristalito de 20 nm, siendo casi el doble del tamaño del fotocatalizador ZnWCe2 y 1.5 mayor que el ZnWCe4.

Tabla 6. Tamaño de Cristalito de las fases de los fotocatalizadores ZnO-WO₃-CeO₂.

Catalizador	Tamaño de Cristalito (nm)		
	CeO ₂ [111]*	ZnWO ₄ [111]*	Ce(WO ₄) ₃ [221]*
ZnWCe1	7	9	20
ZnWCe2	9	10	11
ZnWCe3	8	9	-
ZnWCe4	8	10	14

* Ecuación de Sherrer.

8.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

En esta sección se estudiaron los materiales sintetizados Zn-W-Ce a diferentes composiciones. Los espectros se realizaron de los 400 a los 4000 cm⁻¹. Con esta técnica se buscó identificar las vibraciones de los enlaces oxígeno-metal.

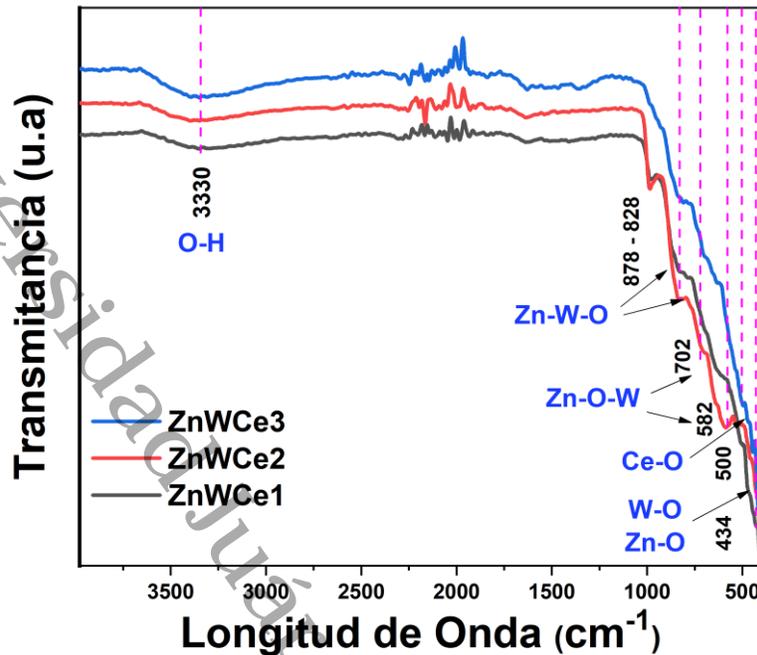


Figura 19. Espectros de FTIR obtenidos de los materiales sintetizados.

En la figura 19 se observan los espectros de FTIR característicos de los materiales Zn-W-Ce. Se puede observar una señal a 3346 cm^{-1} , esta señal está relacionada a las vibraciones de estiramiento de los O-H y la señal 1620 cm^{-1} , está relacionada con la flexión de las vibraciones H-O-H. Las señales son características de agua fisisorbida sobre la superficie de los fotocatalizadores. Esto como resultado de una adsorción disociativa de las moléculas de agua, que se produce por la reducción de la instauración coordinativa de las especies químicas en la superficie de acuerdo con Khalaf, M.M. et al [73]. Por otro lado, las señales entre $878\text{ y }828\text{ cm}^{-1}$ están relacionadas con las bandas de las vibraciones de estiramiento y flexión del Zn-W-O [74,75]. Las señales $705\text{ y }594\text{ cm}^{-1}$ corresponden a las vibraciones simétricas de los átomos de oxígeno que trabajan como puente de los grupos Zn-O-W. Se logró observar una señal alrededor de 500 cm^{-1} característico de las vibraciones Ce-O, así mismo, se logró observar una señal alrededor 434 cm^{-1} que puede ser asignada a los modos de deformación uniforme de los enlaces Zn-O y W-O en los octaedros ZnO_6 y WO_6 respectivamente [76]. Los resultados de esta técnica concuerdan con los resultados obtenidos de difracción de rayos x donde se encontraron las estructuras de CeO_2 y ZnWO_4 .

8.5. Reacción fotocatalítica.

En esta sección se presentan los resultados de la degradación fotocatalítica del acetaminofén utilizando los fotocatalizadores Zn-W-Ce, en un sistema de reacción que empleaba una lámpara de ultravioleta de 13 Watts como energía radiante. Para la degradación se empleó una solución de 30 ppm del fármaco (paracetamol), y se utilizó una relación de 0.5 g/L del fotocatalizador con respecto a la solución. Para el seguimiento de la degradación se realizó una curva de calibración en un espectrofotómetro Uv-Vis utilizando la longitud de onda de 243.5 nm (anexo A).

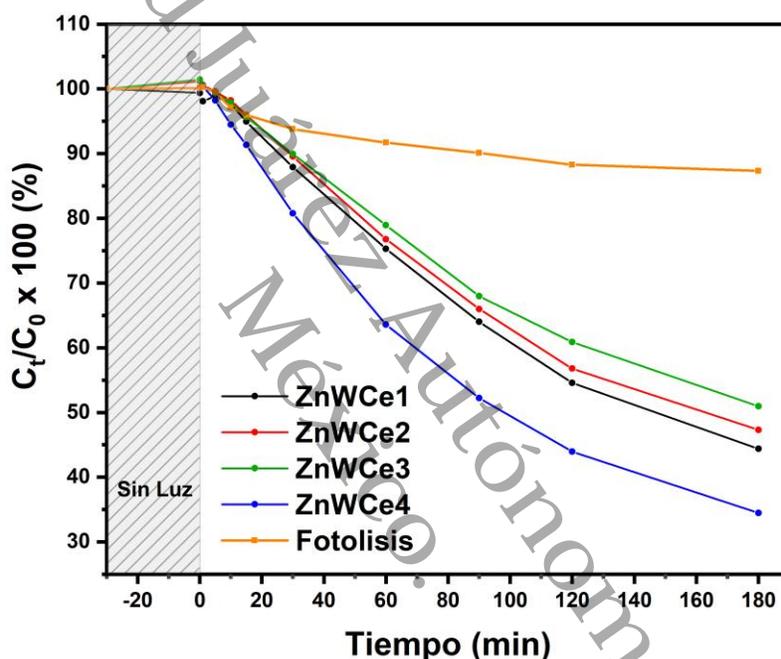


Figura 20. Degradación fotocatalítica del acetaminofén utilizando los fotocatalizadores Zn-W-Ce sintetizados por el método de combustión en estado sólido a 500 °C.

En las últimas décadas el acetaminofén ha tomado importancia debido a que se ha detectado su presencia en aguas residuales, formando parte de los llamados contaminantes emergentes [77]. De acuerdo a lo anterior, en la figura 20 se muestra la degradación fotocatalítica del acetaminofén utilizando los fotocatalizadores Zn-W-Ce. La primera reacción que se estudió fue la fotólisis, en donde no se observó un cambio significativo en la degradación del fármaco. Por otro lado, los fotocatalizadores Zn-W-Ce, obtuvieron una menor concentración del fármaco al final de la reacción, en comparación con la fotólisis. En donde el catalizador ZnWce4 que presenta la relación 1:1:1, mostró

la mejor actividad de degradación ya que solo con la energía de radiación Uv se logró la degradación de hasta un 12.7 %.

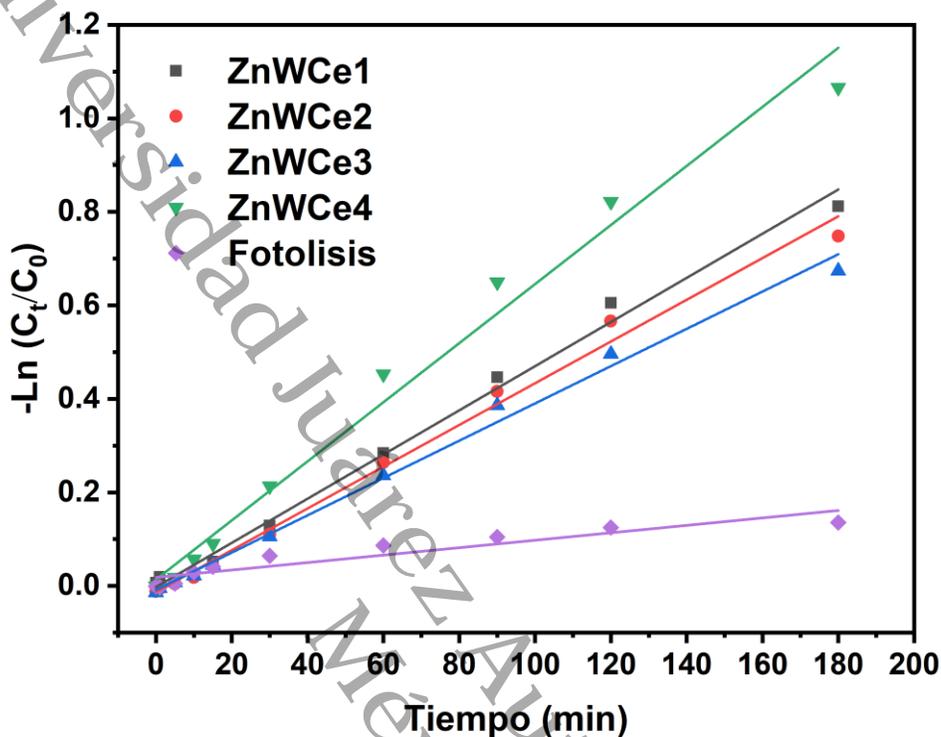


Figura 21. Efecto de la concentración de los fotocatalizadores Zn-W-Ce en la constante de degradación del acetaminofén (pseudo primer orden).

Tabla 7. Porcentaje de degradación y constante de velocidad de la degradación del acetaminofén utilizando fotocatalizadores Zn-W-Ce.

Fotocatalizador	% de Degradación	Constante de velocidad (K, min ⁻¹)
Fotolisis	12.7	0.0008
ZnWce1	55.6	0.0047
ZnWce2	52.7	0.0044
ZnWce3	40.1	0.0039
ZnWce4	65.5	0.0063

Al aplicar el método integral de análisis, se determinó que la velocidad de degradación de la reacción sigue una cinética de pseudo-primer orden, como se ilustra en la figura 21. Para cada fotocatalizador, se obtiene una recta que pasa por el origen, donde la

pendiente representa la constante aparente de pseudo-primer orden de la reacción (K , min^{-1}), como se registra en la tabla 7. Además, se notó que la pendiente varía como efecto del cambio de la concentración del acetaminofén. Esta disminución en la constante de velocidad de reacción con respecto a la concentración del fármaco ha sido ampliamente documentada en estudios sobre reacciones fotocatalíticas, y generalmente se atribuye a que el número de sitios activos en la superficie es limitado [78,79]. La fotólisis presentó una menor degradación, con una constante de velocidad de 0.0008 min^{-1} . En cambio, el fotocatalizador con la mayor constante de velocidad fue el ZnWCe4, que alcanzó un valor de 0.0063 min^{-1} y logró eliminar un 65.5% del fármaco. Por otro lado, los fotocatalizadores ZnWCe1, ZnWCe2 y ZnWCe3 tuvieron constantes de velocidad de 0.0047 , 0.0044 y 0.0039 min^{-1} , respectivamente, y lograron degradar hasta un 55.6%, 52.7% y 40.1%.

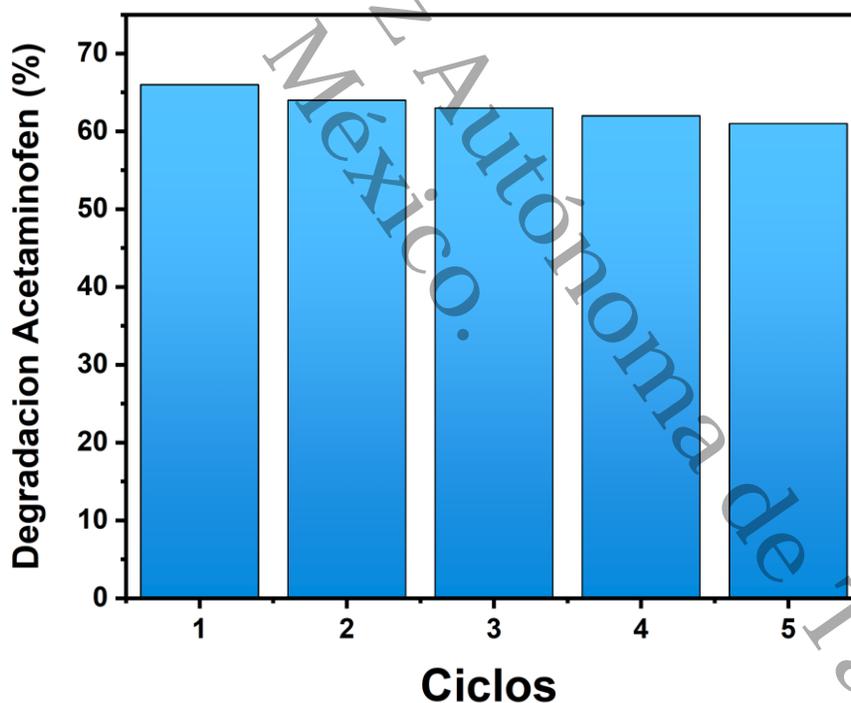


Figura 22. Número de reúsos del fotocatalizador ZnWCe4 sintetizado por el método de combustión en estado sólido a $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se evaluó la reutilización del fotocatalizador con la mejor actividad en la degradación fotocatalítica del acetaminofén, manteniendo las mismas condiciones de reacción. Tras 180 minutos, el fotocatalizador fue recuperado y se dejó reposar durante 24 horas para

facilitar la formación de un precipitado. Luego, se decantó la fase acuosa y se secó a 80 °C. Es relevante mencionar que este residuo del fotocatalizador no recibió tratamientos térmicos para su activación. En la figura 22 se muestran los ciclos de reutilización del fotocatalizador ZnWCe4 en la degradación fotocatalítica del acetaminofén a lo largo de 180 minutos. Se puede observar que la actividad fotocatalítica del ZnWCe4 disminuyó mínimamente en comparación con su primer uso durante la evaluación fotocatalítica del acetaminofén, esto sugiere que el fotocatalizador mantiene un rendimiento eficiente. Se ha reportado que la reducción en la actividad fotocatalítica puede ser causada por cambios en la morfología estructural del material o por un incremento en el tamaño de las partículas después de su reutilización.

9. Discusión.

9.1. Adsorción/Desorción de N₂.

Como ya se describió antes, los fotocatalizadores evaluados exhibieron un comportamiento acorde con isotermas de adsorción/desorción del tipo IVa, según la clasificación de la IUPAC [80], lo que indica que estos materiales presentan características mesoporosas, con tamaños de poro en el rango de 2 a 50 nm. Este tipo de isoterma es típico de materiales que poseen una estructura porosa, lo que facilita la adsorción de moléculas en su superficie y es un factor relevante en su actividad catalítica [81]. Entre los catalizadores estudiados, el ZnWCe2, que tiene un contenido de W del 50% atómico, mostró la mayor área superficial, lo que sugiere que la presencia de W podría estar favoreciendo la formación de una estructura con mayor porosidad o una mejor distribución de los sitios activos [82]. En contraste, el ZnWCe1, que contiene una mayor proporción de Zn, presentó la menor área superficial. Este comportamiento sugiere que un mayor contenido de Zn podría estar afectando la morfología del material, posiblemente reduciendo la formación de poros o la accesibilidad de la superficie, lo que resulta en una menor área específica. Este hallazgo implica que el aumento en el porcentaje atómico de Zn podría reducir la porosidad del catalizador, lo que a su vez disminuye la cantidad de sitios activos disponibles para las reacciones catalíticas [83]. Por lo tanto, la relación entre la composición del material y su área superficial debe considerarse cuidadosamente al diseñar fotocatalizadores más eficientes.

9.2. Uv-Vis con Reflectancia Difusa.

El ZnO puede exhibir una absorción característica en la región UV y con un estado de oxidación de Zn^{2+} , se presenta alrededor de 300 a 350 nm [84]. El ZnO es un semiconductor tipo n (band gap de 3.3 eV), esta característica principalmente debido a los defectos intrínsecos, que pueden ser vacancias de oxígeno presentes en la estructura cristalina del ZnO [85]. El CeO_2 es un semiconductor tipo n con una banda prohibida (band gap) de 3.1 eV. [86]. El Cerio es conocido por su fuerte absorbancia en el rango ultravioleta, donde se pueden identificar dos bandas características, una señal alrededor de 250 nm. y otra a 297 nm. Estas bandas se atribuyen a transferencias de carga de O^{2-} a Ce^{3+} y de O^{2-} a Ce^{4+} , respectivamente [87]. El WO_3 es un material que presenta una fuerte absorción en el rango Uv-Vis, con un borde de absorción entre los 400 y 470 nm, esta absorción debido a las transferencias de carga entre el O^{2-} y el W^{6+} y muestra una energía de Band Gap de 2.6 a 3.0 eV [88].

De acuerdo con la difracción de rayos x, se observa la coexistencia en todas las muestras de las estructuras del CeO_2 y la aleación entre el Zn y W, que como consecuencia da la formación del tungstato de zinc ($ZnWO_4$). El $ZnWO_4$ de acuerdo con la literatura presenta propiedades ópticas y buena estabilidad química, con una energía E_g de 3.75 eV, con una configuración electrónica d^{10} , s^2-d^0 . Así mismo presenta un alto borde de banda de valencia, un alto índice de refracción y un corto decaimiento de fluorescencia

9.3. Difracción de rayos X.

En la figura 16 se muestran los difractogramas de los materiales Zn-W-Ce. El ZnO puede presentar 3 diferentes fases: entre estas la wurtzita hexagonal [89], zincblenda cubica [90], y en fase de roca salina [91].

La fase más común del ZnO, es la fase hexagonal tipo wurtzita. Esta presenta un número de coordinación igual a cuatro, esto debido a que cada átomo de Zn cuenta con cuatro átomos vecinos de Oxígeno [92]. Por otro lado, el CeO_2 se presenta como una estructura tipo fluorita (cúbica), el cual presenta un grupo espacial $Fm3m$ que contiene Ce^{4+} el cual se encuentra coordinado con 8 átomos de Oxígeno, siendo esta la fase más estable del material [93]. El WO_3 , de acuerdo con la literatura, puede presentar una estructura ortorrómbica ($\gamma-WO_3$), monoclinica ($\alpha-WO_3$) y cubica ($\beta-WO_3$). Donde las estructuras

ortorrómbicas y cubica son las más comunes [94]. En el caso de este trabajo de investigación no se logró observar ninguna de las estructuras del ZnO y WO₃, únicamente observándose en todas las muestras la estructura del CeO₂ en los ángulos de 2 θ: 28.7, 33.2, 47.6, 56.6, 59.4, 77.2 y 79.37, donde el pico más abundante es el de 28.7 con el plano [111] (JCPDS No. 43-1002).

Como ya se mencionó con anterioridad, se encontró Ce₂(WO₄)₃ en los catalizadores ZnWCe 1, 2 y 4, este compuesto cristalino presenta una estructura monoclinica, el cual se organiza de tal manera que los tetraedros de tungsteno (WO₄) están conectados y rodeados por átomos de Cerio. Estos átomos de tungsteno forman una red tridimensional con los enlaces y se crea una estructura estable. De acuerdo con la literatura esta estructura puede influir en sus propiedades ópticas y electrónicas [95].

La evaluación del tamaño de cristalito en fotocatalizadores ZnO-WO₄-CeO₂, utilizando la ecuación de Scherrer, ha permitido observar variaciones notables en los tamaños de cristalitos de las fases coexisten, tales como CeO₂, ZnWO₄ y Ce(WO₄)₃. Los resultados obtenidos revelan que el CeO₂ exhibe un mayor tamaño de cristalito en el plano [111], con tamaños que oscilan entre 7 y 9 nm. Esto indica una posible mejora en la cristalinidad y estabilidad de la fase CeO₂ debido a la interacción con los otros componentes en la mezcla [96], tanto los estudios teóricos como los experimentales han evidenciado que las superficies [100] y [110] de CeO₂ son más susceptibles a la reducción y poseen una mayor actividad que la superficie [111] [97]. La coimpregnación de CeO₂ con otros óxidos metálicos, como WO₃, puede aumentar la estabilidad estructural y mejorar la dispersión de fases activas [98].

Además, el análisis de la fase Ce(WO₄)₃, observada en los fotocatalizadores ZnWCe1, ZnWCe2 y ZnWCe4, reveló un tamaño de cristalito de 20 nm para el ZnWCe1, siendo casi el doble que el de ZnWCe2 y 1.5 veces mayor que el de ZnWCe4. Este hallazgo sugiere que un mayor contenido de Zn puede favorecer el crecimiento de cristalitos más grandes de Ce(WO₄)₃[99].

9.4. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

La caracterización mediante espectros FTIR de materiales basados en Zn-W-Ce revela información crucial sobre las interacciones químicas y estructurales de estos sistemas.

Las señales observadas a 3346 y 1620 cm^{-1} están relacionadas con la presencia de agua fisisorbida en la superficie de los fotocatalizadores. Adicionalmente, las señales en el rango de 878-828 cm^{-1} se asocian con las bandas de estiramiento y flexión del enlace Zn-W-O, un resultado común en estructuras donde estos elementos forman compuestos complejos, como se observa en materiales con propiedades fotocatalíticas avanzadas [100]. Las señales a 705 y 594 cm^{-1} , que representan vibraciones simétricas del oxígeno como puente en los grupos Zn-O-W, confirman la formación de enlaces característicos de óxidos mixtos, corroborando estudios previos sobre la química de estos compuestos [101].

En conjunto, estos resultados reflejan la compatibilidad de los datos obtenidos por técnicas complementarias y destacan las interacciones estructurales entre las especies presentes en los fotocatalizadores Zn-W-Ce, respaldando su potencial en aplicaciones donde las propiedades superficiales juegan un rol crucial.

9.5. Reacción fotocatalítica.

Los resultados obtenidos indican que la eficiencia de degradación del fármaco mediante procesos de fotocatálisis depende en gran medida del tipo de fotocatalizador empleado. Con una constante de velocidad de degradación de 0.0008 min^{-1} , la fotólisis presentó el menor rendimiento, lo cual era previsible ya que este proceso depende exclusivamente de la interacción entre la radiación y el contaminante sin la presencia de un catalizador. Esto concuerda con estudios previos donde se ha señalado que la fotólisis directa suele ser limitada en la eliminación de compuestos orgánicos complejos, particularmente aquellos con estructuras químicas estables y baja absorbancia en el rango UV-visible [102].

El fotocatalizador con mejor desempeño fue el ZnWCE4, que alcanzó una constante de velocidad de 0.0063 min^{-1} , logrando degradar un 65.5% del fármaco. Este resultado puede atribuirse a que en su estructura se encontró la coexistencia de ZnWO_4 y $\text{Ce}_2(\text{WO}_4)_3$. Esta última estructura se ha empleado junto con otros compuestos en procesos de fotodegradación de contaminantes orgánicos bajo luz visible y se encuentra reportado que la estructura cristalina del $\text{Ce}_2(\text{WO}_4)_3$ facilita la adsorción de moléculas reactivas en su superficie [103]. Además, su disposición atómica favorece una

separación eficiente de cargas, lo que permite que los pares electrón-hueco participen activamente en las reacciones químicas en lugar de recombinarse [104,105]. Estas características químicas y estructurales hacen del $Ce_2(WO_4)_3$ un material altamente prometedor para aplicaciones en fotocatalisis.

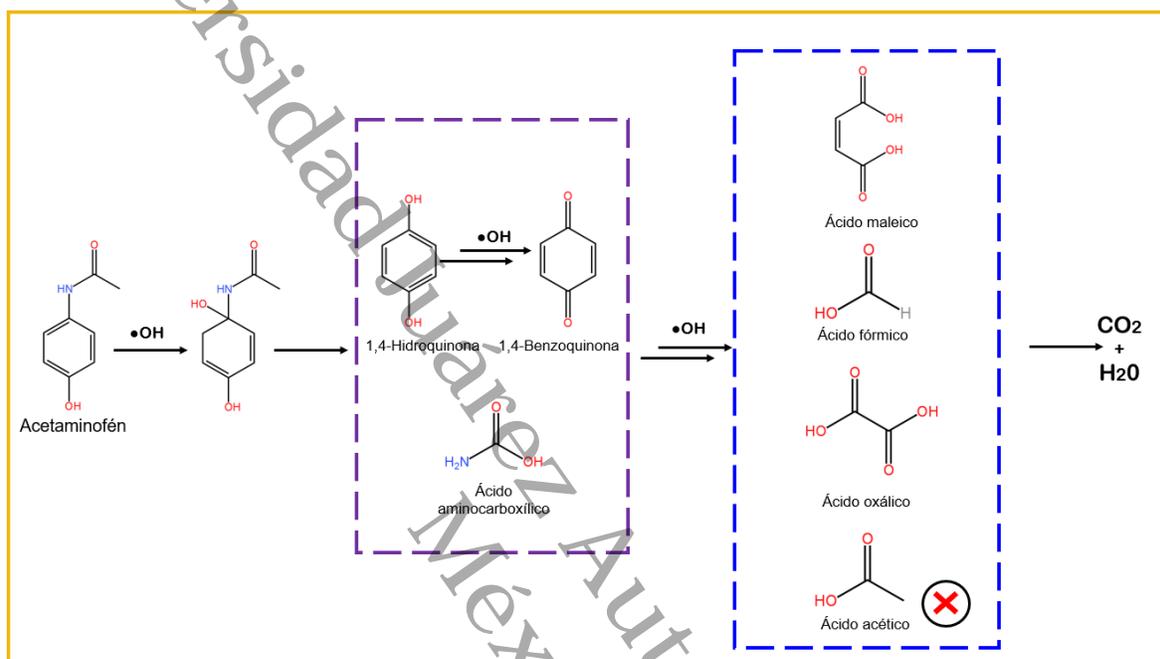


Figura 23. Posibles rutas de fotodegradación del Acetaminofén [106, 107, 108].

En la figura 23 se presentan las posibles rutas de fotodegradación del acetaminofén propuestas en este trabajo. Esto se incluye debido a que no fue posible evaluar directamente la mineralización completa de la molécula. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que, mediante fotocatalisis heterogénea, es posible alcanzar un alto grado de mineralización para el acetaminofén [109]. En el proceso, el ataque electrofílico de los radicales $\bullet OH$ sobre el acetaminofén genera compuestos intermedios como el ácido aminocarboxílico y la 1,4-hidroquinona. La oxidación de la 1,4-hidroquinona puede seguir diferentes rutas, conduciendo a la formación de 1,4-benzoquinona. Posteriormente, el ataque de $\bullet OH$ en el anillo bencénico provoca su descomposición e hidroxilación, lo que lleva a la generación de ácidos dicarboxílicos como el ácido maleico, ácido fórmico, ácido oxálico y ácido acético [110].

Cabe destacar que el ácido acético no es deseado, ya que puede dar lugar a subproductos adicionales y generar radicales libres que podrían ser tóxicos o perjudiciales para el medio ambiente [111]. Finalmente, los productos intermedios experimentan una mineralización completa, dando como resultado final la formación de H_2O y CO_2 .

10. Conclusiones.

El objetivo inicial de esta investigación era sintetizar un catalizador ternario compuesto por $ZnO-WO_3-CeO_2$, sin embargo, los análisis de caracterización por DRX revelaron la formación de compuestos como $ZnWO_4$ y $Ce_2(WO_4)_3$, y dejando en mayor proporción la estructura del CeO_2 en la composición final de los materiales.

La técnica de adsorción-desorción, de N_2 , mostró la formación de materiales mesoporosos, con áreas específicas de entre 15.1 y 36.3 m^2/g , en donde el de mayor área fue el catalizador de $ZnWCe2$.

Los catalizadores exhibieron un E_g de 2.58 a 2.90, donde los materiales con menor cantidad de cerio presentaron la menor energía de banda prohibida ($ZnWCe1$ y 2).

La actividad fotocatalítica del material obtenido mediante el método de combustión en estado sólido se asoció principalmente a la presencia del $ZnWO_4$ y $Ce_2(WO_4)_3$, los cuales se detectaron en mayor proporción en el fotocatalizador $ZnWCe4$, sintetizado con una relación en % atómico de 33:33:33.

La variación en la proporción atómica de los fotocatalizadores tuvo un impacto significativo en su actividad fotocatalítica, según los materiales sintetizados mediante el método de combustión en estado sólido. Entre ellos, el fotocatalizador $ZnWCe4$, con una proporción en % atómico de 33:33:33, mostró el mayor porcentaje de degradación, mientras que el $ZnWCe3$ con una proporción en % atómico de 25:25:50, que contenía una mayor cantidad de CeO_2 , presentó la menor eficiencia en la degradación durante la reacción.

El CeO₂ no resulto ideal en la combinación con el ZnO₂ y el WO₃, ya que en este caso limitó la actividad fotocatalítica de los demás compuestos, lo que impidió alcanzar resultados más favorables.

11. Referencias.

- [1] E., M., M.b., S., & P.e., J. (2019). Photocatalytic activity of ZnO-WO₃ for diclofenac degradation under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 383, 111993. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111993>
- [2] Collada Sánchez, V. L., Villamañán Bueno, E., Ayllón Morales, M., Ruano Encinar, M., Sobreino Jimenez, C., Lara Catedra, C., Perez Andreu, E., & Herrero Ambrosio, A. (2023). [Artículo traducido] Farmacia hospitalaria ecológica: Un enfoque sostenible del proceso de utilización de medicamentos en un hospital de tercer nivel. *Farmacia Hospitalaria*, 47(5), T196-T200. <https://doi.org/10.1016/j.farma.2023.08.001>
- [3] Checa Artos, M., Sosa Del Castillo, D., Ruiz Barzola, O., & Barcos-Arias, M. (2021). Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente. *Bionatura*, 6(1), 1618-1627. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.27>
- [4] Acevedo Barrios, R. L., Severiche Sierra, C. A., & Jaimes Morales, J. del C. (2017). Efectos tóxicos del paracetamol en la salud humana y el ambiente. *RIAA*, 8(1), 139-149.
- [5] Loayza Huachaca, M., & Tandaypan Zuñiga, E. K. (2022). Tipos de procesos de oxidación avanzada para aguas residuales procedentes de la industria textil: Una revisión sistemática. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/104019>
- [6] De Araujo Scharnberg, A. R., Loreto, A. C. de, Wermuth, T. B., Alves, A. K., Arcaro, S., Santos, P. A. M. dos, & Rodriguez, A. de A. L. (2020). Porous ceramic

supported TiO₂ nanoparticles: Enhanced photocatalytic activity for Rhodamine B degradation. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 59(6), 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.12.001>

[7] Zapata S., C. E., & Marín Sepúlveda, J. M. (2005). *Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocátalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/7628>

[8] Morocho, S., Cuesta, S., & Meneses, L. (2017). Caracterización de los productos intermedios en la ruta sintética del acetaminofén. *infoANALÍTICA*, 5(1), 25-39.

[9] Mancipe, L. C., Fernández A, D. C., & Fernández, D. G. (2010). Intoxicación por acetaminofén. *Revista Med de la Facultad de Medicina*, 18(2), 5.

[10] Fateixa, S., Mulandez, O., Nogueira, H. I. S., & Trindade, T. (2023). Raman imaging studies on the stability of Paracetamol tablets under different storage conditions. *Vibrational Spectroscopy*, 124, 103488. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103488>

[11] Cuesta, S., Vela, C., Meneses, L., & Morocho, S. (2017). Modelación molecular de la interacción del paracetamol y el 4-aminofenol con las enzimas Ciclooxygenasa 1 y 2. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 38(2), Article 2. <https://doi.org/10.26807/remcb.v38i2.546>

[12] Józwiak-Bebenista, M., & Nowak, J. Z. (2014). Paracetamol: Mechanism of action, applications and safety concern. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 71(1), 11-23.

[13] Ayoub, S. S. (2021). Paracetamol (acetaminophen): A familiar drug with an unexplained mechanism of action. *Temperature*, 8(4), 351-371. <https://doi.org/10.1080/23328940.2021.1886392>

- [14] Martin, L., Jimenez, N., & Lynn, A. M. (2017). Farmacología del desarrollo de analgésicos opioides y no esteroideos en neonatos e infantes. *Revista Colombiana de Anestesiología*, 45(1), 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.rca.2016.10.005>
- [15] Munné, P., Saenz Bañuelos, J. J., Izura, J. J., Burillo-Putze, G., & Nogué, S. (2003). Intoxicaciones medicamentosas (II): Analgésicos y anticonvulsivantes. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26, 65-97.
- [16] Buxton, I. L. O. (2023). Pharmacokinetics: The Dynamics of Drug Absorption, Distribution, Metabolism, and Elimination. En L. L. Brunton & B. C. Knollmann (Eds.), *Goodman & Gilman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics* (14th Edition). McGraw-Hill Education. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1193226397
- [17] (2015). Paracetamol solución oral (acetaminofén). *Revista Cubana de Farmacia*, 49(3) Recuperado en 28 de marzo de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003475152015000300019&lng=es&tlng=es
- [18] Ortiz-Pereda, V., López, M., Arroita, A., Aguilera, L., Azkue, J., Torre-Mollinedo, F., & Isla-Baranda, A. (2007). Antiinflamatorios no esteroideos y paracetamol en el tratamiento del dolor. *Gaceta Médica de Bilbao*, 104(4), 148-155. [https://doi.org/10.1016/S0304-4858\(07\)74595-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4858(07)74595-X)
- [19] Jaeschke, H., Murray, F. J., Monnot, A. D., Jacobson-Kram, D., Cohen, S. M., Hardisty, J. F., Atillasoy, E., Hermanowski-Vosatka, A., Kuffner, E., Wikoff, D., Chappell, G. A., Bandara, S. B., Deore, M., Pitchaiyan, S. K., & Eichenbaum, G. (2021). Assessment of the biochemical pathways for acetaminophen toxicity: Implications for its carcinogenic hazard potential. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 120, 104859. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104859>

- [20] Anderson, B. J. (2008). Paracetamol (Acetaminophen): Mechanisms of action. *Pediatric Anesthesia*, 18(10), 915-921. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9592.2008.02764.x>
- [21] Mazaleuskaya, L. L., Sangkuhl, K., Thorn, C. F., FitzGerald, G. A., Altman, R. B., & Klein, T. E. (2015). PharmGKB summary: Pathways of acetaminophen metabolism at the therapeutic versus toxic doses. *Pharmacogenetics and Genomics*, 25(8), 416-426. <https://doi.org/10.1097/FPC.000000000000150>
- [22] Forrest, J. A., Clements, J. A., & Prescott, L. F. (1982). Clinical pharmacokinetics of paracetamol. *Clinical Pharmacokinetics*, 7(2), 93-107. <https://doi.org/10.2165/00003088-198207020-00001>
- [23] Tian, L., Mi, N., Wang, L., Huang, C., Fu, W., Bai, M., Gao, L., Ma, H., Zhang, C., Lu, Y., Zhao, J., Zhang, X., Jiang, N., Lin, Y., Yue, P., Xia, B., He, Q., Yuan, J., & Meng, W. (2024). Regular use of paracetamol and risk of liver cancer: A prospective cohort study. *BMC Cancer*, 24(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s12885-023-11767-5>
- [24] González Rivera, L. A., Chino Cruz, M. R., May Lozano, M., Iuga, C., & Martínez Delgadillo, S. A. (2020). Degradación fotocatalítica del paracetamol utilizando diferentes fotocatalizadores de TiO₂ dopados con grafeno y plata. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*. Año 6, número 6 (enero-diciembre de 2020). ISSN: 2448-6663. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/7740>
- [25] Bravo, V., Román, M., Bettini, M., Cerda, P., Mieres, J. J., Paris, E., & Ríos, J. C. (2012). Caracterización de la ingestión por sobredosis de paracetamol: Reporte de un centro de información toxicológica chileno. *Revista médica de Chile*, 140(3), 313-318. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872012000300005>
- [26] Sisamón, D. I. A. (2005). ACERCA DE LA HEPATOTOXICIDAD DEL PARACETAMOL. *Revista del Hospital Privado de Comunidad* 2003, 6(2). [26] Farré, M. L., Pérez, S., Kantiani, L., & Barceló, D. (2008). Fate and toxicity of emerging

pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 27(11), 991-1007. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.09.010>

[27] Fent, K., Weston, A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76(2), 122-159. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.09.009>

[28] Iannacone, J., & Alvarino, L. (2009). EVALUACIÓN DEL RIESGO ACUÁTICO DE SIETE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS SOBRE *Daphnia magna*. *Ecología Aplicada*, 8(1-2), 71. <https://doi.org/10.21704/rea.v8i1-2.384>

[29] Bila, D. M., & Dezotti, M. (2003). Fármacos no meio ambiente. *Química Nova*, 26, 523-530. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015>

[30] Zhang, J., Tian, B., Wang, L., Xing, M., & Lei, J. (2018). *Photocatalysis: Fundamentals, Materials and Applications* (Vol. 100). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2113-9>

[31] Coronado, J. M. (2013). A Historical Introduction to Photocatalysis. En J. M. Coronado, F. Fresno, M. D. Hernández-Alonso, & R. Portela (Eds.), *Design of Advanced Photocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications* (pp. 1-4). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5061-9_1

[32] Ahmad, K., Ghatak, H. R., & Ahuja, S. M. (2020). A review on photocatalytic remediation of environmental pollutants and H₂ production through water splitting: A sustainable approach. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100893. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100893>

- [33] Teheran, L. A. A., & Benitez, A. O. (s. f.). *DEGRADACIÓN POR FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA (FOTO-FENTON) DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS DE FENOL*.
- [34] Arrojo Viejo, S. (2022). Descontaminación de aguas residuales mediante fotocatalisis. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 46, 5.
- [35] FUJISHIMA, A., HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature* 238, 37–38 (1972). <https://doi.org/10.1038/238037a0>
- [36] Byrne, J. A., Fernandez-Ibañez, P. A., Dunlop, P. S. M., Alrousan, D. M. A., & Hamilton, J. W. J. (2011). Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review. *International Journal of Photoenergy*, 2011, e798051. <https://doi.org/10.1155/2011/798051>
- [37] Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A., & Santamaría Arango, J. J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 83-92.
- [38] Martín Rubio, A. (2017). Fotocatalisis como mejora de la descontaminación de aguas por microorganismos. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 26, 1.
- [39] Flores Jerónimo, G., Guerrero Salazar, C. A., González González, V., Guerrero Salas, T., & Lozano, T. (2020). Evaluación de la actividad fotocatalítica de compósitos ZnS-rGO. *Ingenierías*, 23(86), 25-34.
- [40] Calderón Peña, J., Bello Hernández, D. E., & Delgado Niño, P. (2019). Remediación fotocatalítica de aguas residuales simuladas contaminadas con tetraciclina. *Avances: Investigacion en Ingeniería*, 16(1), 130-140.

- [41] Wang, Z., Bockstaller, M. R., & Matyjaszewski, K. (2021). Synthesis and Applications of ZnO/Polymer Nanohybrids. *ACS Materials Letters*, 3(5), 599-621. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00145>
- [42] Galeas Hurtado, S. G., Salas Balseca, G. F., Rosas, N., Guerrero Barragán, V. H., & Debut, A. (2016). Síntesis de Nanopartículas de ZnO por el Método de Pechini. *Revista Politécnica*, 38(1), 35-35.
- [43] *Materials Project*. (s. f.). Materials Project. Recuperado 28 de agosto de 2024, de <https://next-gen.materialsproject.org/materials?formula=CeO2>
- [44] Pathak, V., Lad, P., Thakkar, A. B., Thakor, P., Deshpande, M. P., & Pandya, S. (2023). Synthesis, characterization and applications of cubic fluorite cerium oxide nanoparticles: A comprehensive study. *Results in Surfaces and Interfaces*, 11, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100111>
- [45] Vega Garita, V., Matamoros Quesada, J., & Vega-Baudrit, J.-R. (2014). Síntesis de CeO₂: Propiedades del sol-gel y caracterización de las nanopartículas obtenidas. *Tecnología en Marcha*, 27(3), 62-69.
- [46] Mardare, C. C., & Hassel, A. W. (2019). Review on the Versatility of Tungsten Oxide Coatings. *Physica Status Solidi (a)*, 216(12), 1900047. <https://doi.org/10.1002/pssa.201900047>
- [47] Flores-Mena, J., Diaz-Reyes, J., & Balderas-López, J. (2012). Structural properties of WO₃ dependent of the annealing temperature deposited by hot-filament metal oxide deposition. *Revista mexicana de física*, 58, 504-509.
- [48] Borysiewicz, M. A. (2019). ZnO as a Functional Material, a Review. *Crystals*, 9(10), 505. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>

- [49] Lara Lopez, Y. (2016). *SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN COMPOSITO CARBÓN-TiO₂-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DE FENOL*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4077>
- [50] Dutta, V., Sharma, S., Raizada, P., Thakur, V. K., Khan, A. A. P., Saini, V., Asiri, A. M., & Singh, P. (2021). An overview on WO₃ based photocatalyst for environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 105018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105018>
- [51] Manikanika, Chopra, L., & Kumar, R. (2024). Combustion-synthesized ZnO-CeO heterojunctions for advanced photocatalytic dye degradation2. *Inorganic Chemistry Communications*, 160, 111896. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111896>
- [52] Zhang, H., Zhu, Y., Nutakki, T. U. K., Alghassab, M. A., Alkhalaf, S., Islam, S., & Elmasry, Y. (2024). Preparation of CeO₂-WO₃ binary heterojunction photocatalyst for sustainable tetracycline degradation: Optimization of synthesis and degradation conditions, characterization, transformation pathway, and dominant reactive species. *Surfaces and Interfaces*, 44, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103793>
- [53] Xu, Y., & Chen, T. (2023). Development of nanostructured based ZnO@WO photocatalyst and its photocatalytic and electrochemical properties: Degradation of Rhodamine B3. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(4), 100055. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100055>
- [54] Fathima Khyrun, S. M., Jegatha Christy, A., Mayandi, J., & Sagadevan, S. (2024). Synergistic effect of nano-floret CeO/ZnO nanocomposite as an efficient photocatalyst for environmental remediation2. *Ceramics International*, 50(7, Part B), 11817-11832. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.086>
- [55] Yurdakal, S., Loddo, V., Augugliaro, V., Berber, H., Palmisano, G., & Palmisano, L. (2007). Photodegradation of pharmaceutical drugs in aqueous TiO₂ suspensions:

Mechanism and kinetics. *Catalysis Today*, 129(1-2), 9-15.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.06.044>

[56] Pham, V. L.; Kim, D.-G.; Ko, S.-O. (2020). Advanced Oxidative Degradation of Acetaminophen by Carbon Catalysts: Radical vs Non-Radical Pathways. *Environmental Research*, 188, 109767. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109767>

[57] Palas, B.; Ersöz, G.; Atalay, S. (2019). Bioinspired Metal Oxide Particles as Efficient Wet Air Oxidation and Photocatalytic Oxidation Catalysts for the Degradation of Acetaminophen in Aqueous Phase. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109367>

[58] Moreno-Ortiz, V. C., Martínez-Núñez, J. M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L. A., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 44(4), 17-29.

[59] González, M., Sánchez-Rodríguez, S., Castro-Pastrana, L., Flores de la Torre, J., & López-Luna, A. (2016). Ecofarmacovigilancia. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. ISSN 2221-2450, 47, 12-16.

[60] Tucker, J. L. (2006). Green Chemistry, a Pharmaceutical Perspective. *Organic Process Research & Development*, 10(2), 315-319. <https://doi.org/10.1021/op050227k>

[61] Schulz-Bañares, B., Sandoval-Cifuentes, C., Sandoval-Quijada, T., & Müller-Ramírez, C. (2021). Residuos farmacéuticos domiciliarios en el medio ambiente: De la preocupación a la acción. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 45, e155. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.155>

- [62] Moreno-Ortiz, V., Juan Manuel, M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). *Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente*. 44, 17-29.
- [63] Escobar-Alarcón, L., Solís-Casados, D. A., Escobar-Alarcón, L., & Solís-Casados, D. A. (2021). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 14(26). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- [64] Espinosa, E. A. (2015). Síntesis y caracterización de óxidos mixtos Ce_{0.8}Zr_xLa_{0.2-x}O₂ y su evaluación en la eliminación catalítica simultánea del negro de carbón y óxidos de nitrógeno. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*. 607-615.
- [65] Sandoval, D. M., Gaona J, S., & Caneiro, A. (2008). Síntesis y caracterización de Hexaferrita de bario por el método de combustión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 28(1), 29-37.
- [66] Aparicio Ceja, M. E., Carbajal Arizaga, G. G., Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- [67] Parra, R., Puello-Polo, E., & Brito, J. (2018). Efecto de la carburación con CH₄/H₂ de (NH₄)₄[NiMo₃W₃O₂₄H₆]•5H₂O y (NH₄)₄[NiMo₆O₂₄H₆]•5H₂O en la hidrodesulfuración de tiofeno. *ITECKNE*, 15, 17. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1960>
- [68] Osotsi, M. I., Macharia, D. K., Zhu, B., Wang, Z., Shen, X., Liu, Z., Zhang, L., & Chen, Z. (2018). Synthesis of ZnWO_{4-x} nanorods with oxygen vacancy for efficient

photocatalytic degradation of tetracycline. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(4), 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.01.007>

[69] Kong, X.-Y., Choo, Y. Y., Chai, S.-P., Soh, A. K., & Mohamed, A. R. (2016). Oxygen vacancy induced Bi₂WO₆ for the realization of photocatalytic CO₂ reduction over the full solar spectrum: from the UV to the NIR region. *Chemical Communications*, 52(99), 14242–14245. <https://doi.org/10.1039/c6cc07750a>

[70] Kumar, P., Verma, S., Korošič, N. Č., Žener, B., & Štangar, U. L. (2022). Increasing the photocatalytic efficiency of ZnWO₄ by synthesizing a Bi₂WO₆/ZnWO₄ composite photocatalyst. *Catalysis Today*, 397-399, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.012>

[71] *Materials Project*. (s. f.). Materials Project. Recuperado 07 de octubre de 2024, de <https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-18918?formula=ZnWO4>

[72] *Materials Project*. (s. f.). Materials Project. Recuperado 12 de octubre de 2024, de <https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-18918?formula=ZnWO4>

[73] Khalaf, M. M., & Abdelhamid, A. A. (2016). Sol–gel Derived Mixed Oxide Zirconia: Titania Green Heterogeneous Catalysts and Their Performance in Acridine Derivatives Synthesis. *Catalysis Letters*, 146(3), 645-655. <https://doi.org/10.1007/s10562-015-1677-2>

[74] García-Benjume, M. L., Espitia-Cabrera, M. I., & Contreras-García, M. E. (2012). Enhanced Photocatalytic Activity of Hierarchical Macro-Mesoporous Anatase by ZrO₂ Incorporation. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2012/609561>

[75] Yuan, Q., Liu, Y., Li, L.-L., Li, Z.-X., Fang, C.-J., Duan, W.-T., Li, X.-G., & Yan, C.-H. (2009). Highly ordered mesoporous titania–zirconia photocatalyst for applications in

degradation of rhodamine-B and hydrogen evolution. *Microporous and Mesoporous Materials*, 124(1), 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.05.006>

[76] Geetha, G. V., Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C., & Ganesh, V. (2021). Photocatalytic degradation of methylene blue dye using ZnWO₄ catalyst prepared by a simple co-precipitation technique. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 97(3), 572-580. <https://doi.org/10.1007/s10971-021-05480-7>

[77] Ponce Álvarez, S. (2015). Degradación fotocatalítica de paracetamol en aguas, utilizando nanopartículas de TiO₂ soportado sobre esferas de vidrio. *En Anuario de Investigaciones*, 138-139. <https://hdl.handle.net/20.500.12724/3271>

[78] Qi, N., Zhang, H., Jin, B., & Zhang, K. (2011). CFD modelling of hydrodynamics and degradation kinetics in an annular slurry photocatalytic reactor for wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.068>

[79] Hamdi El Najjar, N., Touffet, A., Deborde, M., Journel, R., & Karpel Vel Leitner, N. (2014). Kinetics of paracetamol oxidation by ozone and hydroxyl radicals, formation of transformation products and toxicity. *Separation and Purification Technology*, 136, 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.004>

[80] Martín-Martínez, J. M. (1990). *Adsorción física de gases y vapores por carbones*. Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones. ISBN 84-86809-33-9, 376 p. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4291>

[81] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

- [82] Alvez, G., Garcia, R., Arriagada, R., & Cid, R. (1999). ARCILLAS PILAREADAS II. HIDRODESULFURACION DE TIOFENO SOBRE CATALIZADORES Ni,W SOPORTADOS SOBRE ARCILLAS PILAREADAS. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 44(3), 337-344. <https://doi.org/10.4067/S0366-16441999000300010>
- [83] Fuentes, E., Ruiz, J., Pajaro, A., Faro Jr, A., Silva, T., Mansur, J., & Rangel, M. C. (2014, septiembre 14). *Uso y caracterización de catalizadores de Cu/ZnO/Al₂O₃ para la reacción WGS*.
- [84] Al-Bataineh, Q. M., Telfah, M., Ahmad, A. A., Alsaad, A. M., Qattan, I. A., Baaziz, H., Charifi, Z., & Telfah, A. (2020). Synthesis, Crystallography, Microstructure, Crystal Defects, Optical and Optoelectronic Properties of ZnO:CeO₂ Mixed Oxide Thin Films. *Photonics*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/photonics7040112>
- [85] Al-Bataineh, Q. M., Alsaad, A. M., Ahmad, A. A., & Al-Sawalmih, A. (2019). Structural, Electronic and Optical Characterization of ZnO Thin Film-Seeded Platforms for ZnO Nanostructures: Sol-Gel Method Versus Ab Initio Calculations. *Journal of Electronic Materials*, 48(8), 5028-5038. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07303-6>
- [86] Ahmed, S. H., Bakiro, M., Aljasmí, F. I. A., Albreiki, A. M. O., Bayane, S., & Alzamly, A. (2020). Investigation of the band gap and photocatalytic properties of CeO₂/rGO composites. *Molecular Catalysis*, 486, 110874. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.110874>
- [87] Domínguez, C. U., Torres, J. G. T., & Lopez, I. C. (2016). Síntesis y caracterización de trióxidos Al-Zr-Ce por el método Sol-Gel. *Journal of Basic Sciences*, 2(6), Article 6. <https://doi.org/10.19136/jobs.a2n6.1903>
- [88] Murillo Sierra, J. C. (2021). *Actividad fotocatalítica de la heterounión WO₃/ZnS bajo luz UV-Vis en la degradación de contaminantes emergentes y conversión de CO₂* [Phd, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/22361/>

- [89] Ratana, T., Amornpitoksuk, P., Ratana, T., & Suwanboon, S. (2009). The wide band gap of highly oriented nanocrystalline Al doped ZnO thin films from sol-gel dip coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 470(1-2), 408-412. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.081>
- [90] Segura, A., Sans, J. A., Manjón, F. J., Muñoz, A., & Herrera-Cabrera, M. J. (2003). Optical properties and electronic structure of rock-salt ZnO under pressure. *Applied Physics Letters*, 83(2), 278-280. <https://doi.org/10.1063/1.1591995>
- [91] Tovar, E. (2013). *Preparación y caracterización de películas delgadas de ZnO para su uso en estructuras vidrio/ITO/ZnO/CdS*.
- [92] Ellmer, K., Klein, A., & Rech, B. (2007). *Transparent Conductive Zinc Oxide: Basics and Applications in Thin Film Solar Cells*. Springer Science & Business Media.
- [93] Trovarelli, A. (1996). Catalytic Properties of Ceria and CeO₂-Containing Materials. *Catalysis Reviews*, 38(4), 439-520. <https://doi.org/10.1080/01614949608006464>
- [94] Buch, V. R., Chawla, A. K., & Rawal, S. K. (2016). Review on electrochromic property for WO₃ thin films using different deposition techniques. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1429-1437. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.025>
- [95] Jose, A., John, M., H., H., Kuriakose, S., K.p., B., & Varghese, T. (2021). Characterization of Ce₂(WO₄)₃ nanocrystals for potential applications. *Results in Surfaces and Interfaces*, 4, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2021.100020>
- [96] Wang, X., Wang, J., Sun, Y., Li, K., Shang, T., & Wan, Y. (2022). Recent advances and perspectives of CeO₂-based catalysts: Electronic properties and applications for energy storage and conversion. *Frontiers in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1089708>

- [97] Trovarelli, A., & Llorca, J. (2017). Ceria Catalysts at Nanoscale: How Do Crystal Shapes Shape Catalysis? *ACS Catalysis*, 7(7), 4716-4735. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b01246>
- [98] Fan, R., Li, Z., Wang, Y., Zhang, C., Wang, Y., Ding, Z., Guo, X., & Wang, R. (s. f.). Effects of WO₃ and SiO₂ doping on CeO₂-TiO₂ catalysts for selective catalytic reduction of NO with ammonia. *RSC Advances*, 10(10), 5845-5852. <https://doi.org/10.1039/d0ra00053a>
- [99] Júnior, E. A. A., Xavier Nobre, F., Silva Sousa, G. da, Santos Cavalcante, L., Santos, M. R. de M. C., Leandro Souza, F., & Matos, J. M. E. de. (2017). Synthesis, growth mechanism, optical properties and catalytic activity of ZnO microcrystals obtained via hydrothermal processing. *RSC Advances*, 7(39), 24263-24281. <https://doi.org/10.1039/C7RA03277C>
- [100] Massoudi, J., Smari, M., Nouri, K., Dhahri, E., Khirouni, K., Bertaina, S., Bessais, L., & Kebir Hlil, E. (2020). Magnetic and spectroscopic properties of Ni-Zn-Al ferrite spinel: From the nanoscale to microscale. *RSC Advances*, 10(57), 34556-34580. <https://doi.org/10.1039/D0RA05522K>
- [101] Pavithra, N. S., Nagaraju, G., & Patil, S. B. (2021). Ionic liquid-assisted hydrothermal synthesis of ZnWO₄ nanoparticles used for photocatalytic applications. *Ionics*, 27(8), 3533-3541. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-04123-9>
- [102] Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*, 44(10), 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>

- [103] Ahilandeswari, G., & Arivuoli, D. (2022). Investigation of Ce₂(WO₄)₃/g-C₃N₄ nanocomposite for degradation of industrial pollutants through sunlight-driven photocatalysis. *Applied Physics A*, 128(8), 705. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05846-w>
- [104] Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1), 1-21. [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2)
- [105] Channei, D., Chansaenpak, K., Phanichphant, S., Jannoey, P., Khanitchaidecha, W., & Nakaruk, A. (2021). Synthesis and Characterization of WO₃/CeO₂ Heterostructured Nanoparticles for Photodegradation of Indigo Carmine Dye. *ACS Omega*, 6(30), 19771-19777. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02453>
- [106] Yanyan, L., Kurniawan, T. A., Ying, Z., Albadarin, A. B., & Walker, G. (2017). Enhanced photocatalytic degradation of acetaminophen from wastewater using WO₃/TiO₂/SiO₂ composite under UV–VIS irradiation. *Journal of Molecular Liquids*, 243, 761-770. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.08.092>
- [107] Nasr, O., Mohamed, O., Al-Shirbini, A.-S., & Abdel-Wahab, A.-M. (2019). Photocatalytic degradation of acetaminophen over Ag, Au and Pt loaded TiO₂ using solar light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 374, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.01.032>
- [108] Kar, P., Shukla, K., Jain, P., Sathiyam, G., & Gupta, R. K. (2021). Semiconductor based photocatalysts for detoxification of emerging pharmaceutical pollutants from aquatic systems: A critical review. *Nano Materials Science*, 3(1), 25-46. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.11.001>

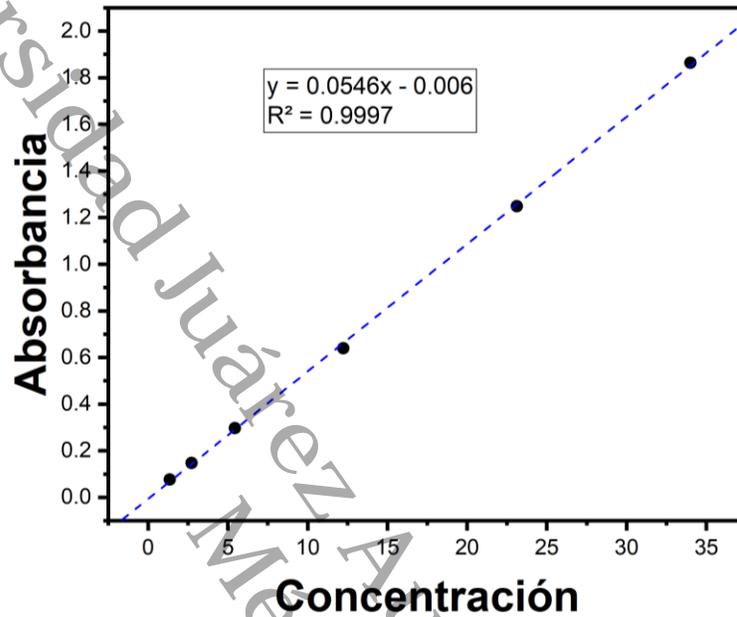
[109] Neamtu, M., Bobu, M., Kettrup, A., & Siminiceanu, I. (2013). Ozone photolysis of paracetamol in aqueous solution. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(10), 1264-1271. <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.776898>

[110] Moctezuma, E., Leyva, E., Aguilar, C. A., Luna, R. A., & Montalvo, C. (2012). Photocatalytic degradation of paracetamol: Intermediates and total reaction mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 243, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.010>

[111] Fan, G., Peng, H., Zhang, J., Zheng, X., Zhu, G., Wang, S., & Hong, L. (2018). Degradation of acetaminophen in aqueous solution under visible light irradiation by Bi-modified titanate nanomaterials: Morphology effect, kinetics and mechanism. *Catalysis Science & Technology*, 8(22), 5906-5919. <https://doi.org/10.1039/C8CY01614C>

12. Anexos.

Anexo A. Curva de calibración del acetaminofén teórica a 30 ppm, real a 35 ppm.



Anexo B. Cálculos para la Síntesis de ZnO- WO₃-CeO₂.

Proporciones (2gr)	
50:25:25	1-0.5-0.5
25:25:50	0.5-0.5-1
25:50:25	0.5-1-0.5
33:33:33	1-1-1
p.m.	
Metales	g/mol
Zn	65.38
Ce	140.16
W	183.84

Peso molar nitruros	g/mol	Pureza %
Zn(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	297.49	0.98
Ce(NO ₃) ₃ * 6H ₂ O	434.22	0.999
(NH ₄) ₆ H ₂ W ₁₂ O ₄₀ * nH ₂ O	2974.3	0.999

Moles de catalizador			
	Zn	Ce	W
1-0.5-0.5	0.0152952	0.0076476	0.0076476
0.5-0.5-1	0.00271976	0.00271976	0.00543951
0.5-1-0.5	0.00356735	0.0071347	0.00356735
1-1-1	0.01009483	0.01009483	0.01009483

Gramos de catalizador			
Zn	Ce	W	Total
1	1.07188743	1.40593454	3.47782196
0.177817668	0.38120104	1	1.55901871
0.233233447	1	0.65582192	1.88905537
0.66	1.4148914	1.85583359	3.93072499

Masico			
Zn	Ce	W	Total
0.287536283	0.30820653	0.40425719	1
0.11405743	0.24451345	0.64142912	1
0.123465649	0.52936511	0.34716929	1
0.167907956	0.35995685	0.47213519	1

Masico 2gr			
Zn	Ce	W	Total
0.575072566	0.61641305	0.80851438	2
0.22811486	0.4890269	1.28285824	2
0.246931299	1.05873022	0.69433848	2
0.335815912	0.71991371	0.94427038	2

Gramos de sal		
Zn	Ce	W
2.56434339	1.90775697	1.0889721
1.017201772	1.51350539	1.72785649
1.101107376	3.27669887	0.93519083
1.497458524	2.22888454	1.27181917

Anexo C. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Digital.

Título de Tesis:	“FOTOCATALIZADORES ZnO-WO ₃ -CeO ₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DEL ACETAMINOFÉN (PARACETAMOL)”
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Yara del Socorro Hernández Corzo Dr. Adib Abiu Silahua Pavón Dr. Adrián Cervantes Uribe.
ORCID:	Yara del Socorro Hernández Corzo [https://orcid.org/0009-0000-6572-7006] Dr. Adib Abiu Silahua Pavón [https://orcid.org/0000-0001-5344-1430] Dr. Adrián Cervantes Uribe [https://orcid.org/0000-0002-4472-0347]
Resumen de Tesis:	<p>La contaminación del agua es una de las principales problemáticas que se busca abordar mediante diversas estrategias. La fotocatalisis se destaca como un método de oxidación avanzada que emplea un catalizador semiconductor junto con luz solar o radiación ultravioleta (UV) para generar radicales hidroxilos altamente reactivos, capaces de oxidar y degradar contaminantes orgánicos, como los fármacos. En esta investigación, se planteó la síntesis de un óxido mixto compuesto por ZnO-WO₃-CeO₂, utilizando el método de combustión en estado sólido, con el objetivo de degradar acetaminofén (paracetamol) mediante fotocatalisis. Los materiales se sintetizaron a diferentes % atómicos (50:25:25, 25:50:25, 25:25:50 y 33:33:33) y fueron calcinados a 500 °C por 12 horas con una rampa de calentamiento de 2°C/min. La caracterización de los fotocatalizadores se realizó mediante las técnicas de Absorción/Desorción de N₂,</p>

	<p>Espectrofotometría Uv-Vis con Reflectancia Difusa, Difracción de rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). La degradación del acetaminofén se realizó utilizando un sistema de evaluación fotocatalítica de luz UV, en un reactor de vidrio de 200 mL con una solución de acetaminofén a 30 ppm en agua destilada con una concentración de catalizador de 0.5 mg/L. La reacción se realizó durante un período de 180 minutos donde se tomaron alícuotas a diferentes tiempos (0, 1, 5, 15, 30, 60, 90, 120 y 180 minutos). La muestra se analizó mediante la técnica de espectrofotometría UV-Vis con el equipo GENESYS g10 s-2l5t313207 a una longitud de onda máxima de 243 nm. El fotocatalizador con mejor desempeño fue el ZnWCe4, que alcanzó una degradación de un 65.5% del fármaco.</p>
<p>Palabras clave de la Tesis:</p>	<p>Contaminación, fotocatalisis, acetaminofén, ZnO-WO₃-CeO₂, degradación.</p>
<p>Referencias citadas:</p>	<p>[1] E., M., M.b., S., & P.e., J. (2019). Photocatalytic activity of ZnO-WO₃ for diclofenac degradation under visible light irradiation. <i>Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry</i>, 383, 111993. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111993</p> <p>[2] Collada Sánchez, V. L., Villamañán Bueno, E., Ayllón Morales, M., Ruano Encinar, M., Sobreño Jimenez, C., Lara Catedra, C., Perez Andreu, E., & Herrero Ambrosio, A. (2023). [Artículo traducido] Farmacia hospitalaria ecológica: Un enfoque sostenible del proceso de utilización de medicamentos en un hospital de tercer nivel. <i>Farmacia Hospitalaria</i>, 47(5), T196-T200. https://doi.org/10.1016/j.farma.2023.08.001</p>

<p style="text-align: center; opacity: 0.5; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco </p>	<p>[3] Checa Artos, M., Sosa Del Castillo, D., Ruiz Barzola, O., & Barcos-Arias, M. (2021). Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente. <i>Bionatura</i>, 6(1), 1618-1627. https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.27</p> <p>[4] Acevedo Barrios, R. L., Severiche Sierra, C. A., & Jaimes Morales, J. del C. (2017). Efectos tóxicos del paracetamol en la salud humana y el ambiente. <i>RIAA</i>, 8(1), 139-149.</p> <p>[5] Loayza Huachaca, M., & Tandaypan Zuñiga, E. K. (2022). Tipos de procesos de oxidación avanzada para aguas residuales procedentes de la industria textil: Una revisión sistemática. <i>Repositorio Institucional - UCV</i>. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/104019</p> <p>[6] De Araujo Scharnberg, A. R., Loreto, A. C. de, Wermuth, T. B., Alves, A. K., Arcaro, S., Santos, P. A. M. dos, & Rodriguez, A. de A. L. (2020). Porous ceramic supported TiO₂ nanoparticles: Enhanced photocatalytic activity for Rhodamine B degradation. <i>Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio</i>, 59(6), 230-238. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.12.001</p> <p>[7] Zapata S., C. E., & Marín Sepúlveda, J. M. (2005). <i>Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso</i>. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/7628</p>
--	---

	<p>[8] Morocho, S., Cuesta, S., & Meneses, L. (2017). Caracterización de los productos intermedios en la ruta sintética del acetaminofén. <i>infoANALÍTICA</i>, 5(1), 25-39.</p> <p>[9] Mancipe, L. C., Fernández A, D. C., & Fernández, D. G. (2010). Intoxicación por acetaminofén. <i>Revista Med de la Facultad de Medicina</i>, 18(2), 5.</p> <p>[10] Fateixa, S., Mulandaza, O., Nogueira, H. I. S., & Trindade, T. (2023). Raman imaging studies on the stability of Paracetamol tablets under different storage conditions. <i>Vibrational Spectroscopy</i>, 124, 103488. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103488</p> <p>[11] Cuesta, S., Vela, C., Meneses, L., & Morocho, S. (2017). Modelación molecular de la interacción del paracetamol y el 4-aminofenol con las enzimas Ciclooxygenasa 1 y 2. <i>Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas</i>, 38(2), Article 2. https://doi.org/10.26807/remcb.v38i2.546</p> <p>[12] Józwiak-Bebenista, M., & Nowak, J. Z. (2014). Paracetamol: Mechanism of action, applications and safety concern. <i>Acta Poloniae Pharmaceutica</i>, 71(1), 11-23.</p> <p>[13] Ayoub, S. S. (2021). Paracetamol (acetaminophen): A familiar drug with an unexplained mechanism of action. <i>Temperature</i>, 8(4), 351-371. https://doi.org/10.1080/23328940.2021.1886392</p>
--	--

	<p>[14] Martin, L., Jimenez, N., & Lynn, A. M. (2017). Farmacología del desarrollo de analgésicos opioides y no esteroideos en neonatos e infantes. <i>Revista Colombiana de Anestesiología</i>, 45(1), 72-79. https://doi.org/10.1016/j.rca.2016.10.005</p> <p>[15] Munné, P., Saenz Bañuelos, J. J., Izura, J. J., Burillo-Putze, G., & Nogué, S. (2003). Intoxicaciones medicamentosas (II): Analgésicos y anticonvulsivantes. <i>Anales del Sistema Sanitario de Navarra</i>, 26, 65-97.</p> <p>[16] Buxton, I. L. O. (2023). Pharmacokinetics: The Dynamics of Drug Absorption, Distribution, Metabolism, and Elimination. En L. L. Brunton & B. C. Knollmann (Eds.), <i>Goodman & Gilman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics</i> (14th Edition). McGraw-Hill Education. accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1193226397</p> <p>[17] (2015). Paracetamol solución oral (acetaminofén). <i>Revista Cubana de Farmacia</i>, 49(3) Recuperado en 28 de marzo de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003475152015000300019&lng=es&tlng=es</p> <p>[18] Ortiz-Pereda, V., López, M., Arroita, A., Aguilera, L., Azkue, J., Torre-Mollinedo, F., & Isla-Baranda, A. (2007). Antiinflamatorios no esteroideos y paracetamol en el tratamiento del dolor. <i>Gaceta Médica de Bilbao</i>, 104(4), 148-155. https://doi.org/10.1016/S0304-4858(07)74595-X</p>
--	---

<p style="text-align: center; opacity: 0.5; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);">Universidade Juazeiro do Norte</p>	<p>[19] Jaeschke, H., Murray, F. J., Monnot, A. D., Jacobson-Kram, D., Cohen, S. M., Hardisty, J. F., Atillasoy, E., Hermanowski-Vosatka, A., Kuffner, E., Wikoff, D., Chappell, G. A., Bandara, S. B., Deore, M., Pitchaiyan, S. K., & Eichenbaum, G. (2021). Assessment of the biochemical pathways for acetaminophen toxicity: Implications for its carcinogenic hazard potential. <i>Regulatory Toxicology and Pharmacology</i>, 120, 104859. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104859</p> <p>[20] Anderson, B. J. (2008). Paracetamol (Acetaminophen): Mechanisms of action. <i>Pediatric Anesthesia</i>, 18(10), 915-921. https://doi.org/10.1111/j.1460-9592.2008.02764.x</p> <p>[21] Mazaleuskaya, L. L., Sangkuhl, K., Thorn, C. F., FitzGerald, G. A., Altman, R. B., & Klein, T. E. (2015). PharmGKB summary: Pathways of acetaminophen metabolism at the therapeutic versus toxic doses. <i>Pharmacogenetics and Genomics</i>, 25(8), 416-426. https://doi.org/10.1097/FPC.0000000000000150</p> <p>[22] Forrest, J. A., Clements, J. A., & Prescott, L. F. (1982). Clinical pharmacokinetics of paracetamol. <i>Clinical Pharmacokinetics</i>, 7(2), 93-107. https://doi.org/10.2165/00003088-198207020-00001</p> <p>[23] Tian, L., Mi, N., Wang, L., Huang, C., Fu, W., Bai, M., Gao, L., Ma, H., Zhang, C., Lu, Y., Zhao, J., Zhang, X., Jiang, N., Lin, Y., Yue, P., Xia, B., He, Q., Yuan, J., & Meng, W. (2024). Regular use of paracetamol and risk of</p>
--	--

<p style="text-align: center; opacity: 0.3; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Autónoma de Querétaro </p>	<p>liver cancer: A prospective cohort study. <i>BMC Cancer</i>, 24(1), 33. https://doi.org/10.1186/s12885-023-11767-5</p> <p>[24] González Rivera, L. A., Chino Cruz, M. R., May Lozano, M., Iuga, C., & Martínez Delgadillo, S. A. (2020). Degradación fotocatalítica del paracetamol utilizando diferentes fotocatalizadores de TiO₂ dopados con grafeno y plata. <i>Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química. Año 6, número 6 (enero-diciembre de 2020)</i>. ISSN: 2448-6663. http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/7740</p> <p>[25] Bravo, V., Román, M., Bettini, M., Cerda, P., Mieres, J. J., Paris, E., & Ríos, J. C. (2012). Caracterización de la ingestión por sobredosis de paracetamol: Reporte de un centro de información toxicológica chileno. <i>Revista médica de Chile</i>, 140(3), 313-318. https://doi.org/10.4067/S0034-98872012000300005</p> <p>[26] Sisamón, D. I. A. (2005). ACERCA DE LA HEPATOTOXICIDAD DEL PARACETAMOL. <i>Revista del Hospital Privado de Comunidad</i> 2003, 6(2). [26] Farré, M. L., Pérez, S., Kantiani, L., & Barceló, D. (2008). Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. <i>TrAC Trends in Analytical Chemistry</i>, 27(11), 991-1007. https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.09.010</p> <p>[27] Fent, K., Weston, A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. <i>Aquatic</i></p>
---	--

<p style="text-align: center; opacity: 0.3; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco </p>	<p> <i>Toxicology</i>, 76(2), 122-159. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.09.009 </p> <p> [28] Iannacone, J., & Alvariño, L. (2009). EVALUACIÓN DEL RIESGO ACUÁTICO DE SIETE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS SOBRE <i>Daphnia magna</i>. <i>Ecología Aplicada</i>, 8(1-2), 71. https://doi.org/10.21704/rea.v8i1-2.384 </p> <p> [29] Bila, D. M., & Dezotti, M. (2003). Fármacos no meio ambiente. <i>Química Nova</i>, 26, 523-530. https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015 </p> <p> [30] Zhang, J., Tian, B., Wang, L., Xing, M., & Lei, J. (2018). <i>Photocatalysis: Fundamentals, Materials and Applications</i> (Vol. 100). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2113-9 </p> <p> [31] Coronado, J. M. (2013). A Historical Introduction to Photocatalysis. En J. M. Coronado, F. Fresno, M. D. Hernández-Alonso, & R. Portela (Eds.), <i>Design of Advanced Photocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications</i> (pp. 1-4). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5061-9_1 </p> <p> [32] Ahmad, K., Ghatak, H. R., & Ahuja, S. M. (2020). A review on photocatalytic remediation of environmental pollutants and H₂ production through water splitting: A sustainable approach. <i>Environmental Technology & Innovation</i>, 19, 100893. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100893 </p>
--	--

	<p>[33] Teheran, L. A. A., & Benitez, A. O. (s. f.). <i>DEGRADACIÓN POR FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA (FOTO-FENTON) DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS DE FENOL.</i></p> <p>[34] Arrojo Viejo, S. (2022). Descontaminación de aguas residuales mediante fotocatalisis. <i>MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide</i>, 46, 5.</p> <p>[35] FUJISHIMA, A., HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. <i>Nature</i> 238, 37–38 (1972). https://doi.org/10.1038/238037a0</p> <p>[36] Byrne, J. A., Fernandez-Ibañez, P. A., Dunlop, P. S. M., Alrousan, D. M. A., & Hamilton, J. W. J. (2011). Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review. <i>International Journal of Photoenergy</i>, 2011, e798051. https://doi.org/10.1155/2011/798051</p> <p>[37] Garcés Giraldo, L. E., Mejía Franco, E. A., & Santamaría Arango, J. J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. <i>Revista Lasallista de Investigación</i>, 1(1), 83-92.</p> <p>[38] Martín Rubio, A. (2017). Fotocatálisis como mejora de la descontaminación de aguas por microorganismos. <i>MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide</i>, 26, 1.</p>
--	--

	<p>[39] Flores Jerónimo, G., Guerrero Salazar, C. A., González González, V., Guerrero Salas, T., & Lozano, T. (2020). Evaluación de la actividad fotocatalítica de compósitos ZnS-rGO. <i>Ingenierías</i>, 23(86), 25-34.</p> <p>[40] Calderón Peña, J., Bello Hernández, D. E., & Delgado Niño, P. (2019). Remediación fotocatalítica de aguas residuales simuladas contaminadas con tetraciclina. <i>Avances: Investigación en Ingeniería</i>, 16(1), 130-140.</p> <p>[41] Wang, Z., Bockstaller, M. R., & Matyjaszewski, K. (2021). Synthesis and Applications of ZnO/Polymer Nanohybrids. <i>ACS Materials Letters</i>, 3(5), 599-621. https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00145</p> <p>[42] Galeas Hurtado, S. G., Salas Balseca, G. F., Rosas, N., Guerrero Barragán, V. H., & Debut, A. (2016). Síntesis de Nanopartículas de ZnO por el Método de Pechini. <i>Revista Politécnica</i>, 38(1), 35-35.</p> <p>[43] <i>Materials Project</i>. (s. f.). Materials Project. Recuperado 28 de agosto de 2024, de https://next-gen.materialsproject.org/materials?formula=CeO2</p> <p>[44] Pathak, V., Lad, P., Thakkar, A. B., Thakor, P., Deshpande, M. P., & Pandya, S. (2023). Synthesis, characterization and applications of cubic fluorite cerium oxide nanoparticles: A comprehensive study. <i>Results in Surfaces and Interfaces</i>, 11, 100111. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100111</p>
--	---

	<p>[45] Vega Garita, V., Matamoros Quesada, J., & Vega-Baudrit, J.-R. (2014). Síntesis de CeO₂: Propiedades del sol-gel y caracterización de las nanopartículas obtenidas. <i>Tecnología en Marcha</i>, 27(3), 62-69.</p> <p>[46] Mardare, C. C., & Hassel, A. W. (2019). Review on the Versatility of Tungsten Oxide Coatings. <i>Physica Status Solidi (a)</i>, 216(12), 1900047. https://doi.org/10.1002/pssa.201900047</p> <p>[47] Flores-Mena, J., Diaz-Reyes, J., & Balderas-López, J. (2012). Structural properties of WO₃ dependent of the annealing temperature deposited by hot-filament metal oxide deposition. <i>Revista mexicana de física</i>, 58, 504-509.</p> <p>[48] Borysiewicz, M. A. (2019). ZnO as a Functional Material, a Review. <i>Crystals</i>, 9(10), 505. https://doi.org/10.3390/cryst9100505</p> <p>[49] Lara Lopez, Y. (2016). SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN COMPOSITO CARBÓN-TiO₂-CeO₂ PARA LA FOTODEGRADACIÓN DE FENOL. https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4077</p> <p>[50] Dutta, V., Sharma, S., Raizada, P., Thakur, V. K., Khan, A. A. P., Saini, V., Asiri, A. M., & Singh, P. (2021). An overview on WO₃ based photocatalyst for environmental remediation. <i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>, 9(1), 105018. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105018</p>
--	--

	<p>[51] Manikanika, Chopra, L., & Kumar, R. (2024). Combustion-synthesized ZnO-CeO heterojunctions for advanced photocatalytic dye degradation². <i>Inorganic Chemistry Communications</i>, 160, 111896. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111896</p> <p>[52] Zhang, H., Zhu, Y., Nutakki, T. U. K., Alghassab, M. A., Alkhalaf, S., Islam, S., & Elmasry, Y. (2024). Preparation of CeO₂-WO₃ binary heterojunction photocatalyst for sustainable tetracycline degradation: Optimization of synthesis and degradation conditions, characterization, transformation pathway, and dominant reactive species. <i>Surfaces and Interfaces</i>, 44, 103793. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103793</p> <p>[53] Xu, Y., & Chen, T. (2023). Development of nanostructured based ZnO@WO photocatalyst and its photocatalytic and electrochemical properties: Degradation of Rhodamine B3. <i>International Journal of Electrochemical Science</i>, 18(4), 100055. https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100055</p> <p>[54] Fathima Khyrun, S. M., Jegatha Christy, A., Mayandi, J., & Sagadevan, S. (2024). Synergistic effect of nano-floret CeO/ZnO nanocomposite as an efficient photocatalyst for environmental remediation². <i>Ceramics International</i>, 50(7, Part B), 11817-11832. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.01.086</p>
--	---

	<p>[55] Yurdakal, S., Loddo, V., Augugliaro, V., Berber, H., Palmisano, G., & Palmisano, L. (2007). Photodegradation of pharmaceutical drugs in aqueous TiO₂ suspensions: Mechanism and kinetics. <i>Catalysis Today</i>, 129(1-2), 9-15. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.06.044</p> <p>[56] Pham, V. L.; Kim, D.-G.; Ko, S.-O. (2020). Advanced Oxidative Degradation of Acetaminophen by Carbon Catalysts: Radical vs Non-Radical Pathways. <i>Environmental Research</i>, 188, 109767. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109767</p> <p>[57] Palas, B.; Ersöz, G.; Atalay, S. (2019). Bioinspired Metal Oxide Particles as Efficient Wet Air Oxidation and Photocatalytic Oxidation Catalysts for the Degradation of Acetaminophen in Aqueous Phase. <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>, 182, 109367. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109367</p> <p>[58] Moreno-Ortiz, V. C., Martínez-Núñez, J. M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L. A., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente. <i>Revista mexicana de ciencias farmacéuticas</i>, 44(4), 17-29.</p> <p>[59] González, M., Sánchez-Rodríguez, S., Castro-Pastrana, L., Flores de la Torre, J., & López-Luna, A. (2016). Ecofarmacovigilancia. <i>Revista CENIC Ciencias Biológicas</i>. ISSN 2221-2450, 47, 12-16.</p>
--	---

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</p>	<p>[60] Tucker, J. L. (2006). Green Chemistry, a Pharmaceutical Perspective. <i>Organic Process Research & Development</i>, 10(2), 315-319. https://doi.org/10.1021/op050227k</p> <p>[61] Schulz-Bañares, B., Sandoval-Cifuentes, C., Sandoval-Quijada, T., & Müller-Ramírez, C. (2021). Residuos farmacéuticos domiciliarios en el medio ambiente: De la preocupación a la acción. <i>Revista Panamericana de Salud Pública</i>, 45, e155. https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.155</p> <p>[62] Moreno-Ortiz, V., Juan Manuel, M., Kravzov-Jinich, J., Pérez-Hernández, L., Moreno-Bonett, C., & Altagracia-Martínez, M. (2013). <i>Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente</i>. 44, 17-29.</p> <p>[63] Escobar-Alarcón, L., Solís-Casados, D. A., Escobar-Alarcón, L., & Solís-Casados, D. A. (2021). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. <i>Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología</i>, 14(26). https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646</p> <p>[64] Espinosa, E. A. (2015). Síntesis y caracterización de óxidos mixtos Ce_{0.8}Zr_xLa_{0.2-x}O₂ y su evaluación en la eliminación catalítica simultánea del negro de carbón y</p>
---	--

	<p>óxidos de nitrógeno. <i>Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química</i>. 607-615.</p> <p>[65] Sandoval, D. M., Gaona J, S., & Caneiro, A. (2008). Síntesis y caracterización de Hexaferrita de bario por el método de combustión. <i>Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales</i>, 28(1), 29-37.</p> <p>[66] Aparicio Ceja, M. E., Carbajal Arizaga, G. G., Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. <i>Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología</i>, 3(2), 62-72.</p> <p>[67] Parra, R., Puello-Polo, E., & Brito, J. (2018). Efecto de la carburación con CH₄/H₂ de (NH₄)₄[NiMo₃W₃O₂₄H₆]•5H₂O y (NH₄)₄[NiMo₆O₂₄H₆]•5H₂O en la hidrodesulfuración de tiofeno. <i>ITECKNE</i>, 15, 17. https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1960</p> <p>[68] Osotsi, M. I., Macharia, D. K., Zhu, B., Wang, Z., Shen, X., Liu, Z., Zhang, L., & Chen, Z. (2018). Synthesis of ZnWO_{4-x} nanorods with oxygen vacancy for efficient photocatalytic degradation of tetracycline. <i>Progress in Natural Science: Materials International</i>, 28(4), 408-415. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.01.007</p> <p>[69] Kong, X. Y., Choo, Y. Y., Chai, S.-P., Soh, A. K., & Mohamed, A. R. (2016). <i>Oxygen vacancy induced Bi₂WO₆ for the realization of photocatalytic CO₂ reduction over the</i></p>
--	---

	<p>full solar spectrum: from the UV to the NIR region. <i>Chemical Communications</i>, 52(99), 14242–14245. https://doi:10.1039/c6cc07750a</p> <p>[70] Kumar, P., Verma, S., Korošin, N. Č., Žener, B., & Štangar, U. L. (2022). Increasing the photocatalytic efficiency of ZnWO₄ by synthesizing a Bi₂WO₆/ZnWO₄ composite photocatalyst. <i>Catalysis Today</i>, 397-399, 278-285. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.012</p> <p>[71] <i>Materials Project</i>. (s. f.). Materials Project. Recuperado 07 de octubre de 2024, de https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-18918?formula=ZnWO4</p> <p>[72] <i>Materials Project</i>. (s. f.). Materials Project. Recuperado 12 de octubre de 2024, de https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-18918?formula=ZnWO4</p> <p>[73] Khalaf, M. M., & Abdelhamid, A. A. (2016). Sol–gel Derived Mixed Oxide Zirconia: Titania Green Heterogeneous Catalysts and Their Performance in Acridine Derivatives Synthesis. <i>Catalysis Letters</i>, 146(3), 645-655. https://doi.org/10.1007/s10562-015-1677-2</p> <p>[74] García-Benjume, M. L., Espitia-Cabrera, M. I., & Contreras-García, M. E. (2012). Enhanced Photocatalytic Activity of Hierarchical Macro-Mesoporous Anatase by ZrO₂ Incorporation. <i>International Journal of Photoenergy</i>, 2012, 1-10. https://doi.org/10.1155/2012/609561</p>
--	--

<p style="text-align: center; opacity: 0.5; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Autónoma de Tabasco </p>	<p>[75] Yuan, Q., Liu, Y., Li, L.-L., Li, Z.-X., Fang, C.-J., Duan, W.-T., Li, X.-G., & Yan, C.-H. (2009). Highly ordered mesoporous titania–zirconia photocatalyst for applications in degradation of rhodamine-B and hydrogen evolution. <i>Microporous and Mesoporous Materials</i>, 124(1), 169-178. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.05.006</p> <p>[76] Geetha, G. V., Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C., & Ganesh, V. (2021). Photocatalytic degradation of methylene blue dye using ZnWO₄ catalyst prepared by a simple co-precipitation technique. <i>Journal of Sol-Gel Science and Technology</i>, 97(3), 572-580. https://doi.org/10.1007/s10971-021-05480-7</p> <p>[77] Ponce Álvarez, S. (2015). Degradación fotocatalítica de paracetamol en aguas, utilizando nanopartículas de TiO₂ soportado sobre esferas de vidrio. <i>En Anuario de Investigaciones</i>, 138-139. https://hdl.handle.net/20.500.12724/3271</p> <p>[78] Qi, N., Zhang, H., Jin, B., & Zhang, K. (2011). CFD modelling of hydrodynamics and degradation kinetics in an annular slurry photocatalytic reactor for wastewater treatment. <i>Chemical Engineering Journal</i>, 172(1), 84-95. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.068</p> <p>[79] Hamdi El Najjar, N., Touffet, A., Deborde, M., Journel, R., & Karpel Vel Leitner, N. (2014). Kinetics of paracetamol oxidation by ozone and hydroxyl radicals, formation of transformation products and toxicity.</p>
---	--

<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.2; transform: rotate(-45deg);"> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco </p>	<p><i>Separation and Purification Technology</i>, 136, 137-143. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.004</p>
	<p>[80] Martín-Martínez, J. M. (1990). <i>Adsorción física de gases y vapores por carbones</i>. Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones. ISBN 84-86809-33-9, 376 p. http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4291</p>
	<p>[81] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). <i>Pure and Applied Chemistry</i>, 87(9-10), 1051-1069. https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117</p>
	<p>[82] Alvez, G., Garcia, R., Arriagada, R., & Cid, R. (1999). ARCILLAS PILAREADAS II. HIDRODESULFURACION DE TIOFENO SOBRE CATALIZADORES Ni,W SOPORTADOS SOBRE ARCILLAS PILAREADAS. <i>Boletín de la Sociedad Chilena de Química</i>, 44(3), 337-344. https://doi.org/10.4067/S0366-16441999000300010</p>
	<p>[83] Fuentes, E., Ruiz, J., Pajaro, A., Faro Jr, A., Silva, T., Mansur, J., & Rangel, M. C. (2014, septiembre 14). <i>Uso y caracterización de catalizadores de Cu/ZnO/Al₂O₃ para la reacción WGS</i>.</p> <p>[84] Al-Bataineh, Q. M., Telfah, M., Ahmad, A. A., Alsaad, A. M., Qattan, I. A., Baaziz, H., Charifi, Z., & Telfah,</p>

	<p>A. (2020). Synthesis, Crystallography, Microstructure, Crystal Defects, Optical and Optoelectronic Properties of ZnO:CeO₂ Mixed Oxide Thin Films. <i>Photonics</i>, 7(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/photonics7040112</p> <p>[85] Al-Bataineh, Q. M., Alsaad, A. M., Ahmad, A. A., & Al-Sawalmih, A. (2019). Structural, Electronic and Optical Characterization of ZnO Thin Film-Seeded Platforms for ZnO Nanostructures: Sol–Gel Method Versus Ab Initio Calculations. <i>Journal of Electronic Materials</i>, 48(8), 5028-5038. https://doi.org/10.1007/s11664-019-07303-6</p> <p>[86] Ahmed, S. H., Bakiro, M., Aljasmi, F. I. A., Albreiki, A. M. O., Bayane, S., & Alzamly, A. (2020). Investigation of the band gap and photocatalytic properties of CeO/rGO composites2. <i>Molecular Catalysis</i>, 486, 110874. https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.110874</p> <p>[87] Domínguez, C. U., Torres, J. G. T., & Lopez, I. C. (2016). Síntesis y caracterización de trióxidos Al-Zr-Ce por el método Sol-Gel. <i>Journal of Basic Sciences</i>, 2(6), Article 6. https://doi.org/10.19136/jobs.a2n6.1903</p> <p>[88] Murillo Sierra, J. C. (2021). <i>Actividad fotocatalítica de la heterounión WO₃/ZnS bajo luz UV-Vis en la degradación de contaminantes emergentes y conversión de CO₂</i> [Phd, Universidad Autónoma de Nuevo León]. http://eprints.uanl.mx/22361/</p> <p>[89] Ratana, T., Amornpitoksuk, P., Ratana, T., & Suwanboon, S. (2009). The wide band gap of highly</p>
--	---

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</p>	<p>oriented nanocrystalline Al doped ZnO thin films from sol-gel dip coating. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, 470(1-2), 408-412. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.081</p> <p>[90] Segura, A., Sans, J. A., Manjón, F. J., Muñoz, A., & Herrera-Cabrera, M. J. (2003). Optical properties and electronic structure of rock-salt ZnO under pressure. <i>Applied Physics Letters</i>, 83(2), 278-280. https://doi.org/10.1063/1.1591995</p> <p>[91] Tovar, E. (2013). <i>Preparacion y caracterizacion de peliculas delgadas de ZnO para su uso en estructuras vidrio/ITO/ZnO/CdS</i>.</p> <p>[92] Ellmer, K., Klein, A., & Rech, B. (2007). <i>Transparent Conductive Zinc Oxide: Basics and Applications in Thin Film Solar Cells</i>. Springer Science & Business Media.</p> <p>[93] Trovarelli, A. (1996). Catalytic Properties of Ceria and CeO₂-Containing Materials. <i>Catalysis Reviews</i>, 38(4), 439-520. https://doi.org/10.1080/01614949608006464</p> <p>[94] Buch, V. R., Chawla, A. K., & Rawal, S. K. (2016). Review on electrochromic property for WO₃ thin films using different deposition techniques. <i>Materials Today: Proceedings</i>, 3(6), 1429-1437. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.025</p> <p>[95] Jose, A., John, M., H., H., Kuriakose, S., K.p., B., & Varghese, T. (2021). Characterization of Ce₂(WO₄)₃</p>
---	---

	<p>nanocrystals for potential applications. <i>Results in Surfaces and Interfaces</i>, 4, 100020. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2021.100020</p> <p>[96] Wang, X., Wang, J., Sun, Y., Li, K., Shang, T., & Wan, Y. (2022). Recent advances and perspectives of CeO₂-based catalysts: Electronic properties and applications for energy storage and conversion. <i>Frontiers in Chemistry</i>, 10. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1089708</p> <p>[97] Trovarelli, A., & Llorca, J. (2017). Ceria Catalysts at Nanoscale: How Do Crystal Shapes Shape Catalysis? <i>ACS Catalysis</i>, 7(7), 4716-4735. https://doi.org/10.1021/acscatal.7b01246</p> <p>[98] Fan, R., Li, Z., Wang, Y., Zhang, C., Wang, Y., Ding, Z., Guo, X., & Wang, R. (s. f.). Effects of WO₃ and SiO₂ doping on CeO₂-TiO₂ catalysts for selective catalytic reduction of NO with ammonia. <i>RSC Advances</i>, 10(10), 5845-5852. https://doi.org/10.1039/d0ra00053a</p> <p>[99] Júnior, E. A. A., Xavier Nobre, F., Silva Sousa, G. da, Santos Cavalcante, L., Santos, M. R. de M. C., Leandro Souza, F., & Matos, J. M. E. de. (2017). Synthesis, growth mechanism, optical properties and catalytic activity of ZnO microcrystals obtained via hydrothermal processing. <i>RSC Advances</i>, 7(39), 24263-24281. https://doi.org/10.1039/C7RA03277C</p> <p>[100] Massoudi, J., Smari, M., Nouri, K., Dhahri, E.,</p>
--	---

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</p>	<p>Khirouni, K., Bertaina, S., Bessais, L., & Kebir Hlil, E. (2020). Magnetic and spectroscopic properties of Ni–Zn–Al ferrite spinel: From the nanoscale to microscale. <i>RSC Advances</i>, 10(57), 34556-34580. https://doi.org/10.1039/D0RA05522K</p> <p>[101] Pavithra, N. S., Nagaraju, G., & Patil, S. B. (2021). Ionic liquid-assisted hydrothermal synthesis of ZnWO₄ nanoparticles used for photocatalytic applications. <i>Ionics</i>, 27(8), 3533-3541. https://doi.org/10.1007/s11581-021-04123-9</p> <p>[102] Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. <i>Water Research</i>, 44(10), 2997-3027. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039</p> <p>[103] Ahilandeswari, G., & Arivuoli, D. (2022). Investigation of Ce₂(WO₄)₃/g-C₃N₄ nanocomposite for degradation of industrial pollutants through sunlight-driven photocatalysis. <i>Applied Physics A</i>, 128(8), 705. https://doi.org/10.1007/s00339-022-05846-w</p> <p>[104] Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. <i>Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews</i>, 1(1), 1-21. https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2</p> <p>[105] Channei, D., Chansaenpak, K., Phanichphant, S., Jannoey, P., Khanitchaidecha, W., & Nakaruk, A. (2021). Synthesis and Characterization of WO₃/CeO₂</p>
---	---

	<p>Heterostructured Nanoparticles for Photodegradation of Indigo Carmine Dye. <i>ACS Omega</i>, 6(30), 19771-19777. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02453</p> <p>[106] Yanyan, L., Kurniawan, T. A., Ying, Z., Albadarin, A. B., & Walker, G. (2017). Enhanced photocatalytic degradation of acetaminophen from wastewater using WO₃/TiO₂/SiO₂ composite under UV–VIS irradiation. <i>Journal of Molecular Liquids</i>, 243, 761-770. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.08.092</p> <p>[107] Nasr, O., Mohamed, O., Al-Shirbini, A.-S., & Abdel-Wahab, A.-M. (2019). Photocatalytic degradation of acetaminophen over Ag, Au and Pt loaded TiO₂ using solar light. <i>Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry</i>, 374, 185-193. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.01.032</p> <p>[108] Kar, P., Shukla, K., Jain, P., Sathiyam, G., & Gupta, R. K. (2021). Semiconductor based photocatalysts for detoxification of emerging pharmaceutical pollutants from aquatic systems: A critical review. <i>Nano Materials Science</i>, 3(1), 25-46. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.11.001</p> <p>[109] Neamțu, M., Bobu, M., Kettrup, A., & Siminiceanu, I. (2013). Ozone photolysis of paracetamol in aqueous solution. <i>Journal of Environmental Science and Health, Part A</i>, 48(10), 1264-1271. https://doi.org/10.1080/10934529.2013.776898</p>
--	--

	<p>[110] Moctezuma, E., Leyva, E., Aguilar, C. A., Luna, R. A., & Montalvo, C. (2012). Photocatalytic degradation of paracetamol: Intermediates and total reaction mechanism. <i>Journal of Hazardous Materials</i>, 243, 130-138. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.010</p> <p>[111] Fan, G., Peng, H., Zhang, J., Zheng, X., Zhu, G., Wang, S., & Hong, L. (2018). Degradation of acetaminophen in aqueous solution under visible light irradiation by Bi-modified titanate nanomaterials: Morphology effect, kinetics and mechanism. <i>Catalysis Science & Technology</i>, 8(22), 5906-5919. https://doi.org/10.1039/C8CY01614C</p>
--	--