



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DESARROLLO DE FOTOCATALIZADORES BASADOS EN BiVO_4 PARA LA
DEGRADACIÓN DE FÁRMACOS**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. VÍCTOR ALFONSO SÁNCHEZ FLEITES

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DRA. LIZETH ROJAS BLANCO

VILLAHERMOSA, TABASCO, A: 10 DE SEPTIEMBRE DE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 10 del mes de septiembre del año 2025, el que suscribe C. Víctor Alfonso Sánchez Fleites alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 232D19001, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de maestro en Ciencias en Ingeniería y titulada “Desarrollo de fotocatalizadores basados en BiVO₄ para la degradación de fármacos” dirigida por la Dra. Lizeth Rojas Blanco.

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 10 de septiembre de 2025.



Ing. Víctor Alfonso Sánchez Fleites

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/1277/2025
FECHA: 10 de septiembre de 2025
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

IQ. VÍCTOR ALFONSO SÁNCHEZ FLEITES
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"Desarrollo de fotocatalizadores basados en BiVO₄ para la degradación de fármacos"

Para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Ingeniería** y en la cual ha tenido como Directora de Tesis a la Dra. Lizeth Rojas Blanco.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA

c.c.p. Archivo
DRA'DMFM / MCA'RACT



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 08 de septiembre de 2025.
MEM / AP-DAIA /194 / 2025


PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

Una vez hecha la revisión detallada de la Tesis denominada:

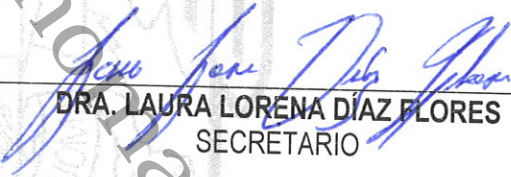
“Desarrollo de fotocatalizadores basados en BiVO4 para la degradación de fármacos”

Desarrollado por el IQ. **Víctor Alfonso Sánchez Fleites**, de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMITÉ SINODAL



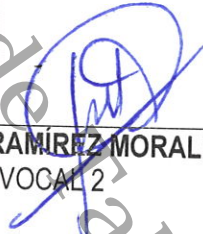
DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA
PRESIDENTE



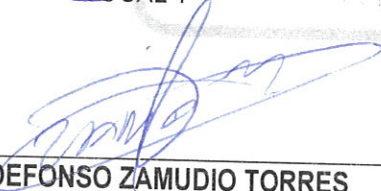
DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
SECRETARIO



DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
VOCAL 1



DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
VOCAL 2



DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
VOCAL 3

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 10 de septiembre de 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "Desarrollo de fotocatalizadores basados en BiVO_4 para la degradación de fármacos". 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



Ing. Víctor Alfonso Sánchez Fleites

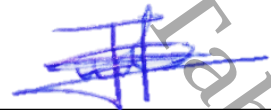


Dra. Lizeth Rojas Blanco

TESTIGOS



Dra. Marcela del Carmen Arellano Cortaza



M. C. José Mercedes García Vicente

Dedicatoria

A mi familia,

Natividad, Carlos Eduardo y Víctor.

Tienen siempre mi pensamiento y mi corazón.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

“En los momentos de crisis,
solo la imaginación es más importante que el conocimiento”.

(Albert Einstein, s.f.)

“Siembra un pensamiento y cosecharás una acción.

Siembra una acción y cosecharán un hábito.

Siembra un hábito y cosecharás un carácter.

Siembre un carácter y cosecharás un destino”.

(William James, s.f.)

Agradecimientos

A la máxima casa de estudios de Tabasco, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), por permitirme el uso de los laboratorios del Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT).

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada mediante la Convocatoria Becas nacionales para estudios de posgrado 2023-2.

A *Texas A&M University (TAMU)* por la invitación para realizar una estancia de investigación en el departamento de ingeniería mecánica bajo la supervisión del Dr. Velumani Subramaniam.

A la Dra. Lizeth Rojas Blanco por dirigir este proyecto de investigación, por su apoyo y por su confianza.

Al Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera, Dra. Laura Lorena Díaz Flores, Dr. Erik Ramírez Morales y Dr. Ildfonso Zamudio Torres por sus comentarios y observaciones.

A la Dra. Karla María Aguilar Castro, Dr. Edgar Vicente Macias Melo, Dr. Rosendo López González, Dr. Juan Gabriel Álvarez Ramírez y Dr. Germán Pérez Hernández por contribuir en mi formación en el programa de Maestro en Ciencias en Ingeniería mediante cada una de sus cátedras.

A Diego Manuel, José Mercedes, Carlos Emilio, Williams Eduardo, Hugo Armando, Jenri León, Mirian Hernández y Osiris Angélica por su tiempo y espacio. *Merci beaucoup, eu não consigo pensar em melhores cúmplices de geração.* A Betsie Sara, Priyanka Bhaskar, Camila Cobos Jitendra Choudhary, Ryan Loden y Manuel Suarez por hacerme sentir en casa. *It was such a pleasure to meet you. Thank you for letting me get to know you.* A Xóchitl Itzel, Montserrat Contreras, Bárbara de la Cruz, Iris Paloma, Lili Montserrat, Paola Morales, Junior Abraham, Himar Abi, Manuel Sánchez, Rudyier Miranda, Francisco Javier D., Francisco Javier G., Edicson Macedonio, Marcela del Carmen, Limny Esther, Fanny Servín, Juan Carlos, Mauricio Valencia, Itzayara Hernández, Juana Gómez, José Ángel, José Carlos, Abel Alarcon, Enrique Avalos, Javier Alejandro, Francisco Javier M., Luis José y Luis Octavio por los momentos compartidos. A Majo Ruiz Escalante, Grecia Gallardo, Viana Ibeth, Carolina Vázquez, Fernando Palma, Orlando Ríos, Kevin Torres y Rey Olán Peralta por estar. Un agasajo coincidir con ustedes dentro y fuera del escenario. Muchas gracias a todos por su apoyo. Mi admiración y cariño están con ustedes.

A Dios por las bendiciones recibidas.

Índice de contenido

Índice de tablas.....	8
Índice de figuras.....	9
Resumen	12
Abstract.....	13
Capítulo 1. Introducción	14
1.1 Justificación.....	15
Capítulo 2. Antecedentes	17
2.1 Procesos avanzados de oxidación.....	17
2.1.1 Fotocatálisis.....	18
2.2 Materiales semiconductores	20
2.2.1 Generalidades del ZnO.....	21
2.2.2 Generalidades del BiVO ₄	21
2.3 Síntesis asistida por microondas	24
2.4 Contaminantes emergentes.....	26
2.4.1 Fármacos.....	26
Capítulo 3. Objetivos.....	31
3.1 Pregunta de investigación	31
3.2 Hipótesis.....	31
3.3 Objetivo general	31
3.4 Objetivos específicos.....	31
Capítulo 4. Metodología	32
4.1 Etapa de síntesis de los materiales	32
4.1.1 Precursores	32
4.1.2 Metodología de síntesis de ZnO	32
4.1.3 Metodología de síntesis de BiVO ₄	34
4.1.4 Metodología de fabricación de BiVO ₄ /ZnO.....	36

4.2	Etapa de caracterización de los materiales.....	37
4.2.1	Difracción de rayos X (DRX).....	37
4.2.2	Espectroscopía Raman.....	39
4.2.3	Espectroscopía UV-Visible (UV-Vis).....	41
4.2.4	Fisorción de nitrógeno (N ₂).....	42
4.2.5	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	43
4.2.6	Microscopía electrónica de transmisión (MET).....	45
4.3	Etapa de evaluación fotocatalítica de los materiales.....	47
Capítulo 5. Resultados y discusión		48
5.1	Análisis estructural de muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por DRX.....	48
5.2	Análisis de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por espectroscopía Raman.....	57
5.3	Análisis de banda prohibida de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por espectroscopía UV-Vis.....	60
5.4	Análisis textural de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por fisorción de N ₂	68
5.5	Estudio morfológico de las muestras de ZnO, BiVO ₄ y 20BVZO por MEB y MET	71
5.6	Actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO.....	74
5.6.1	Pruebas fotocatalíticas.....	74
5.6.2	Mecanismo de degradación fotocatalítica	81
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....		84
Contribuciones.....		85
Referencias citadas		86
Anexo 1.....		102
Anexo 2.....		104
Anexo 3.....		105

Anexo 4.....	106
Anexo 5.....	107

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de tablas

Tabla 1 Reactivos usados para la preparación de materiales de ZnO, BiVO ₄ y BiVO ₄ /ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO ₄).....	32
Tabla 2 Factores controlados en el diseño de experimento para sintetizar BiVO ₄ usando Bi(NO ₃) ₃ *5H ₂ O y NH ₄ VO ₃ como precursores.....	34
Tabla 3 Nomenclatura de compuestos heterogéneos de BiVO ₄ /ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO ₄	37
Tabla 4 Tamaño de cristal de las muestras de BiVO ₄ sintetizadas por microondas usando Bi(NO ₃) ₃ *5H ₂ O, NH ₄ VO ₃ , Bi ₂ O ₃ y V ₂ O ₅ como precursores.....	51
Tabla 5 Tamaño de cristal estimado de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas, usando la ecuación de Scherrer y el análisis Williamson-Hall	54
Tabla 6 Parámetros de red, volumen de celda y porcentaje de error de las muestras de ZnO y BiVO ₄ sintetizadas por microondas	56
Tabla 7 Banda prohibida y potenciales de banda de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas	66
Tabla 8 Propiedades texturales de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas	69
Tabla 9 Porcentaje de degradación fotocatalítica de AM, TC y CIP y constante de velocidad de reacción de primer orden usando muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador bajo radiación UV.....	79

Índice de figuras

Figura 1 Clasificación de los procesos avanzados de oxidación de acuerdo con la generación de especie oxidante	18
Figura 2 Esquema general del mecanismo de la fotocatalisis heterogénea.....	19
Figura 3 Representación de la distribución de los estados energéticos disponibles en los materiales semiconductores, aislantes y conductores.....	20
Figura 4 Representación de la estructura cristalina para el ZnO tipo: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc hexagonal y (c) wurtzita hexagonal	21
Figura 5 Representación de la estructura cristalina para el BiVO ₄ tipo (a) scheelita tetragonal y (b) zircón.....	22
Figura 6 Comparación de calentamiento (a) convencional y (b) por microondas.....	24
Figura 7 Esquema de rutas de entrada de fármacos en el ambiente.....	27
Figura 8 Ilustración de la estructura de la molécula TC	28
Figura 9 Ilustración de la estructura de la molécula CIP	29
Figura 10 Esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de ZnO por microondas	33
Figura 11 Esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de BiVO ₄ por microondas	35
Figura 12 Esquema general resumido del método usado para obtener vía ultrasónica compuestos heterogéneos de BiVO ₄ /ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO ₄).....	36
Figura 13 Interacciones (a) destructivas y (b) de refuerzo entre los rayos X y el material cristalino	38
Figura 14 Diagrama de energía de Jablonski que muestra las transiciones involucradas durante la absorción infrarroja, Rayleigh, Raman Stokes, anti-Stokes y dispersión de resonancia Raman	40
Figura 15 Esquema general de un espectrofotómetro UV-Vis	41
Figura 16 Clasificación de las isotermas de adsorción de acuerdo con la IUPAC: tipo I, II, III, IV, V y VI.....	43
Figura 17 Esquema general de componentes de un microscopio electrónico de barrido.....	44
Figura 18 Esquema general del microscopio electrónico de transmisión mostrando sistema de iluminación, objetivo y magnificación	46

Figura 19 Esquema general resumido del método usado para evaluar la actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO bajo radiación UV frente a AM, TC y CIP.....	47
Figura 20 Difractogramas de rayos X de muestras de BiVO ₄ usando Bi(NO ₃) ₃ *5H ₂ O y NH ₄ VO ₃ como precursores con (a) 15 min de irradiación por microondas a pH 1, (b) 30 min de irradiación por microondas a pH 1, (c) 15 min de irradiación por microondas a pH 7 y (d) 30 min de irradiación de microondas a pH 7.....	48
Figura 21 Difractogramas de rayos X de muestras de BiVO ₄ usando Bi ₂ O ₃ y V ₂ O ₅ como precursores durante (a) 15 min de irradiación por microondas, (b) 30 min de irradiación por microondas y (c) 60 min de irradiación por microondas	49
Figura 22 Difractogramas de rayos X de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas	52
Figura 23 Difractogramas de rayos X de las muestras de (a) ZnO y (b) BiVO ₄ sintetizadas por microondas en comparación con las cartas cristalográficas de los materiales precursores.....	55
Figura 24 Espectros Raman a temperatura ambiente usando un láser a 633 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas.....	57
Figura 25 Espectros Raman a temperatura ambiente usando un láser a 488 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas.....	58
Figura 26 Espectros de absorción óptica de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO.....	61
Figura 27 Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de (F(R)hv) ^{1/2} contra energía	62
Figura 28 Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de (F(R)hv) ² contra energía	63
Figura 29 Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de absorbancia.....	64
Figura 30 Diagrama de los niveles de energía de las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 50BVZO, 20BVZO y 80BVZO obtenidas.....	67
Figura 31 Isotermas de adsorción-desorción de N ₂ a temperatura constante usando un baño a temperatura del nitrógeno líquido (77 K) de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO ₄ , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO. (Insertos) Distribución de los tamaños de poro	68
Figura 32 Micrográficas de MEB de ZnO magnificación (a) x50k, (b) x40k, (c) x15k, BiVO ₄ magnificación (d) x15k, (e) x10k, (f) x5k; y 20BVZO magnificación (g) x30k, (h) x10k, (i) x5k....	71

Figura 33 Imágenes de MET de (a) ZnO, (c) BiVO ₄ , (e) 20BVZO y patrones de difracción de electrones de (b) ZnO, (d) BiVO ₄ , (f) 20BVZO.....	72
Figura 34 Espectros de absorción de solución de (a) AM, (b) TC y (c) CIP con diferentes concentraciones: 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L y 20 mg/L	74
Figura 35 Espectros de absorción de (a) AM, (c) TC y (e) CIP registrados a diferentes intervalos durante el fenómeno de fotólisis; y porcentajes de adsorción de (b) AM, (d) TC y (f) CIP usando las muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO	76
Figura 36 Relación de la concentración de (a) AM, (c) TC y (e) CIP contra el tiempo de radiación UV; y porcentajes de degradación fotocatalítica de (b) AM, (d) TC y (f) CIP después de 4 h de radiación UV usando muestras de ZnO, BiVO ₄ , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador.....	77
Figura 37 Ajuste de los datos de la degradación fotocatalítica de (a) AM, (b) TC y (c) CIP a una cinética de primer orden a temperatura ambiente	78

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Resumen

La fotocatalisis heterogénea ha demostrado su eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos tóxicos mediante óxidos semiconductores. La síntesis asistida por microondas es un método muy atractivo para la fabricación de fotocatalizadores, ya que la irradiación de microondas interactúa directamente con las moléculas del disolvente gracias a sus propiedades dieléctricas, lo que permite lograr un calentamiento uniforme y rápido. En este trabajo, se fabricaron materiales de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO con diferentes proporciones (20BVZO; 20 % de contenido de BiVO₄, 50BVZO; 50 % de contenido de BiVO₄ y 80BVZO; 80 % de contenido de BiVO₄) mediante síntesis asistida por microondas, sin calcinación posterior a alta temperatura. Se confirmó mediante difracción de rayos X y espectroscopía Raman que las estructuras cristalinas obtenidas fueron wurtzita hexagonal para ZnO y scheelita monoclinica para BiVO₄. La técnica de espectroscopía ultravioleta-visible fue realizada para determinar la banda prohibida de los materiales. Las propiedades texturales de los materiales fueron investigadas mediante fisisorción de nitrógeno. El área superficial específica fue estimada en 8.53 m²/g, 0.72 m²/g, 7.99 m²/g, 5.91 m²/g y 3.59 m²/g para las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO, respectivamente. Se realizó el análisis morfológico para determinar el tamaño de grano y la distribución de partículas. La actividad fotocatalítica de las muestras fue probada frente a azul de metileno (AM), tetraciclina (TC) y ciprofloxacino (CIP). La muestra 20BVZO reveló un rendimiento fotocatalítico mejorado (64.43 %), en comparación con las muestras de ZnO, BiVO₄, 50BVZO y 80BVZO, para la degradación fotocatalítica de TC.

Palabras claves: BiVO₄/ZnO, fotocatalisis, antibióticos

Abstract

Heterogeneous photocatalysis has demonstrated efficacy for removal of the toxic organic pollutants using semiconductor oxides. Microwave-assisted synthesis is a very attractive method for the fabrication of photocatalysts since microwave irradiation interacts directly with the solvent molecules due to its dielectric properties, and a uniform and rapid heating can be achieved. In this work, ZnO, BiVO₄ and BiVO₄/ZnO with different ratios (20BVZO; 20% BiVO₄ content, 50BVZO; 50% BiVO₄ content and 80BVZO; 80% BiVO₄ content) photocatalysts were fabricated by a microwave-assisted synthesis, and without subsequent high temperature calcination. It was confirmed by X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy analysis that the crystal structures obtained were hexagonal wurtzite for ZnO and monoclinic scheelite for BiVO₄. Ultraviolet-visible spectroscopy technique was performed to determine the band gap of the materials. Surface area analysis of the samples was performed to determine the surface measurements of the materials. The specific surface area of the ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO and 80BVZO samples was found to be 8.53 m²/g, 0.72 m²/g, 7.99 m²/g, 5.91 m²/g and 3.59 m²/g, respectively. The morphological analysis was carried out to determine the grain size and the distribution of particles. The photocatalytic activity of BiVO₄/ZnO compounds in comparison to pristine ZnO and bare BiVO₄ was tested for the photocatalytic degradation of methylene blue (AM), tetracycline (TC) and ciprofloxacin (CIP). The 20BVZO sample revealed enhanced photocatalytic performance (64.43%) among other compounds for TC photodegradation with a photocatalyst dosage of 0.3 g/L.

Keywords: BiVO₄/ZnO, photocatalysis, antibiotic

Capítulo 1. Introducción

La contaminación de los cuerpos de agua, llámense ríos, lagos y océanos, es una de las principales preocupaciones en todo el mundo. La Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas, en su Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, plantea 17 objetivos con 169 metas de carácter integrado e indivisible. Su objetivo número seis es garantizar el saneamiento y la disponibilidad de agua para todos. Los Estados fijan sus propias metas nacionales apeguándose a estos objetivos ya que cada país enfrenta sus retos específicos en la búsqueda del desarrollo sostenible (ONU, 2023).

El agua continúa deteriorándose debido a la actividad humana y el crecimiento de las industrias farmacéuticas, químicas y agrícolas. Se vierten al agua dulce una gran cantidad de sustancias químicas nocivas y tóxicas, líquidos iónicos, metales pesados, tensioactivos, agroquímicos y desechos de la industria farmacéutica, incluidos desechos de antibióticos (Che et al., 2023; Kamble et al., 2023; Song, 2023). Estos contaminantes emergentes no están regulados por normas oficiales mexicanas como la NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano y la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Por lo tanto, se necesita implementar tecnologías rentables para el tratamiento de agua que sean eficientes en la eliminación de los contaminantes emergentes a fin de proteger los recursos hídricos naturales (Wannakan et al., 2023).

Se han utilizado técnicas como la precipitación química para tratar los contaminantes emergentes de las aguas residuales. Sin embargo, la remoción de los contaminantes en vez de la eliminación completa de estos y la generación de contaminantes secundarios son los principales inconvenientes de estos métodos convencionales (Wannakan et al., 2023). Es así como entran en contexto los procesos avanzados de oxidación como procesos ecológicos alternativos aceptados para el tratamiento de aguas residuales. Algunos procesos avanzados de oxidación, como las reacciones de fotólisis (UV) y fotoquímicas (UV/H₂O₂, UV/O₃), la reacción de Fenton (Fe²⁺/H₂O₂) y reacciones de foto-Fenton (luz/Fe²⁺/H₂O₂), se han usado eficazmente para la oxidación de contaminantes. No obstante, la fotocatalisis heterogénea se encuentra como uno de los procesos más prometedores ya que entre sus ventajas destacan el bajo costo, respeto al medio ambiente y sostenibilidad (Che et al., 2023; Kamble et al., 2023).

El dióxido de titanio u óxido de titanio(IV) (TiO₂), óxido de zinc (ZnO) y trióxido de wolframio u óxido de wolframio(VI) (WO₃) son ejemplos de óxidos metálicos que han demostrado

un rendimiento fotocatalítico eficaz para la degradación fotocatalítica de diversos compuestos orgánicos. Sin embargo, la eficacia fotocatalítica de estos materiales es limitada gracias a sus bandas prohibidas de alrededor de 3.2 eV y su respuesta únicamente a la radiación ultravioleta (UV) que representa solo alrededor del 5 % del espectro solar (Drisy et al., 2020; Kamble et al., 2023).

Si bien el ZnO presenta un bajo rendimiento fotocatalítico ante el espectro de luz solar, también muestra buenas propiedades de transporte, es económico y tiene una morfología versátil (Wannakan et al., 2023). Por otro lado, se han desarrollado fotocatalizadores basados en bismuto (Bi), entre estos materiales el vanadato de bismuto (BiVO_4) es el semiconductor más sobresaliente en términos de costo de preparación, así como en ancho de banda prohibida pues cuenta con un valor de 2.4 eV, es decir, una banda más estrecha en comparación con el ZnO y el TiO_2 (Che et al., 2023). Sin embargo, este material en solitario no ofrece alta capacidad redox debido a la inadecuada transferencia de electrones (Kamble et al., 2023). Como resultado de esto, existen muchos medios para promover el mejoramiento de la actividad fotocatalítica del BiVO_4 , dentro de los cuales se pueden mencionar el cambio de morfología y la impurificación con metales u otros materiales semiconductores (Che et al., 2023).

1.1 Justificación

Se ha adoptado un concepto de fabricación de compuestos en el que el material BiVO_4 se combina con otros metales como la plata (Ag), oro (Au) y cobalto (Co), o con otros materiales semiconductores tales como el ZnO, TiO_2 , WO_3 y sulfuro de cadmio (CdS), lo que permite la alineación de la banda prohibida y la transferencia eficaz de electrones a través de interfaces (Kamble et al., 2023). La impurificación de BiVO_4 con otros materiales semiconductores es una de las formas más eficaces para mejorar la actividad fotocatalítica. Es por lo anterior, que la formación de compuestos heterogéneos se presenta como una alternativa potencial al aumentar el área superficial específica y minimizar el ancho de banda prohibida del material (Che et al., 2023; Wannakan et al., 2023).

Dentro de las diferentes rutas de síntesis que se han tomado para obtener BiVO_4 , se encuentran la síntesis hidrotermal (Hemavibool et al., 2022), la síntesis sol-gel (Ch-Th et al., 2021) y el método solvotérmico (Pham et al., 2020). Se ha reportado que se puede fabricar una variedad de partículas de BiVO_4 altamente cristalinos y con morfologías específicas mediante el método hidrotermal (S. H. Chen et al., 2020). Sin embargo, los métodos de síntesis que permiten controlar la morfología por lo general presentan un tamaño relativamente mayor de BiVO_4 , lo cual provoca que sea más fácil de aglomerarse y disminuye de esta forma los sitios de superficie

activa, provocando la reducción del rendimiento fotocatalítico (Kamble et al., 2023). Por este motivo se considera la necesidad de continuar con la investigación de métodos que permitan controlar la morfología del material para conseguir tamaños adecuados de materiales basados en BiVO_4 . Partiendo de esta línea, se presenta la síntesis asistida por microondas como un proceso de síntesis eficiente ya que este tratamiento tiene como ventaja principal un calentamiento rápido y uniforme al generar calor desde el interior del material debido a sus propiedades dieléctricas (S. H. Chen et al., 2020; Rodrigues et al., 2023).

En la literatura, ha sido reportado el estudio de fotocatalizadores basados en BiVO_4 con una fuerte actividad fotocatalítica frente a colorantes sintéticos como el azul de metileno (AM) y la rodamina B (Song, 2023). Sin embargo, otros contaminantes emergentes como los antibióticos, pesticidas, hormonas y bacterias han generado preocupación, por lo que su estudio ha cobrado impacto en las investigaciones recientes (Ch-Th et al., 2021; Rodrigues et al., 2023).

En este trabajo, se propone la síntesis y caracterización de materiales de ZnO , BiVO_4 y BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4 . Esto, para evaluar la actividad fotocatalítica de los materiales en la degradación fotocatalítica de los antibióticos tetraciclina (TC) y ciprofloxacino (CIP) usando cantidades menores a 50 mg de los fotocatalizadores fabricados mediante síntesis asistida por microondas con precursores ecológicos y sin calcinación posterior a alta temperatura.

La tesis está estructurada en seis capítulos de la siguiente forma:

- En el capítulo 1, se describe la problemática y justificación que ha motivado la realización de este proyecto de tesis.
- El capítulo 2 presenta el estado del arte, revisión bibliográfica y conceptos teóricos de los materiales semiconductores, metodologías de síntesis y contaminantes emergentes.
- En el capítulo 3, se plantean los objetivos de la tesis.
- El capítulo 4 contiene la información, tanto de los procedimientos experimentales como de sus condiciones, que fueron realizados para dar cumplimiento a los objetivos de la tesis. Asimismo, las técnicas de caracterización usadas son descritas en este capítulo.
- En el capítulo 5, los resultados y discusión de este proyecto de investigación son presentados.
- En el capítulo 6, las conclusiones con base en los resultados son mencionadas, además de las recomendaciones propuestas para trabajos futuros.

Capítulo 2. Antecedentes

A partir del descubrimiento de la propiedad degradante del TiO_2 por el Dr. Fujishima y el Dr. Honda Kenichi en 1972, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en su aprovechamiento hasta hoy día (Santos-Arias, 2023). Los materiales que se usan para la fotocatalisis son materiales semiconductores como el TiO_2 . Aunado a este material, se ha explorado de forma amplia la actividad fotocatalítica del ZnO y en investigaciones recientes, a partir de 2019, el BiVO_4 , ya que posee propiedades químicas, físicas y ópticas adecuadas para su aplicación en la remediación ambiental (Tang et al., 2020) y en otros campos como la producción de energía (Al Abass et al., 2023).

2.1 Procesos avanzados de oxidación

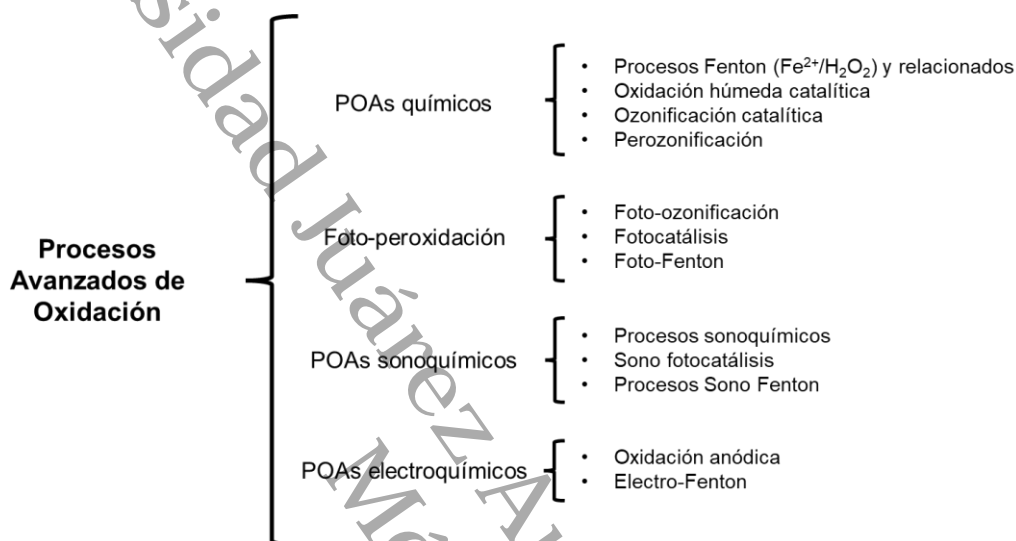
Los procesos avanzados de oxidación son procesos que involucran la generación y uso de poderosas especies transitorias, principalmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$). Estas especies pueden ser generadas a partir del agua usando energía solar, eléctrica, sonora o simplemente mediante productos químicos como peróxido de hidrógeno (H_2O_2) u ozono (O_3); ya sea con o sin el uso de un catalizador apropiado. La diferencia se encuentra en la manera en que se producen los radicales hidroxilos (Kurian, 2021). Las tecnologías en las cuales el radical $\bullet\text{OH}$ se produce son considerados una magnífica alternativa para erradicar material orgánico recalcitrante por reacciones de oxidación con el radical $\bullet\text{OH}$ (Albarrán-Marmolejo & Mendoza, 2022).

Los procesos avanzados de oxidación se pueden aplicar en diversas áreas del tratamiento de agua: como el tratamiento de efluentes industriales, incluidos desechos de destilerías, agroquímicos, pulpa y papel, textiles, yacimientos petrolíferos y de revestimiento de metales; tratamiento de efluentes peligrosos, incluidos desechos de hospitales, eliminación de patógenos, residuos farmacéuticos persistentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y metales pesados como el arsénico (As) y el cromo (Cr). En estos procesos se han utilizado exitosamente catalizadores homogéneos y heterogéneos. Los sistemas heterogéneos tienen ciertas ventajas sobre los sistemas homogéneos, como la fácil separación del catalizador, la falta de tratamiento secundario y la tolerancia a condiciones operativas extremas. Además, el sistema heterogéneo es eficaz en un rango de pH más amplio (Kurian, 2021).

En la Figura 1, se muestra la clasificación de los procesos avanzados de oxidación de acuerdo con la generación de especie oxidante.

Figura 1

Clasificación de los procesos avanzados de oxidación de acuerdo con la generación de especie oxidante



Nota. Adaptado de “Advanced oxidation processes and nanomaterials -a review”, por Kurian, 2021, Cleaner Engineering and Technology; y “Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión”, por López Ramirez *et al.*, 2021, Enfoque UTE.

2.1.1 Fotocatálisis

La fotocatalisis es definida por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAQ, *International Union of Pure and Applied Chemistry*) como: el cambio en la velocidad de una reacción química bajo la acción de radiación UV, visible o infrarroja en presencia de un fotocatalizador. Este último participa en la transformación química de los reactivos involucrados (Braslavsky, 2007). Se dice que el proceso es homogéneo cuando uno de los reactantes y el catalizador se encuentran en solución en el proceso fotocatalítico, mientras que en el proceso de catálisis fotoinducido heterogéneo, el catalizador es sólido y los reactantes son líquidos (Rodríguez-Peña & Barrera-Díaz, 2020).

2.1.1.1 Fotocatálisis heterogénea. La fotocatalisis heterogénea ofrece ventajas como la recuperación relativamente sencilla del fotocatalizador y su reuso. Por lo cual, es uno de los procesos más estudiados y usados en el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos

orgánicos. Esta es la principal aplicación de la fotocatalisis heterogénea (Rodríguez-Peña & Barrera-Díaz, 2020).

La fotocatalisis heterogénea implica la creación de pares de huecos de electrones. Los electrones (e^-) son excitados en la banda de valencia (BV) cuando un material semiconductor es irradiado con la energía luminosa adecuada; ya sea igual o mayor que su energía de banda prohibida. Los electrones se desplazan a la banda de conducción (BC), dejando huecos (h^+) en la BV del semiconductor. Estos portadores de carga reaccionan con las moléculas de agua adsorbidas o con los grupos hidroxilo (-OH) en la superficie del material o con el oxígeno (O_2) disuelto en el medio de reacción. Posteriormente, genera especies radicales reactivos, como el anión superóxido ($O_2^{\bullet-}$) y los radicales hidroxilos ($\bullet OH$), que degradan y mineralizan en agua, dióxido de carbono (CO_2) y otros aniones inorgánicos a los contaminantes adsorbidos en la superficie del material (May-Ix, 2023).

En la Figura 2, se ilustra el mecanismo de fotocatalisis heterogénea.

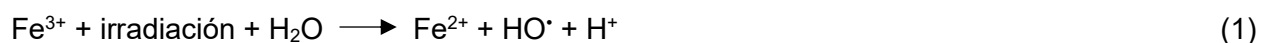
Figura 2

Esquema general del mecanismo de la fotocatalisis heterogénea



Nota. Adaptado de “Estudio de la degradación fotocatalítica de colorantes azoicos con el uso de dióxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO) inmovilizados en soportes poliméricos”, por Sandoval Pauker & Molina Aguirre, 2016, Escuela Politécnica Nacional.

2.1.1.2 Fotocatalisis homogénea. Este tipo de proceso, asistido por fuente de radiación UV, tiene la ventaja de regenerar constantemente Fe^{2+} , y mejorar de esta forma el rendimiento de la reacción. En este sistema, los iones del catalizador se encuentran disueltos en el medio, por lo que el proceso de catálisis puede ocurrir en toda la fase líquida. La fotocatalisis homogénea ha sido utilizada para la remoción de contaminantes emergentes: fármacos, colorantes y plaguicidas (Rodríguez-Peña & Barrera-Díaz, 2020).



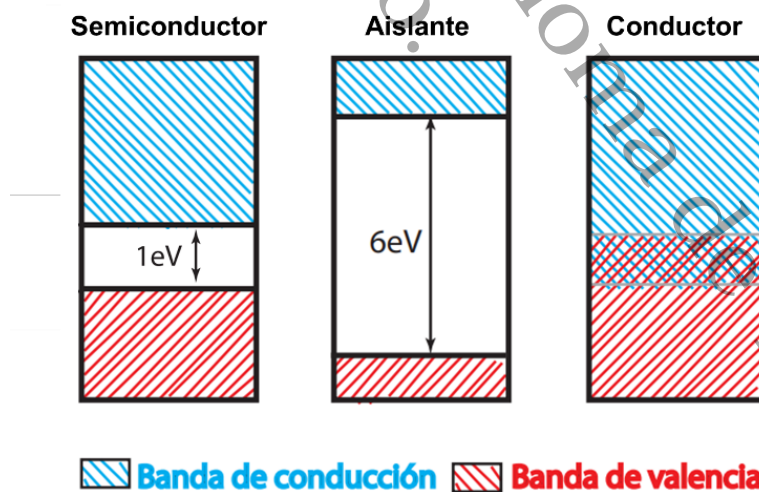
2.2 Materiales semiconductores

Una forma de clasificar a los materiales es de acuerdo con sus propiedades eléctricas. Los materiales tienen comportamientos diferentes respecto a la conductividad eléctrica; están los que son buenos conductores, como los metales, y los que, por el contrario, no lo hacen bajo ningún aspecto, aislantes. Entre los buenos conductores y aislantes existen materiales que dependiendo de condiciones externas pueden conducir o no. Dentro de esas situaciones intermedias se encuentran los semiconductores (Peltzer-y-Blancá, 2021). Los materiales semiconductores y aislantes poseen una estructura de banda con una zona de energías prohibidas entre la banda que contiene los electrones covalentemente enlazados (BV) y la banda que contiene los electrones conductivos en un estado de energía más alto (BC). Sin embargo, la diferencia entre ambos tipos de materiales es el tamaño de la brecha de energía entre las bandas. Los semiconductores poseen bandas prohibidas lo suficientemente pequeñas para que los electrones sean promovidos de la BV llena a la BC vacía (Newell, 2010; Peltzer-y-Blancá, 2021).

En la Figura 3, se muestra la distribución de los estados energéticos disponibles en los materiales semiconductores, aislantes y conductores.

Figura 3

Representación de la distribución de los estados energéticos disponibles en los materiales semiconductores, aislantes y conductores



Nota. Tomado de *Fundamentos de la electrónica y los semiconductores*, por Leñero-Bardallo, 2018, Editorial UCA.

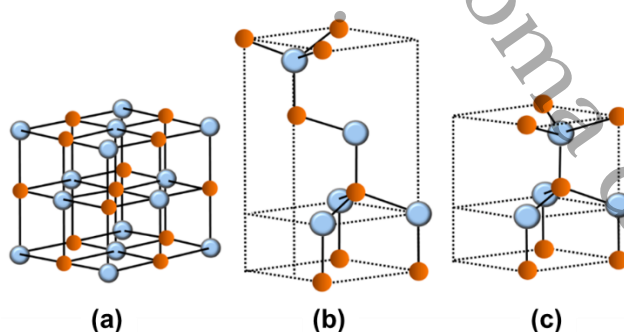
2.2.1 Generalidades del ZnO

El ZnO es uno de los óxidos semiconductores más investigados, que posee una banda prohibida, similar al TiO_2 , de ~ 3.37 eV. Por lo que absorbe la luz solar principalmente en la región UV, es decir, $\sim 4\%$ de la energía solar total. Este semiconductor ha demostrado ser favorable para numerosos usos, como en el tratamiento de aguas residuales y la investigación biológica, debido a su gran energía de excitación, gran fotosensibilidad, bajo costo, morfología versátil y que no es tóxico (Batra et al., 2022; Wannakan et al., 2023). Se han realizado numerosas rutas de síntesis para preparar ZnO: sol-gel (Aalami et al., 2024), hidrotérmal (Widiyandari et al., 2023), solvotérmal (Kovács et al., 2022), coprecipitación (Waghadkar et al., 2024) y síntesis asistida por microondas (Arellano-Cortaza et al., 2021). El ZnO tiene formas cristalinas bien definidas: sal de roca cúbica, blenda de zinc hexagonal y wurtzita hexagonal.

En la Figura 4, se muestra la estructura cristalina para el ZnO tipo: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc hexagonal y (c) wurtzita hexagonal. La estructura cristalina de sal de roca cúbica del ZnO se produce bajo alta presión, lo cual es bastante raro (Rajput et al., 2022). Siendo la estructura wurtzita hexagonal su fase cristalina termodinámicamente estable (Balu et al., 2023).

Figura 4

Representación de la estructura cristalina para el ZnO tipo: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc hexagonal y (c) wurtzita hexagonal



Nota. Tomado de “Recent developments in ZnO-based heterostructures as photoelectrocatalysts for wastewater treatment: A review”, por Rajput *et al.*, 2022, Environmental Advances.

2.2.2 Generalidades del BiVO_4

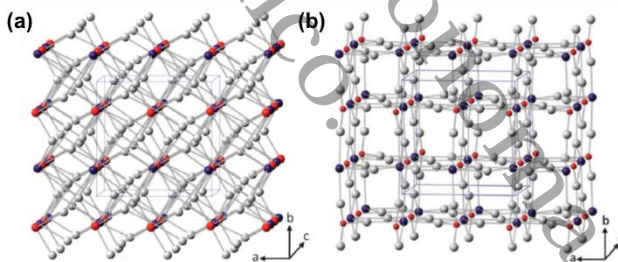
Los materiales semiconductores basados en Bi como tungstato de bismuto (Bi_2WO_6), molibdato de bismuto (Bi_2MoO_6), subcarbonato de bismuto ($(\text{BiO})_2\text{CO}_3$), fosfato de bismuto(III)

(BiPO₄), óxido de bismuto(III) (Bi₂O₃), oxiclورو de bismuto(III) (BiOCl) y BiVO₄, han recibido mucha atención, para diversas aplicaciones, debido a sus bajos valores de banda prohibida, bajo costo, baja toxicidad y su estabilidad química y térmica adecuada (Kamble et al., 2023; Thomas, 2021). El BiVO₄ destaca por su banda prohibida y su respuesta fotocatalítica bajo irradiación con luz visible (Damodharan, 2021; Sánchez et al., 2020). Este compuesto químico inorgánico posee un color amarillo y en ocasiones verde, según la fase en que se encuentre. De forma natural, el BiVO₄ se presenta como el mineral de pucherita con una estructura cristalina ortorrómbica. Sin embargo, el BiVO₄ preparado en laboratorio cristaliza en una estructura tipo scheelita o zircón. Además, la estructura de scheelita tiene un sistema cristalino monoclinico y tetragonal y la estructura tipo zircón tiene un sistema cristalino tetragonal. El BiVO₄ posee una banda prohibida de ~ 3.1 eV en su fase tetragonal y de ~ 2.4 eV en su fase monoclinica; siendo esta última la fase que presenta mayor actividad fotocatalítica (Kamble et al., 2023; Damodharan, 2021; Sánchez et al., 2020).

En la Figura 5, se muestra la estructura cristalina para el BiVO₄ tipo (a) scheelita tetragonal y (b) zircón.

Figura 5

Representación de la estructura cristalina para el BiVO₄ tipo (a) scheelita tetragonal y (b) zircón



Nota. Adaptado de “BiVO₄ As a Sustainable and Emerging Photocatalyst: Synthesis Methodologies, Engineering Properties, and Its Volatile Organic Compounds Degradation Efficiency”, por Kamble *et al.*, 2023, Nanomaterials.

El primer informe fotocatalítico sobre el descubrimiento del BiVO₄ para la evolución de O₂ bajo luz visible, presentado por Kudo *et al.*, (1999) ha influido de forma significativa en el desarrollo de materiales basados en BiVO₄. Sin embargo, el uso de BiVO₄ como fotocatalizador no es impresionante debido a la rápida recombinación de portadores de carga fotoinducida causada por la estrecha banda prohibida. Por lo que se han realizado enormes esfuerzos para mejorar la separación de los portadores de carga fotogenerados como el control de la morfología

y la impurificación con elementos metálicos, no metálicos y materiales semiconductores (Kamble et al., 2023; Thomas, 2021).

En trabajos de investigación, como el de Che *et al.* (2023), ha sido reportado que las condiciones de preparación de compuestos basados en BiVO_4 , que incluyen el tipo de impurificación, pH, tiempo y temperatura, tienen un efecto positivo en el área superficial específica obtenida. Asimismo, se ha determinado que la impurificación del BiVO_4 es un método altamente eficaz para mejorar la reducción de contaminantes emergentes usando BiVO_4 como fotocatalizador. Sobre esta línea, Kamble *et al.* (2023) reportaron porcentajes de degradación fotocatalítica arriba de 84 % para la eliminación de contaminantes emergentes con el uso de compuestos heterogéneos de BiVO_4 con semiconductores como ZnO y TiO_2 . Ch-Th *et al.* (2021) sintetizaron compuestos de BiVO_4 impurificado con óxido de grafeno (GO) con diferentes relaciones GO: BiVO_4 para la eliminación de microorganismos del agua potable. Los valores de banda prohibida para el BiVO_4 prístino y para los compuestos de GO/ BiVO_4 fueron 2.49 eV y de 2.33 eV a 2.46 eV, respectivamente.

Los resultados reportados han mostrado que los compuestos basados en BiVO_4 exhiben una mayor eficacia de eliminación de contaminantes emergentes en comparación con los materiales BiVO_4 prístinos, independientemente del material con el que esté impurificado. Sin embargo, la impurificación con óxidos semiconductores representa bajos costos en comparación con la impurificación con metales, por lo que, se considera que el mejoramiento de las propiedades estructurales, texturales y morfológicas de estos compuestos no debería ser omitido en las investigaciones propuestas en la actualidad.

Se han reportado diferentes rutas de síntesis para preparar BiVO_4 . Drisya *et al.* (2020) obtuvieron estructuras de $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ mediante síntesis sol-gel. Los polvos resultantes se calcinaron a 500 °C por dos horas. Se obtuvo un valor de banda prohibida de 2.34 eV para el BiVO_4 y valores de 2.42 eV a 2.96 eV para los demás compuestos de $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$. Asimismo, Song (2023) realizó un estudio de estructuras de TiO_2 y BiVO_4 usando también síntesis sol-gel, en este caso, para el tratamiento fotocatalítico de poliacrilamida hidrolizada en un campo petrolero. Los polvos obtenidos fueron calcinados a 450 °C por 180 min. Los resultados estructurales y morfológicos demostraron la síntesis eficaz de compuestos de $\text{BiVO}_4/\text{TiO}_2$. Por su parte, Wannakan *et al.* (2023) lograron sintetizar ZnO y BiVO_4 por el método hidrotérmal y ultrasónico con morfologías de disco y polígono irregular con un área superficial específica de

4.2 m²/g para la estructura ZnO/BiVO₄. Se han reportado también métodos simples de síntesis por microondas.

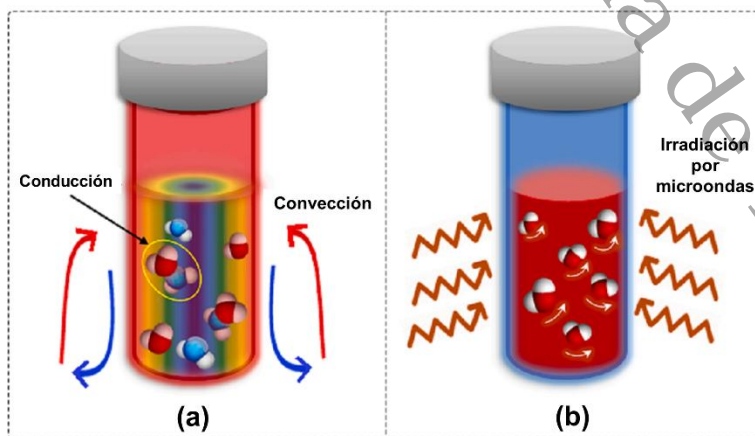
2.3 Síntesis asistida por microondas

La síntesis por microondas ha logrado la disminución de los tiempos de síntesis; acortando a segundos reacciones que por otros métodos de calentamiento convencionales llegan a tardar hasta 72 h. Este método permite obtener materiales con propiedades texturales (área superficial, tamaño y volumen de poro) y morfológicas (tamaño y textura de partícula) específicas, a través de la optimización de condiciones, tales como, la potencia y frecuencia de irradiación. Asimismo, se deben tomar en cuenta factores como el pH de la solución, tiempo del calentamiento, agitación, presión y temperatura (Zarazua Aguilar et al., 2023). Las microondas se pueden definir como una forma de energía electromagnética, que está situado en el extremo más bajo del espectro electromagnético. Esta clase de energía se encuentra ubicada en la región entre las ondas de radio y el infrarrojo con una longitud de onda comprendida entre un centímetro y un metro que corresponde a frecuencias situadas dentro de 30 GHz y 300 MHz (Gavernet, 2021; Zarazua Aguilar et al., 2023).

En la Figura 6, se muestra una comparación de los fenómenos de calentamiento convencional y por microondas.

Figura 6

Comparación de calentamiento (a) convencional y (b) por microondas



Nota. Adaptado de “Microwave-associated chemistry in environmental catalysis for air pollution remediation: A review”, por Bao *et al.*, 2023, Chemical Engineering Journal.

La forma en que la irradiación de microondas afecta a una reacción química es a través del calentamiento dieléctrico que generan las moléculas por transformar energía electromagnética en calor. Esto mediante dos mecanismos principales: polarización dipolar y conducción iónica (Gavernet, 2021; Zarazua Aguilar et al., 2023).

Las moléculas químicas con un momento dipolar ya sea permanente o inducido, bajo la influencia de un campo eléctrico externo, tienen la inclinación a alinear su momento dipolar con este. Como el campo aplicado oscila, los dipolos tienden a alinearse al mismo. Se genera así una diferencia de fase entre el dipolo y la orientación del campo. Dicha diferencia de fase da una pérdida de energía en forma de calor por fricciones, colisiones moleculares y por pérdidas dieléctricas; dando lugar al calentamiento dieléctrico. El segundo modo de transferencia de energía es la conducción iónica. Esta forma tiene lugar si hay iones libres o especies iónicas presentes en la sustancia. De acuerdo con este mecanismo, el calor se genera a través de pérdidas por fricción que son el resultado de la migración de aniones y cationes disueltos cuando un campo electromagnético actúa sobre ellos. Las pérdidas de fricción dependen de la carga, el tamaño y la conductividad de los iones disueltos, así como la interacción de estos últimos con el disolvente (Gavernet, 2021).

Para implementar la producción industrial de materiales fotocatalíticos, la escala en gramos de los materiales debe ser ampliada múltiples veces. No obstante, muchas compañías han desarrollado modelos de reactores que son adecuados tanto para experimentos a escala de laboratorio como para su posterior ampliación a nivel industrial. Por ejemplo, el reactor CaMWave™ KiloLAB puede procesar más de 100 L en 24 h para producir más de 20 kg de producto y los reactores CaMWave™ más grandes poseen la capacidad de fabricar más de 200 kg en 24 h (Dąbrowska et al., 2018). El calentamiento por microondas presenta algunas desventajas para la producción a gran escala, como las limitaciones del material del recipiente/reactor, que debe permitir el paso de las microondas, por lo que los metales no pueden ser usados. Además, los termómetros y termopares convencionales poseen limitaciones en un campo electromagnético, ya que pueden distorsionarlo localmente, inducir inestabilidades térmicas, generar chispas y provocar serios errores de medición. Sin embargo, existen varias alternativas para la medición de temperatura: fibra óptica estándar que puede operar hasta 300 °C; fibras novedosas como la sílice dopada o la fibra óptica sin recubrimiento metálico capaces de medir temperaturas de hasta 1000 °C y 1550 °C, respectivamente; o sistemas sin contacto,

como cámaras térmicas o pirómetros que pueden estimar la temperatura de la superficie mediante la emisión de radiación infrarroja (Bao et al., 2023).

Chen *et al.* (2020) usaron un método hidrotermal asistido por microondas para sintetizar BiVO_4 a diferentes concentraciones molares de ácido nítrico (HNO_3). Los resultados mostraron que una concentración mayor de HNO_3 favoreció la formación de BiVO_4 con un tamaño de cristal mayor. Se ha sintetizado estructuras basados en BiVO_4 por microondas a partir de materiales fotoactivos obtenidos por microondas y otros métodos. No obstante, la síntesis por microondas de los compuestos heterogéneos como tal, así como de los materiales prístinos que construirán el fotocatalizador heterogéneo, ha sido poca investigada. La síntesis asistida por microondas destaca por ser una ruta más eficiente energéticamente, dicha eficiencia energética ha sido aprovechada en las investigaciones de Cheng *et al.* (2023) con la degradación fotocatalítica de TC, uno de los diferentes fármacos que causa un grave problema al ecosistema.

2.4 Contaminantes emergentes

El uso de nuevas sustancias en los diferentes sectores productivos y en la vida cotidiana humana conlleva la presencia y alta abundancia de nuevas moléculas y partículas en las aguas residuales. Esto desencadena la contaminación de los cuerpos de agua, como los ríos, con los denominados contaminantes emergentes (Vázquez-Tapia et al., 2022). Los contaminantes emergentes son compuestos, de distinta naturaleza y origen, que no están regulados en su mayoría. Estos contaminantes encontrados en los cuerpos de agua pueden dañar los componentes bióticos del medio ambiente. La exposición continua puede causar apoptosis, toxicidad celular y genotoxicidad en los seres humanos, mientras que los organismos acuáticos muestran bioacumulación y cadenas tróficas. Estos problemas se han identificado en diversos países del mundo, lo que los convierte en una preocupación a nivel mundial. Los contaminantes emergentes se han encontrado en plantas de tratamiento de aguas residuales, y plantas de tratamiento de agua potable y ríos, demostrando su libre movimiento dentro del medio ambiente de una manera descontrolada. Ejemplos de estos contaminantes son los fármacos, los microplásticos y los residuos de higiene personal (López-Pacheco et al., 2019; Martínez-Alcalá et al., 2020).

2.4.1 Fármacos

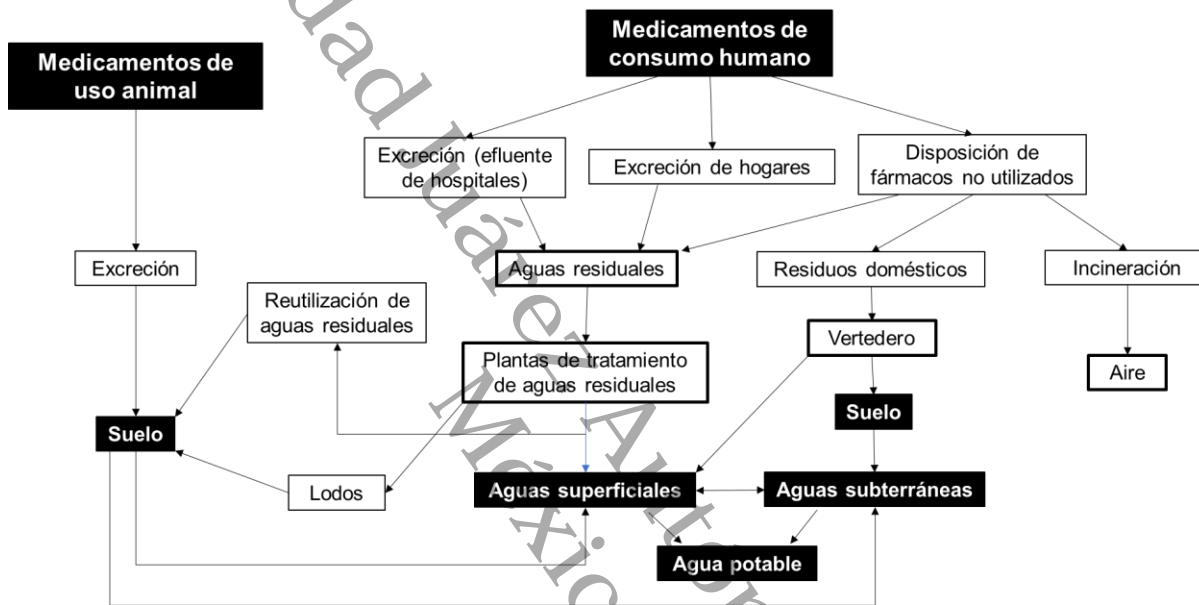
Los fármacos son aquellas sustancias químicamente definidas capaces de modificar la actividad celular en el organismo, usados en la medicina humana y veterinaria para la cura y

control de enfermedades. Al igual que otros contaminantes de origen químico, son compuestos persistentes y bioacumulables que pueden resultar peligrosos para el ser humano, los animales y los ecosistemas (Correia & Marcano, 2015; Jácome-Acatitla, 2016; Martínez-Alcalá et al., 2020).

En la Figura 7, se muestran las diferentes rutas de entrada de fármacos en el ambiente.

Figura 7

Esquema de rutas de entrada de fármacos en el ambiente



Nota. Adaptado de “Fotodegradación de naproxeno sódico y oxitetraciclina en medio acuoso empleando como fotocatalizadores óxidos mixtos derivados de hidróxidos dobles laminares MgAl”, por Correia & Marcano, 2015, Universidad Autónoma Metropolitana.

Los compuestos farmacéuticos que se encuentran en las aguas residuales se pueden clasificar por su uso terapéutico en:

- Antibióticos
- Analgésicos
- Fármacos cardiovasculares
- Hormonas

Los analgésicos y los antibióticos destacan gracias a su uso extendido y variedad (Jácome-Acatitla, 2016).

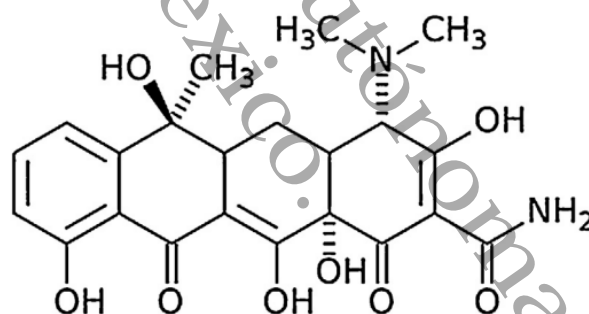
Los antibióticos son fármacos que pueden impedir el crecimiento o la multiplicación de bacterias y hongos, incluso en pequeñas concentraciones. Debido a la periodicidad de enfermedades de origen infeccioso, los antibióticos se encuentran entre los productos farmacéuticos con mayor producción a nivel mundial (Jácome-Acatitla, 2016).

2.4.1.1 Tetraciclina (TC). La TC tiene numerosas aplicaciones en la industria animal y acuícola, que se debe a su amplio espectro, bajo costo y alta actividad antimicrobiana. La dosis de TC es grande, pero tanto su tasa de utilización como su absorción son bajas en los animales, lo que hace que entre el 50 % y el 80 % de este fármaco ingrese al ambiente como contaminantes antibióticos sin ser metabolizados. Una gran cantidad de antibióticos en el medio ambiente provocará un aumento de bacterias resistentes a dichos antibióticos. Las cantidades de TC presentes en el suelo y el agua pueden acceder al cuerpo humano a través de la cadena alimenticia, lo cual es un riesgo que pone en peligro la salud humana (Shi et al., 2024).

En la Figura 8, se muestra la estructura de la molécula de TC.

Figura 8

Ilustración de la estructura de la molécula TC



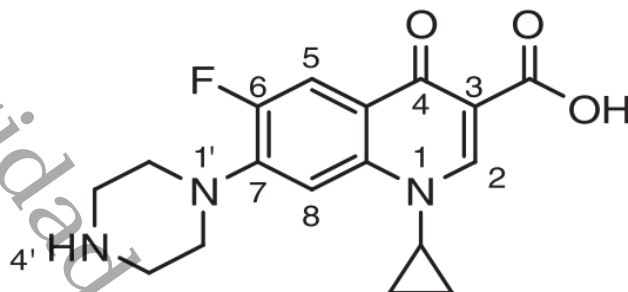
Nota. Tomado de “Design and optimization of an enzymatic membrane reactor for tetracycline degradation”, por Cazes *et al.*, 2014, Catalysis Today.

2.4.1.2 Ciprofloxacino (CIP). La presencia del antibiótico CIP puede ser altamente perjudicial para la biota acuática. Este fármaco en concentraciones de 12 a 120 ng/L, puede modificar el material genético de ciertas algas marinas (Jácome-Acatitla, 2016).

En la Figura 9, se muestra la estructura de la molécula de CIP.

Figura 9

Ilustración de la estructura de la molécula CIP



Nota. Tomado de “Efficient removal of antibiotic ciprofloxacin by catalytic wet air oxidation using sewage sludge-based catalysts: Degradation mechanism by DFT studies”, por Gutiérrez-Sánchez *et al.*, 2023, Journal of Environmental Chemical Engineering.

Hemavibool *et al.* (2022) lograron una degradación fotocatalítica de 72 % de TC (10 mg/L) usando 50 mg del material BiVO_4 bajo luz solar natural y una degradación fotocatalítica de 93 % de oxitetraciclina con las mismas condiciones. Para la eliminación de este último antibiótico, Wannakan *et al.* (2023) fabricaron, por su parte, una estructura de ZnO/BiVO_4 . El estudio fotocatalítico se realizó en una solución acuosa de 10 mg/L de oxitetraciclina en presencia de 50 mg del fotocatalizador, bajo radiación UV simulada y bajo luz solar natural. El fotocatalizador ZnO/BiVO_4 mostró 95 % de degradación fotocatalítica del antibiótico bajo luz solar durante 100 min y 88 % de degradación fotocatalítica del antibiótico usando una lámpara UV de 125 W como fuente de luz durante 240 min. Por otro lado, Cheng *et al.* (2023) construyeron compuestos heterogéneos de $\text{MoS}_2/\text{BiVO}_4$ usando MoS_2 (disulfuro de molibdeno o sulfuro de molibdeno(IV)), el cual se obtuvo por tratamiento hidrotermal. Los materiales de $\text{MoS}_2/\text{BiVO}_4$ se sintetizaron por microondas añadiéndose diferentes cantidades de MoS_2 para obtener las muestras MB3, MB5 y MB7. Los valores de tamaño de cristal promedio que presentaron las muestras de BiVO_4 , MB3, MB5 y MB7 fueron 6.9 nm, 2.9 nm, 5.5 nm y 17.2 nm, respectivamente. Se logró un 39.7 % de degradación fotocatalítica de TC (5 mg/L) usando 50 g del material BiVO_4 bajo luz visible por 90 min y un porcentaje de degradación fotocatalítica de 93.7 de TC (5 mg/L) usando 50 g de la muestra MB5 bajo luz visible por 90 min.

Aun cuando se ha logrado porcentajes adecuados de desintoxicación de contaminantes nocivos usando materiales basados en BiVO_4 , continúa la necesidad de mejorar las propiedades estructurales, texturales y morfológicas de estos materiales para la eliminación completa de contaminantes emergentes usando menores cantidades del fotocatalizador.

Los compuestos heterogéneos basados en ZnO y BiVO_4 han demostrado un potencial significativo en la actividad fotocatalítica para aplicaciones en la remediación ambiental con el tratamiento de aguas. Se considera, entonces, una contribución de interés para la comunidad científica, el estudio de la obtención de porcentajes adecuados de degradación fotocatalítica de contaminantes emergentes en fase acuosa con concentraciones iguales o superiores a 10 mg/L. Esto, usando también cantidades menores a 50 mg de fotocatalizador. Además, es relevante encontrar las condiciones óptimas de preparación para sintetizar tanto los polvos de óxidos semiconductores de ZnO prístino como los polvos de BiVO_4 prístino. Lo anterior, usando síntesis por microondas que no requieran tratamientos térmicos a altas temperaturas posteriores para obtener compuestos con morfologías homogéneas y con bandas prohibidas modificadas.

México. Universidad Autónoma de Tabasco.

Capítulo 3. Objetivos

3.1 Pregunta de investigación

¿Qué efecto tiene el contenido de BiVO_4 en compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de BiVO_4) en la degradación fotocatalítica de los antibióticos TC y CIP?

3.2 Hipótesis

Los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4), obtenidos mediante síntesis asistida por microondas con tiempos cortos de reacción, presentarán mayor porcentaje de degradación fotocatalítica de los antibióticos TC y CIP en fase acuosa en comparación con los materiales de ZnO prístino y BiVO_4 prístino.

3.3 Objetivo general

Desarrollar materiales de ZnO , BiVO_4 y BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4) mediante el método de síntesis asistida por microondas para evaluar su actividad fotocatalítica frente a los antibióticos TC y CIP bajo radiación UV.

3.4 Objetivos específicos

- Obtener materiales de ZnO y BiVO_4 mediante el método de síntesis asistida por microondas para fabricar compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4 .
- Determinar las propiedades estructurales, texturales, morfológicas y análisis de banda prohibida de los materiales de ZnO , BiVO_4 y BiVO_4/ZnO mediante difracción de rayos X, espectroscopía Raman, fisisorción de nitrógeno (N_2), microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión y espectroscopía UV-Visible para caracterizar las muestras.
- Evaluar la actividad fotocatalítica de los materiales de ZnO , BiVO_4 y BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4) mediante la degradación fotocatalítica de AM, TC y CIP bajo radiación UV para analizar el efecto del contenido de BiVO_4 .

Capítulo 4. Metodología

4.1 Etapa de síntesis de los materiales

4.1.1 Precursores

La Tabla 1 presenta los reactivos usados para la preparación de los materiales de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO₄.

Tabla 1

Reactivos usados para la preparación de materiales de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO₄)

Reactivo	Fórmula química
Acetato de zinc dihidratado	Zn(CH ₃ COO) ₂ *2H ₂ O
Agua desionizada	H ₂ O
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH
Hidróxido de sodio	NaOH
Nitrato de bismuto(III) pentahidratado	Bi(NO ₃) ₃ *5H ₂ O
Metavanadato de amonio	NH ₄ VO ₃
Ácido nítrico	HNO ₃
Óxido de bismuto(III)	Bi ₂ O ₃
Óxido de vanadio(V)	V ₂ O ₅

4.1.2 Metodología de síntesis de ZnO

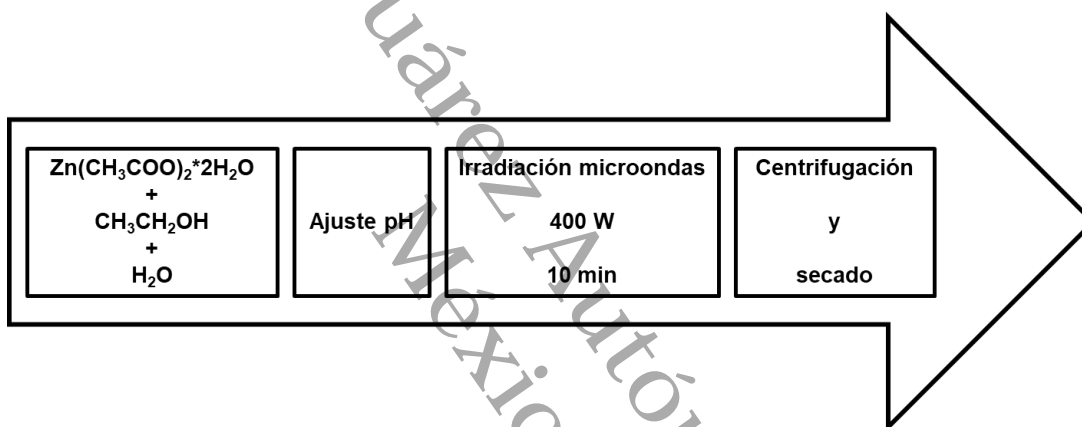
Los polvos de ZnO fueron sintetizados por el método asistido por microondas con base en la metodología reportada por Arellano-Cortaza *et al.* (2021). En un proceso típico de síntesis de ZnO, 0.02 mol de Zn(CH₃COO)₂*2H₂O y 0.72 mL de agua desionizada fueron disueltos en 50 mL de CH₃CH₂OH, un solvente polar que favorece el calentamiento dieléctrico por microondas. Posteriormente, se agregó por goteo una solución de NaOH 6 M mientras se mantuvo una parrilla de agitación para modificar el valor de pH de la solución de reacción a 8. Esta mezcla resultante se transfirió a un recipiente a presión que fue colocado en un microondas Anton Paar. La reacción ocurrió en este equipo manteniéndose una potencia de 400 W por 10 min, condiciones para obtener la estructura hexagonal tipo wurtzita del ZnO. Una vez concluida la reacción en el microondas, se realizó el proceso de lavado del producto resultante con agua desionizada (*i.e.*, al menos tres veces o hasta obtener un pH de 7 en el decantado) para eliminar trazas o residuos

de subproductos de la reacción usando una centrifuga SCIENCE MED modelo DM0412S. Los sólidos fueron secados en un horno eléctrico de secado ECOSHEL 9023 A para eliminar los residuos de agua y trazas de componentes orgánicos. Los óxidos semiconductores de ZnO fueron triturados en un mortero de ágata con pistilo para mantener condiciones asépticas que eviten la contaminación del material y posteriormente fueron guardados para su caracterización.

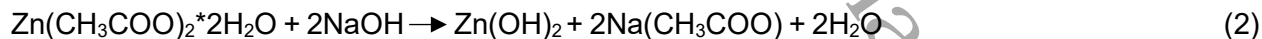
En la Figura 10, se muestra un esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de ZnO por microondas

Figura 10

Esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de ZnO por microondas



El mecanismo de reacción de los polvos de ZnO sintetizados por microondas puede ser considerado como se describe mediante las siguientes reacciones químicas:



El $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ disuelto en $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ genera iones de acetato y Zn^{2+} . A esta solución, se añade NaOH que actúa como fuente de iones OH^- . La mezcla de Zn^{2+} con los iones OH^- producen las especies intermedias descritas en la ec. (2). El pH alcalino del medio de reacción promueve el crecimiento de la unidad intermedia $\text{Zn}(\text{OH})_2$; esta unidad reacciona con moléculas de agua para formar el ion zincato $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$. La unidad de transición $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ se descompone y da como resultado el crecimiento de los cristales de ZnO (Ait Abdelouhab et al., 2020).

4.1.3 Metodología de síntesis de BiVO_4

Los polvos de BiVO_4 fueron sintetizados por microondas mediante dos rutas de síntesis con base en lo reportado por Cheng *et al.* (2023) y Chen *et al.* (2020). Se realizó un diseño de experimento factorial 2^2 para la obtención de BiVO_4 por la ruta de síntesis asistida por microondas basada en la metodología reportada por Cheng *et al.* (2023) usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3 como precursores.

La Tabla 2 presenta los factores controlados en el diseño de experimento para sintetizar BiVO_4 usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3 como precursores.

Tabla 2

Factores controlados en el diseño de experimento para sintetizar BiVO_4 usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3 como precursores

Factor	Nivel bajo	Nivel alto
pH del medio de reacción	1	7
Tiempo de reacción	15 min	30 min

Por otra parte, para sintetizar BiVO_4 mediante la metodología reportada por Chen *et al.* (2020) usando Bi_2O_3 y V_2O_5 como precursores, se varió el tiempo de reacción por microondas: 15 min, 20 min, 30 min y 60 min.

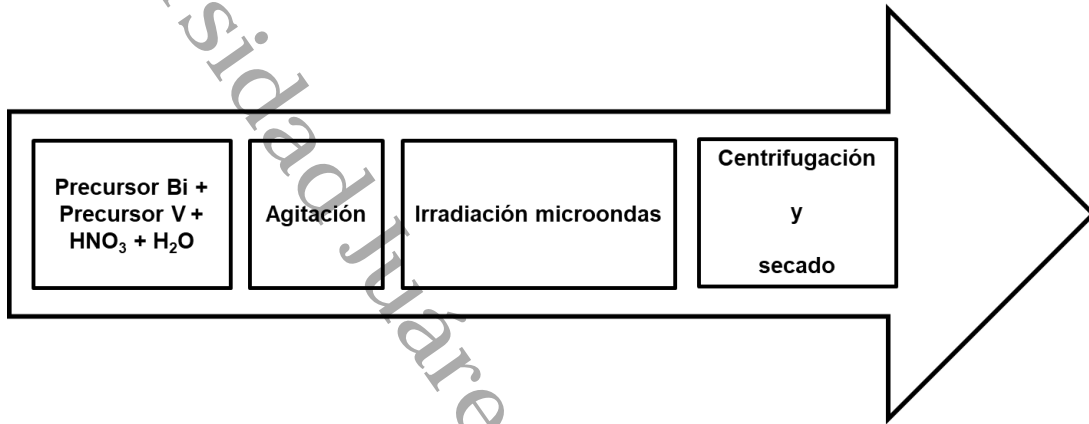
En un proceso típico de síntesis de BiVO_4 con base en lo reportado por Cheng *et al.* (2023), 0.005 mol de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y 0.005 mol de NH_4VO_3 fueron añadidos en 50 mL de una solución de HNO_3 0.5 M. Se usó una solución de NaOH para modificar el valor de pH. Después, la mezcla fue transferida a un equipo microondas Anton Paar para que ocurriera la reacción a 130 °C. Esto, para obtener la estructura monoclinica tipo scheelita del material BiVO_4 . El producto resultante se lavó continuamente con agua desionizada (*i.e.*, al menos tres veces o hasta obtener un pH de 7 en el decantado) para eliminar trazas o residuos de subproductos de la reacción usando una centrifuga SCIENCE MED modelo DM0412S. Los polvos de BiVO_4 se secaron en un horno eléctrico de secado ECOSHEL 9023 A.

Se realizó un proceso similar usando 0.005 mol de Bi_2O_3 y 0.005 mol de V_2O_5 en 50 mL de una solución de HNO_3 0.5 M para obtener polvos de BiVO_4 mediante la metodología reportada por Chen *et al.* (2020) para fines comparativos y de optimización. La reacción ocurrió a 180 °C en un microondas Anton Paar.

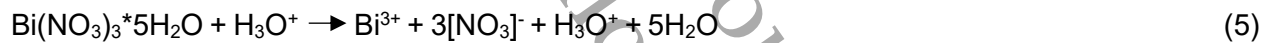
En la Figura 11, se muestra un esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de BiVO₄ por microondas.

Figura 11

Esquema general resumido del método usado para sintetizar polvos de BiVO₄ por microondas



El mecanismo de reacción de los polvos de BiVO₄ puede ser considerado como se describe mediante las siguientes reacciones químicas:



La mezcla de precursores de Bi y vanadio (V), disueltos en una solución de HNO₃, produce la neutralización ácido-base. El precursor de Bi se disocia en iones Bi³⁺ que reaccionan con moléculas de agua para formar hidrogeniones y especies intermedias de [Bi(OH)]²⁺ y [Bi(OH)₂]⁺, mientras que el precursor de V se disocia en iones [VO₃]⁻ y amonio. La unidad

intermedia $[\text{Bi}(\text{OH})_2]^+$ reacciona con el ion nitrato para formar BiONO_3 y agua. El pH ácido del medio de reacción promueve la formación de BiO^+ e incrementa la formación de iones reactivos $[\text{VO}_2]^+$ y $[\text{VO}_3]^-$. La interacción de las moléculas de transición BiO^+ y $[\text{VO}_3]^-$ dan como resultado el crecimiento de estructuras de BiVO_4 (Rodriguez et al., 2023).

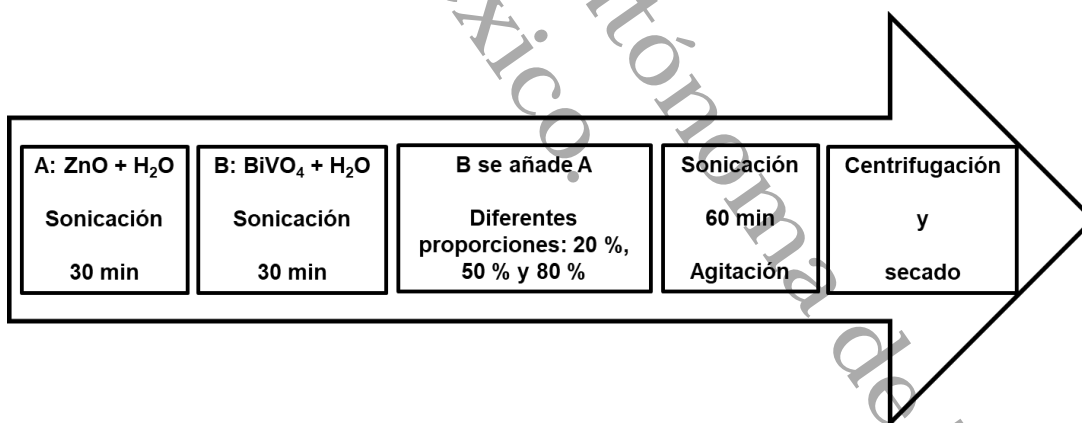
4.1.4 Metodología de fabricación de BiVO_4/ZnO

Los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4) se fabricaron mediante un método de mezcla por ruta ultrasónica que ha sido reportado en trabajos previos (Ch-Th et al., 2021; Wannakan et al., 2023).

En la Figura 12, se muestra un esquema general resumido del método usado para obtener vía ultrasónica compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4).

Figura 12

Esquema general resumido del método usado para obtener vía ultrasónica compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4)



0.2 g de ZnO fueron dispersados en 10 mL agua desionizada para formar la dispersión A y se agitó por baño ultrasónico durante 30 min, mientras la dispersión B se formó añadiendo 0.2 g de BiVO_4 en 10 mL de agua desionizada, la cual se sonicó por 30 min. La dispersión B fue agregada a la dispersión A con diferentes proporciones en volumen de contenido de BiVO_4 (20 %, 50 % y 80 %). La mezcla obtenida se sometió a baño ultrasónico por 60 min y seguidamente se agitó en una parrilla con un agitador magnético durante la noche. Los polvos resultantes fueron lavados continuamente con agua desionizada (*i.e.*, al menos tres veces o hasta obtener un pH

de 7 en el decantado) usando una centrifuga SCIENCE MED modelo DM0412S y secados en un horno eléctrico ECOSHEL 9023 A. Los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO fueron triturados en un mortero de ágata con pistilo para mantener condiciones asépticas que eviten la contaminación del material. Las muestras de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones de contenido de BiVO_4 (20 %, 50 % y 80 %) fueron guardadas para su posterior caracterización.

La Tabla 3 presenta la nomenclatura para nombrar los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4 .

Tabla 3

Nomenclatura de compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones: 20 %, 50 % y 80 % de contenido de BiVO_4

Nombre	Proporción en porcentaje (%) de contenido de BiVO_4
20BVZO	20
50BVZO	50
80BVZO	80

4.2 Etapa de caracterización de los materiales

Para conocer las propiedades de los fotocatalizadores se requieren de técnicas de caracterización de materiales como la difracción de rayos X, espectroscopía Raman, fisorción de nitrógeno (N_2), microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión y espectroscopía UV-Visible (UV-Vis) que proporcionen la información necesaria sobre la composición estructural, textural, morfológica y análisis de banda prohibida del material (Rodríguez-Peña & Barrera-Díaz, 2020).

4.2.1 Difracción de rayos X (DRX)

La dispersión de rayos X por átomos que están en posiciones ordenadas se llama difracción y los rayos X dispersados por materia ordenada se conocen como rayos difractados. Cuando hacemos incidir un haz de rayos X sobre un cristal, este choca con los átomos haciendo que los electrones que se encuentren en el camino vibren con una frecuencia idéntica a la de la radiación incidente. Estos electrones actúan como fuentes secundarias de nuevos frentes de onda de rayos X con la misma longitud de onda y frecuencia. La radiación dispersada por los átomos interfiere con radiación dispersada por átomos vecinos. Cuando un cristal difracta los

rayos X, las ondas electromagnéticas dispersadas reemitidas interfieren entre sí constructivamente o en fase solo en algunas direcciones, es decir, se refuerzan, y el resto se anula.

La Figura 13 presenta las interacciones de refuerzo y las interacciones que se anulan (destructivas) entre los rayos X y el material cristalino.

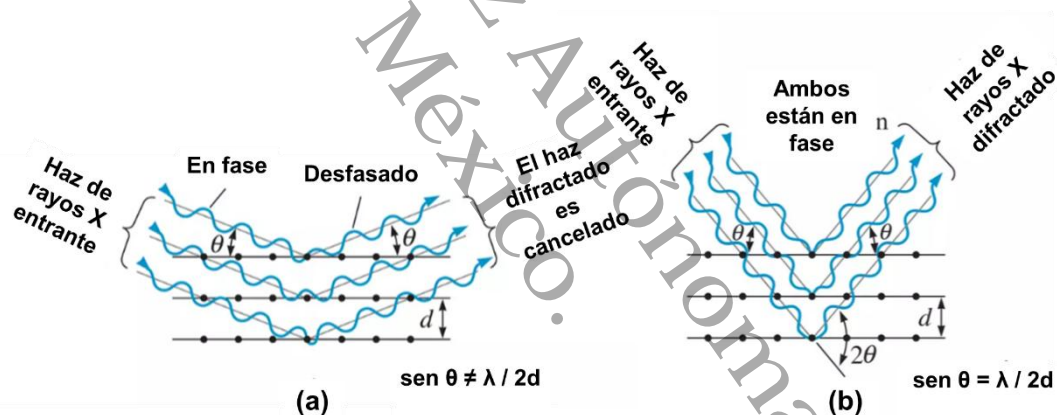
El refuerzo se produce en ángulos que satisfacen la ley de Bragg:

$$2d \operatorname{sen}\theta = n\lambda \quad (13)$$

Donde d es la distancia entre dos planos consecutivos, θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección del haz original, n es un número entero que se denomina orden de la reflexión y λ es la longitud de onda de los rayos X (Faraldos & Goberna, 2021).

Figura 13

Interacciones (a) destructivas y (b) de refuerzo entre los rayos X y el material cristalino



Nota. Adaptado de *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*, por Faraldos & Goberna, 2021, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se caracterizaron por DRX para su análisis estructural. Esto, con la finalidad de comprobar la obtención de los materiales de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO e identificar sus estructuras cristalinas. Un difractómetro Bruker modelo D2 Phaser (con una radiación de CuKα de 1.54 Å) fue usado para medir las muestras pulverizadas. Las mediciones fueron realizadas en un ángulo 2θ de 10° a 80°.

4.2.2 Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es un espectro de dispersión no elástica basado en la interacción entre la luz incidente y el material irradiado. Los enlaces químicos y las estructuras moleculares de las distintas sustancias son diferentes. Por lo tanto, cada sustancia tiene su huella espectral Raman distintiva (R. Zhu et al., 2025).

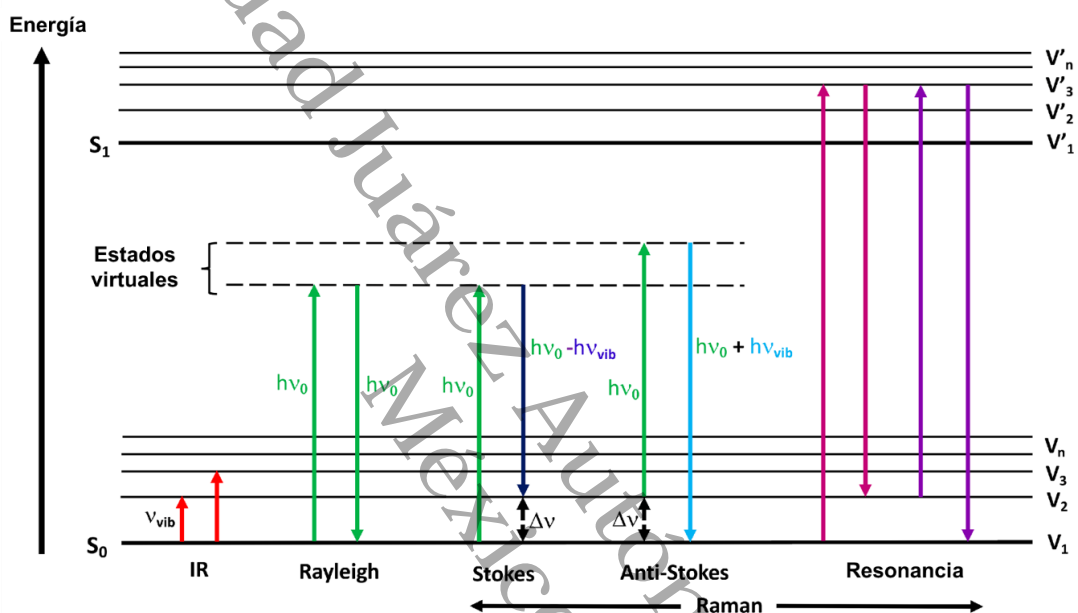
Esta herramienta analítica no destructiva se utiliza para caracterizar la estructura de materiales como el carbono; desde carbono grafitico como el grafito/grafeno y materiales relacionados con el grafeno, hasta películas de carbono amorfo producidas mediante diversos métodos de deposición. También, se usa ampliamente para estudiar el carbono vítreo, el coque y el negro de humo, además de sustancias carbonosas altamente amorfas como el carbón, el hollín y los compuestos poliaromáticos. Asimismo, ha encontrado aplicaciones en campos tales como la medicina, el monitoreo ambiental, el análisis forense y la seguridad alimentaria (Boateng, 2025; Yuan et al., 2025).

El efecto Raman espontáneo consiste en un proceso de dispersión inelástica de dos fotones tras la interacción de una radiación monocromática, tal como una fuente láser, con una muestra. Un fotón incidente, en las regiones espectrales UV, visible o infrarrojo cercano, induce, a través de su campo eléctrico, un cambio en la polarizabilidad descrito como una deformación de la nube electrónica de una molécula con respecto a su movimiento vibracional, lo que conduce a un momento dipolar inducido. Inmediatamente se emite un fotón desde el enlace molecular, que vuelve a su estado fundamental. Durante esta interacción, tienen lugar procesos de dispersión tanto elástica como inelástica. La mayoría de los fotones se emiten a la misma frecuencia (energía) que el fotón incidente, lo que corresponde a la dispersión elástica o de Rayleigh. La dispersión Raman se produce cuando los fotones se emiten a una frecuencia (energía) diferente a la de los fotones incidentes. Cuando los fotones transfieren energía a las moléculas en forma de energía vibracional, la pérdida de energía (frecuencia) de los fotones dispersados corresponde a los niveles de energía vibracional de las moléculas, lo que se conoce como dispersión Raman-Stokes. Cuando los fotones incidentes reciben energía de las moléculas vibrantes, su frecuencia (energía) aumenta, lo que se describe como dispersión Raman anti-Stokes (Gerald, 2020).

En la Figura 14, se muestra un diagrama de energía de Jablonski que muestra las transiciones implicadas durante los procesos de absorción infrarroja, Rayleigh, Raman Stokes, anti-Stokes y dispersión de resonancia Raman.

Figura 14

Diagrama de energía de Jablonski que muestra las transiciones involucradas durante la absorción infrarroja, Rayleigh, Raman Stokes, anti-Stokes y dispersión de resonancia Raman



Nota. Adaptado de "Introduction to Infrared and Raman-Based Biomedical Molecular Imaging and Comparison with Other Modalities", por Gerald, 2020, Molecules.

Las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se caracterizaron por espectroscopía Raman con un barrido de 80 cm⁻¹ a 1,000 cm⁻¹ para complementar la información estructural de los materiales. Un micro espectrofotómetro Raman Dilor modelo Labram II fue usado con un láser a 633 nm y un láser a una longitud de onda más energética de 488 nm para medir las muestras pulverizadas.

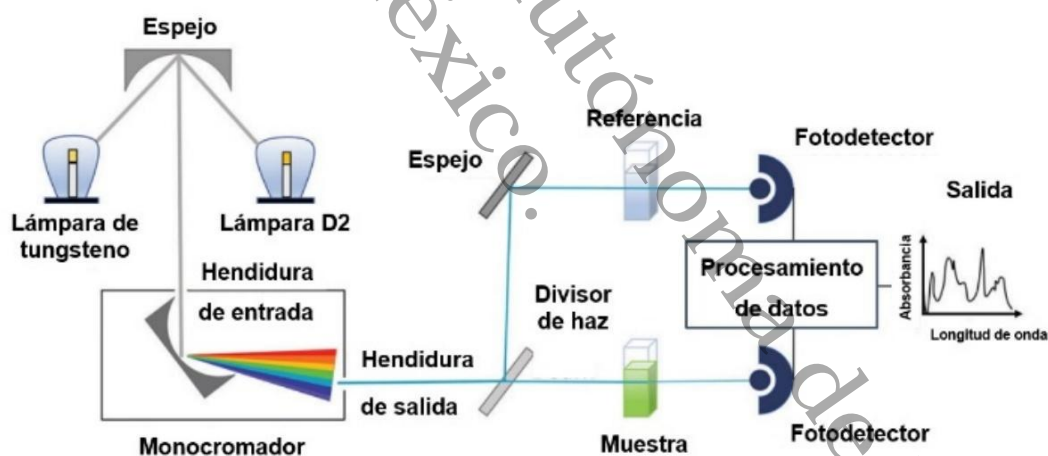
4.2.3 Espectroscopía UV-Visible (UV-Vis)

La espectroscopía es un método para identificar sustancias y realizar determinaciones cuantitativas a través de los espectros de emisión o absorción de sustancias, que se ha utilizado frecuentemente en campos como la determinación rápida de la calidad del agua (Guo et al., 2020). Los espectrofotómetros UV-Vis dirigen una fuente de luz a través de una muestra y un fotodetector en el lado opuesto registra la luz transmitida. Aunque la longitud de onda UV oscila entre 100 nm y 380 nm y el componente visible llega hasta 800 nm, la mayoría de los espectrofotómetros tienen un rango de longitud de onda de trabajo entre 200 nm y 1100 nm. El rango práctico para la espectroscopía UV-vis varía de 200 nm a 800 nm (Rocha et al., 2018). Los instrumentos para medir la absorción de UV o radiación visible se conforman de una fuente, monocromador, celda de muestra, fotodetector, sistema de lectura, amplificador y salida (Govinda & Manish, 2018).

En la Figura 15, se muestra un esquema general de un espectrofotómetro UV-Vis.

Figura 15

Esquema general de un espectrofotómetro UV-Vis



Nota. Adaptado de “Experimental methods in chemical engineering: Ultraviolet visible spectroscopy—UV-Vis”, por Rocha *et al.*, 2018, The Canadian Journal of Chemical Engineering.

Por su parte, los espectrofotómetros UV-Vis con accesorio de esfera integradora para reflectancia difusa comparan la luz incidente con la reflejada por la muestra y es integrada por la esfera. El fundamento de esta técnica se basa en la superficie del medio sobre el cual se le incide luz. Si se presenta una superficie con irregularidades, el rayo incidente y reflejado no están en el mismo plano y ángulo, por lo cual, la reflexión no puede ser especular. Esto, debido a que la

radiación incidente se distribuye por toda la superficie del material una vez reflejada. A la radiación reflejada se le nombra radiación difusa y es caracterizada con la técnica de reflectancia difusa por medio de un espectrofotómetro dotado de una esfera integradora. Con esta última, es posible medir la energía total difundida por toda la superficie (Tapia-Zarate, 2022).

Las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se caracterizaron por espectroscopía UV-Vis. Esto, con la finalidad de conocer los bordes de absorción de los materiales y estimar los valores de banda prohibida. Las mediciones fueron realizadas usando un espectrofotómetro SHIMADZU modelo UV-2600 con un barrido en el rango de 220 nm a 800 nm después de compactar las muestras pulverizadas para formar una pastilla.

4.2.4 Fisisorción de nitrógeno (N₂)

La fisisorción o adsorción física se refiere al fenómeno general que ocurre cuando un gas (e.g., nitrógeno) que puede adsorberse entra en contacto con la superficie de un sólido. Esto, es debido a las fuerzas atractivas entre las moléculas del gas y los átomos o iones que componen la superficie sólida. La densidad de las moléculas de gas aumenta en las proximidades de la superficie del sólido a causa de las fuerzas de Van der Waals; a esta región de mayor densidad de gas se denomina espacio de adsorción. Para evaluar la adsorción de gas sobre un sólido de interés, es conveniente realizar un experimento con la temperatura constante donde se registra la cantidad adsorbida en función de la presión o concentración de la fase gas. A esta relación entre la cantidad adsorbida y la presión de equilibrio del gas se conoce como isoterma de adsorción.

Las diferentes formas de cada tipo de isoterma de adsorción están relacionadas con diferencias en la energía de interacción entre la fase gas y el sólido, así como con la porosidad de este último. Los tamaños de poro han sido clasificados en tres rangos de anchuras:

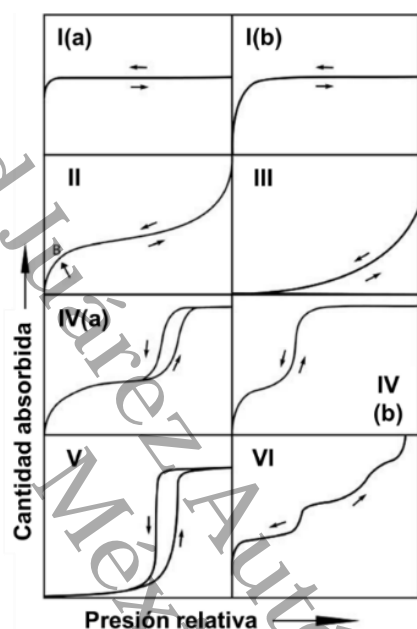
- Microporos: < 2 nm
- Mesoporos: 2 nm a 50 nm
- Macroporos: > 50 nm

Esta clasificación ha sido realizada para describir la naturaleza de los sólidos que dan lugar a los diferentes tipos de isotermas. Materiales microporos tipo I, no porosos tipo II, III y VI, mesoporosos tipo IV y V (Faraldos & Goberna, 2021; Sotomayor et al., 2018).

En la Figura 16, se muestran los cinco tipos de isothermas de adsorción en la clasificación original de Brunauer, Deming, Deming y Teller más un sexto tipo añadido por la IUPAC, ahora denominados con los números romanos de I a VI.

Figura 16

Clasificación de las isothermas de adsorción de acuerdo con la IUPAC: tipo I, II, III, IV, V y VI



Nota. Adaptado de “Characterization of Micro/Mesoporous Materials by Physisorption: Concepts and Case Studies”, por Sotomayor *et al.*, 2018, Accounts of Materials & Surface Research.

Las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se caracterizaron por fisisorción de N₂ para su análisis textural. Esto, con la finalidad de conocer los valores de área de superficial y tamaño de poro de los materiales. Una temperatura de 200 °C (473.15 K) fue usada para el proceso de desgasificación a fin de asegurar que las superficies de las muestras pulverizadas se encontraran limpias. El análisis de fisisorción de N₂ se realizó a temperatura constante mediante un equipo Autosorb iQ con un baño a temperatura del nitrógeno líquido: -196.15 °C (77 K).

4.2.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El sistema de formación de una imagen en microscopía electrónica de barrido (MEB) se basa en el sistema óptico de reflexión: el objeto se ilumina frontalmente, siendo los haces reflejados los responsables de la información final. En un microscopio electrónico de barrido, el

haz pasa mediante las lentes condensadoras y de objetivo, y es barrido a lo largo de la muestra por las bobinas de barrido, mientras que un detector cuenta el número de electrones secundarios de baja energía emitidos por cada punto de la superficie (Faraldos & Goberna, 2021).

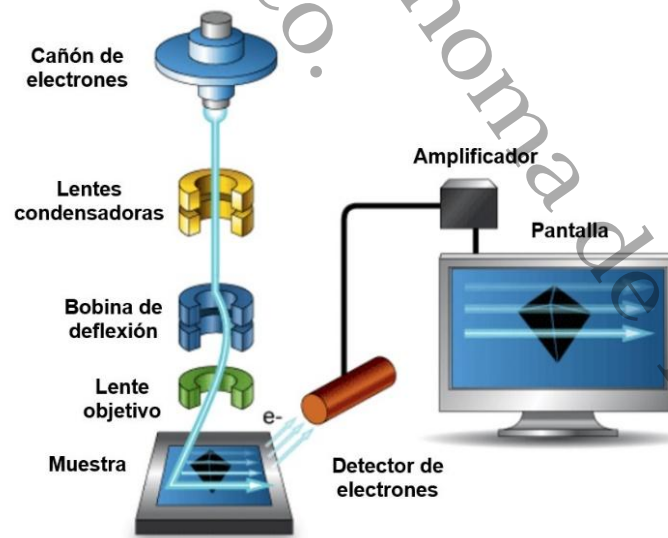
Los principales componentes de un sistema de MEB son (Mohammed & Abdullah, 2018):

- Cañón de electrones: una fuente para generar electrones de alta energía
- Columna hacia abajo para viajar los electrones a través de dos o más lentes electromagnéticas
- Sistema de desviación: bobinas de escaneo.
- Detector de electrones para electrones retrodispersados y secundarios
- Cámara para la muestra
- Sistema informático: una pantalla de visualización para mostrar las imágenes escaneadas y un teclado para controlar el haz de electrones

En la Figura 17, se muestra un esquema general de los componentes de un microscopio electrónico de barrido.

Figura 17

Esquema general de componentes de un microscopio electrónico de barrido



Nota. Adaptado de "Scanning Electron Microscopy (SEM): A review", por Mohammed & Abdullah, 2018, Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics HERVEX.

Aunque con la MEB se puede sondear la topografía y morfología de la superficie, existen limitaciones para adquirir otra información determinada. Para superar dichas limitaciones, la MEB se combina con otras técnicas analíticas para obtener información complementaria para los materiales en cuestión, como la espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (F. Liu et al., 2023).

La estructura morfológica de las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se investigó mediante MEB. Un voltaje de aceleración de 5 kV fue usado para la toma de las micrografías. Las imágenes fueron procesadas mediante el software ImageJ.

4.2.6 Microscopía electrónica de transmisión (MET)

La MEB proporciona información sobre las estructuras superficiales mientras que la microscopía electrónica de transmisión (MET) se encuentra entre las técnicas más prometedoras para revelar la alineación ordenada de largo alcance a nivel atómico (Espenti et al., 2025).

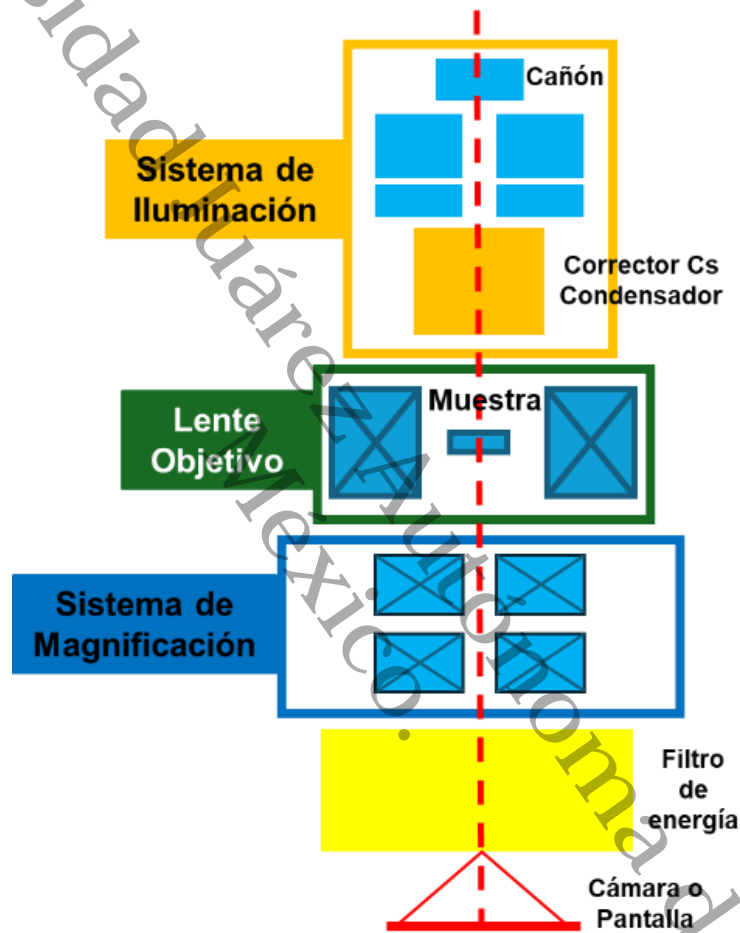
Los microscopios electrónicos están compuestos de varios sistemas. Los principales sistemas son: sistema óptico, alto voltaje, fuente de electrones, vacío en la columna, refrigeración, sistema electrónico y detectores. El sistema óptico sirve para formar las imágenes, este es el proceso fundamental en la microscopía. Entender con claridad este sistema es de importancia, para interpretar las imágenes obtenidas que se generan por la interacción del haz de electrones con la muestra (Paraguay-Delgado, 2020).

Una imagen de MET no es simplemente la proyección o la sombra de la muestra, sino el resultado de un complejo proceso de dispersión de electrones a través de la muestra en el que la función de onda del electrón incidente se modifica por los potenciales atómicos (Espenti et al., 2025).

En la Figura 18, se muestra el esquema de las lentes electromagnéticas que están agrupadas en tres: sistema de iluminación, formación de imagen y sistema de magnificación.

Figura 18

Esquema general del microscopio electrónico de transmisión mostrando sistema de iluminación, objetivo y magnificación



Nota. Adaptado de “Técnicas de microscopía electrónica usadas en el estudio de nanopartículas”, por Paraguay-Delgado, 2020, Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología.

El análisis mediante MET de las muestras de ZnO, BiVO₄ y BiVO₄/ZnO se realizó con un equipo JEOL JEM 2200FS. Las imágenes fueron procesadas usando el software DigitalMicrograph y el software ImageJ.

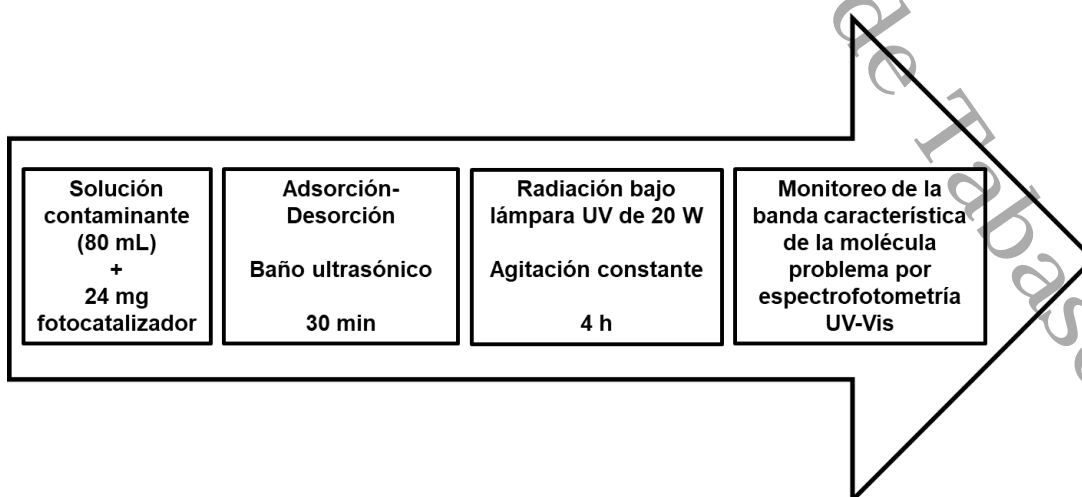
4.3 Etapa de evaluación fotocatalítica de los materiales

La actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO fue evaluada mediante la degradación fotocatalítica del colorante AM (C₁₆H₁₈ClN₃S) y los antibióticos TC (C₂₂H₂₄N₂O₈) y CIP (C₁₇H₁₈N₃FO₃) con una concentración de 10 mg/L, 15 mg/L y 15 mg/L, respectivamente. La fuente de radiación usada fue una lámpara UVA Tecnolite de 20 W que emite una longitud de onda entre 400 nm y 320 nm con una media aproximada de 365 nm. En una prueba fotocatalítica típica, 24 mg del fotocatalizador fueron añadidos en 80 mL de la solución contaminante (Arellano-Cortaza et al., 2021). Seguidamente, se sonicó en un baño ultrasónico por 30 min manteniéndose en oscuridad para alcanzar el equilibrio adsorción-desorción; una vez transcurrido el tiempo se tomó la primer alícuota. Después, la solución se llevó al medio de reacción bajo la fuente de radiación UV con una agitación constante. Las alícuotas fueron tomadas por un tiempo total de 4 h en intervalos de 30 min. Cada muestra representativa fue centrifugada a 2,000 RPM por 10 min. Las medidas de absorbancia fueron realizadas para monitorear los cambios en la banda característica de la molécula problema mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 664 nm, 357 nm y 323 nm para AM, TC y CIP, respectivamente.

En la Figura 19, se muestra un esquema general resumido del método usado para evaluar la actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO bajo radiación UV frente a AM, TC y CIP.

Figura 19

Esquema general resumido del método usado para evaluar la actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO bajo radiación UV frente a AM, TC y CIP



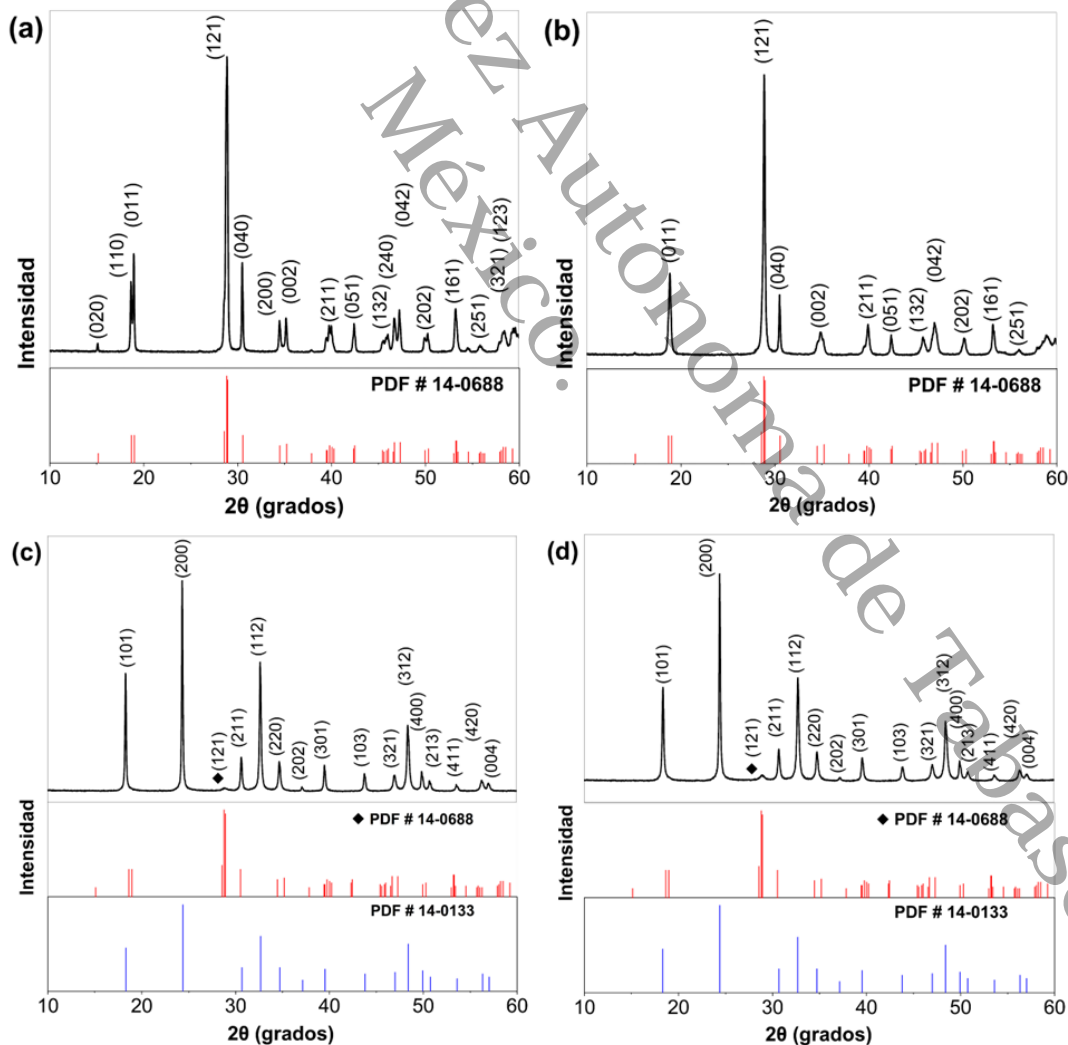
Capítulo 5. Resultados y discusión

5.1 Análisis estructural de muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por DRX

En la Figura 20, se presentan los difractogramas de muestras de BiVO₄ usando Bi(NO₃)₃·5H₂O y NH₄VO₃ como precursores con (a) 15 min de irradiación por microondas a pH 1, (b) 30 min de irradiación por microondas a pH 1, (c) 15 min de irradiación por microondas a pH 7 y (d) 30 min de irradiación por microondas a pH 7.

Figura 20

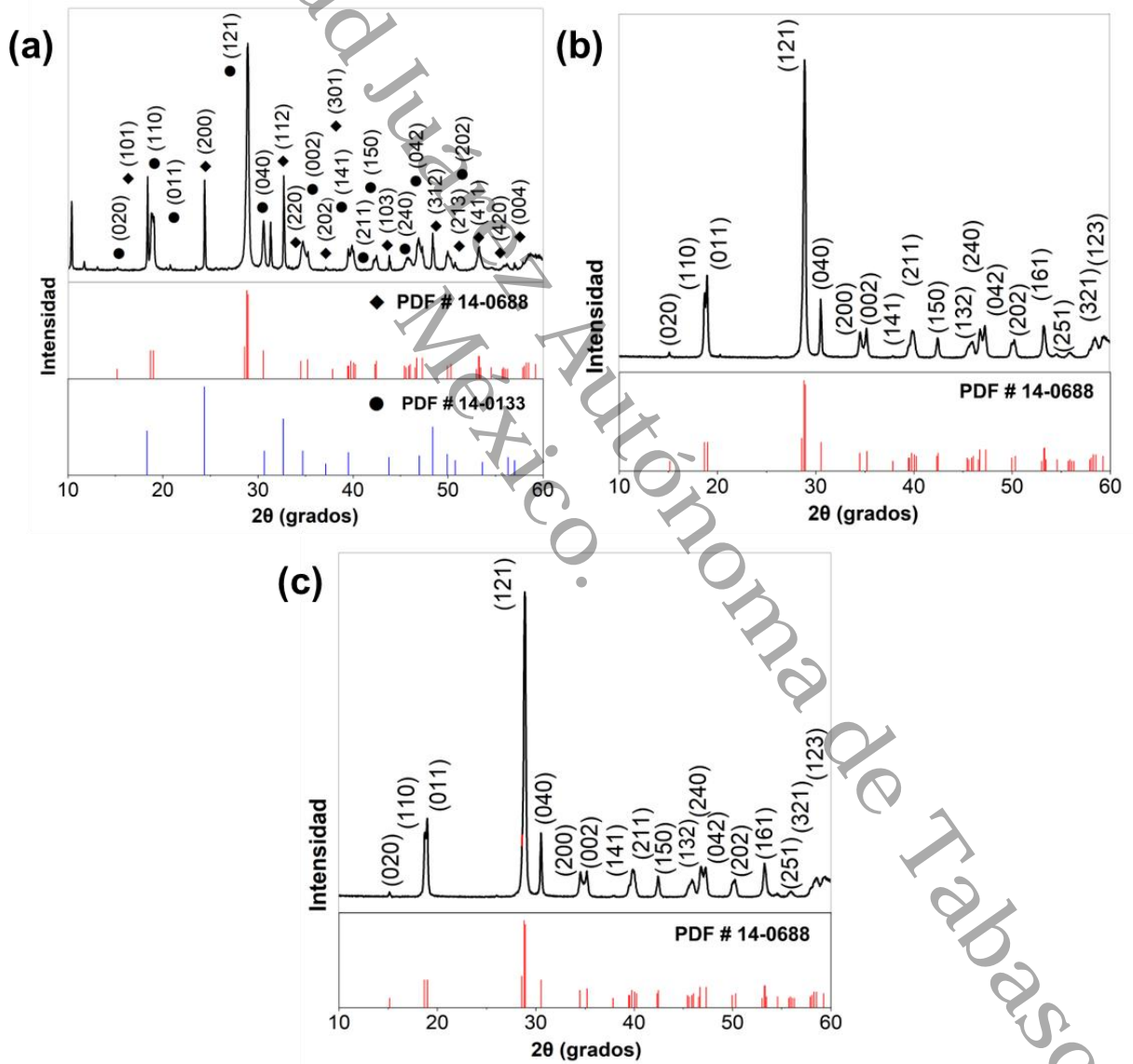
Difractogramas de rayos X de muestras de BiVO₄ usando Bi(NO₃)₃·5H₂O y NH₄VO₃ como precursores con (a) 15 min de irradiación por microondas a pH 1, (b) 30 min de irradiación por microondas a pH 1, (c) 15 min de irradiación por microondas a pH 7 y (d) 30 min de irradiación de microondas a pH 7



En la Figura 21, se presentan los difractogramas de muestras de BiVO_4 usando precursores menos tóxicos: Bi_2O_3 y V_2O_5 , durante (a) 15 min de irradiación por microondas, (b) 30 min de irradiación por microondas y (c) 60 min de irradiación por microondas.

Figura 21

Difractogramas de rayos X de muestras de BiVO_4 usando Bi_2O_3 y V_2O_5 como precursores durante (a) 15 min de irradiación por microondas, (b) 30 min de irradiación por microondas y (c) 60 min de irradiación por microondas



Se puede observar en la Figura 20 a, b que las muestras de BiVO_4 sintetizadas con un pH de 1 durante 15 min y 30 min de irradiación por microondas, usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3 como precursores, presentan picos agudos de difracción que corresponden a la fase monoclinica del BiVO_4 (PDF # 14-0688) (Cheng et al., 2023; Wannakan et al., 2023). Los picos ubicados en 18.98° , 28.94° , 30.54° , 35.22° , 39.78° , 42.46° , 46.03° , 47.30° , 50.31° , 53.31° y 55.87° de la posición 2θ se atribuyen a los planos (011), (121), (040), (002), (211), (051), (132), (042), (202), (161) y (251). No se identifican picos adicionales que muestren impurezas u otras fases.

Las muestras de BiVO_4 sintetizadas con un pH modificado de la reacción a 7 durante 15 min y 30 min de irradiación por microondas (Figura 20 c, d), usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3 como precursores, presentan picos de difracción que corresponden a la fase tetragonal del BiVO_4 (PDF # 00-014-0133) (Lenczewska et al., 2022). Los picos ubicados en 18.31° , 24.37° , 30.67° , 32.67° , 34.71° , 37.13° , 39.52° , 43.80° , 46.99° , 48.40° , 49.31° , 50.76° , 53.61° , 56.32° y 57.01° de la posición 2θ se atribuyen a los planos (101), (200), (211), (112), (220), (202), (301), (103), (321), (312), (400), (213), (411), (420) y (004). Se identifica una señal a 28.94° en 2θ que se atribuye al inicio de la formación de la fase monoclinica del BiVO_4 . Lo anterior, coincide con el comportamiento reportado en otros trabajos donde la estructura cristalina puede controlarse mediante el valor del pH. Rodrigues *et al.*, (2023) obtuvieron dos fases distintas (monoclinica y tetragonal) del material BiVO_4 sintetizado en medios ácidos por microondas. Por su parte, Lenczewska, K. *et al.*, (2022) obtuvieron polvos BiVO_4 en fase monoclinica con un pH de la solución de reacción igual a 7 sintetizados por microondas, sin embargo, el material BiVO_4 cristalizó en la fase tetragonal al impurificarlo con Tm^{3+} , mostrándose una tendencia opuesta en comparación con el BiVO_4 no impurificado.

La muestra de BiVO_4 sintetizada usando Bi_2O_3 y V_2O_5 como precursores durante 15 min de irradiación por microondas presenta picos de difracción que corresponden a dos fases distintas del BiVO_4 : monoclinica (PDF # 14-0688) (Cheng et al., 2023; Wannakan et al., 2023) y tetragonal (PDF # 00-014-0133) (Lenczewska et al., 2022), como se puede ver en la Figura 21a. Por su parte, las muestras de BiVO_4 sintetizadas usando Bi_2O_3 y V_2O_5 como precursores durante 30 min y 60 min de irradiación por microondas presentan picos de difracción que son atribuidos a los planos característicos (110), (011), (121) y (040) de la estructura monoclinica del BiVO_4 de acuerdo con PDF # 14-0688 (Cheng et al., 2023; Wannakan et al., 2023) (Figura 21 b,c).

La Tabla 4 presenta el tamaño de cristal estimado usando la ecuación de Scherrer (ec. (14)) y los valores en 2θ de las muestras de BiVO_4 . Cuando se hace el cálculo con un solo pico de difracción se elige entre 30° y 50° en 2θ , ya que para ángulos mayores se produce una disminución de intensidad de los picos y el ensanchamiento es mayor, y para ángulos menores la asimetría de los picos puede complicar el análisis (Faraldos & Goberna, 2021).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (14)$$

Donde D es el tamaño de cristal, K es un factor de forma igual a 0.9, λ es la longitud de onda de la radiación utilizada (0.1540 nm), β es el ancho medio de los picos de difracción (FWHM) y θ es la posición del pico de difracción en radianes (Holzwarth & Gibson, 2011; Patterson, 1939).

Tabla 4

Tamaño de cristal de las muestras de BiVO_4 sintetizadas por microondas usando $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, NH_4VO_3 , Bi_2O_3 y V_2O_5 como precursores

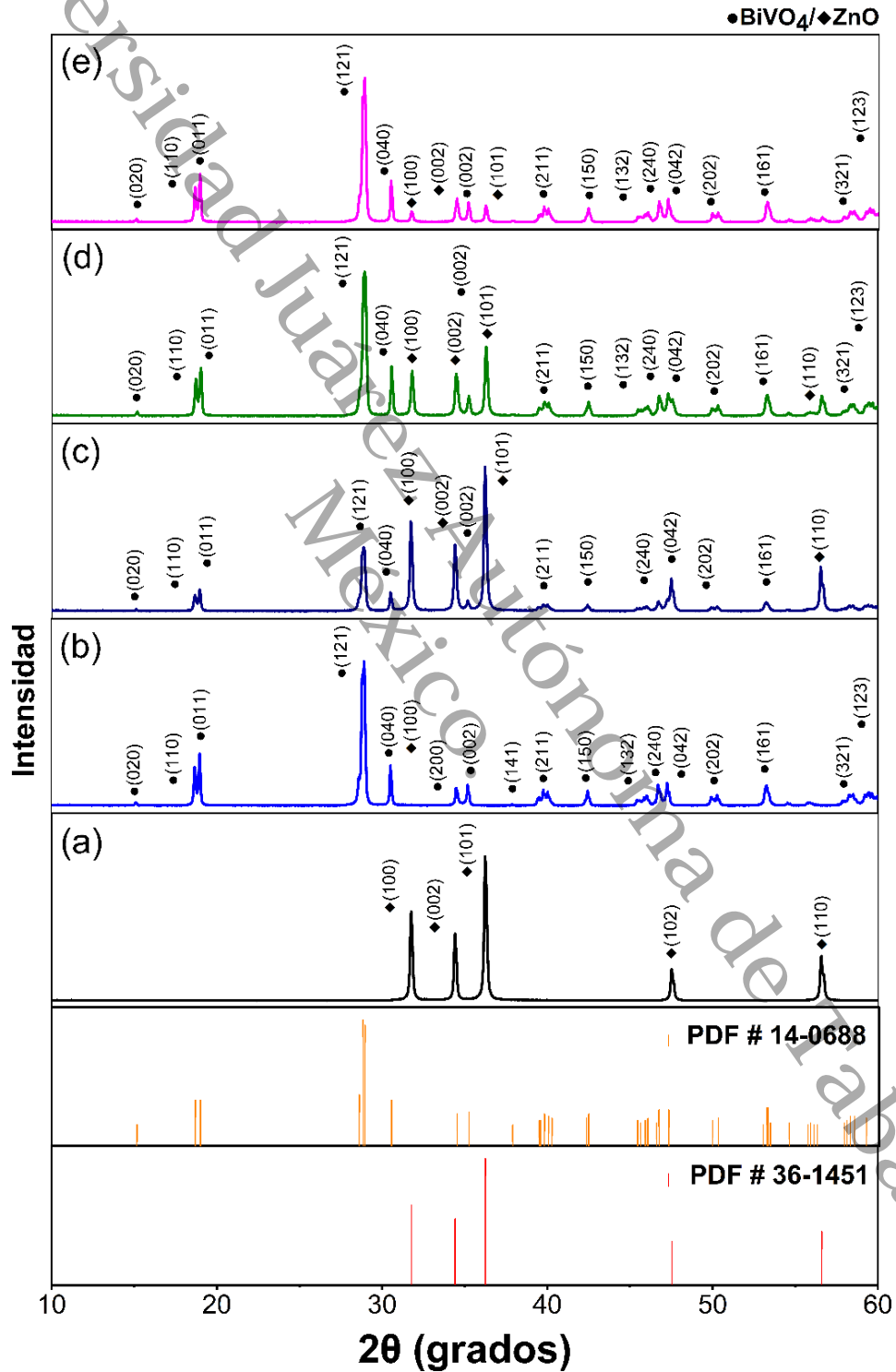
Muestra de BiVO_4			2θ	FWHM	Tamaño de cristal (nm)
Precursores	Tiempo de reacción (min)	pH	(grados)		
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3	15	1	28.89	0.270	30.37
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3	30	1	28.89	0.250	32.79
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3	15	7	24.35	0.159	51.09
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y NH_4VO_3	30	7	24.41	0.176	46.18
Bi_2O_3 y V_2O_5	15	1	28.90	0.316	25.97
Bi_2O_3 y V_2O_5	30	1	28.92	0.282	29.13
Bi_2O_3 y V_2O_5	60	1	28.91	0.281	29.16

Con base en estos resultados, se sintetizaron polvos de BiVO_4 con los materiales precursores de Bi_2O_3 y V_2O_5 durante 20 min de irradiación por microondas a 180°C para fabricar compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO , puesto que la estructura monoclnica de BiVO_4 presenta porcentajes de degradación fotocatalítica mayores en comparación con la estructura tetragonal (Rodrigues et al., 2023).

En la Figura 22, se presentan los difractogramas de rayos X de las muestras de (a) ZnO , (b) BiVO_4 , (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas.

Figura 22

Difractogramas de rayos X de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas



Se puede observar en la Figura 22a que la muestra de ZnO prístino presenta picos de difracción agudos que corresponden a estructura hexagonal tipo wurtzita del ZnO de acuerdo con la tarjeta (PDF # 36-1451) (Arellano-Cortaza et al., 2021; Jahan Tamanna et al., 2024; Kabir et al., 2024). Los picos ubicados en 31.77°, 34.42°, 36.25°, 47.54° y 56.60° de la posición 2θ corresponden a los planos (100), (002), (101), (102) y (110). No se identifican picos adicionales que muestren impurezas u otras fases del material. Por su parte, la posición de los picos de difracción alrededor de 18°, 19°, 28° y 30° en el difractograma de BiVO₄ prístino se atribuyen a los planos (110), (011), (121) y (040), lo que coincide con la tarjeta PDF # 14-0688 (Beura et al., 2024; M. Zhu et al., 2024). Se puede ver en la Figura 22 b, c, d, que las muestras 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO presentan los picos característicos del ZnO y las reflexiones significativas del BiVO₄. Los picos agudos e intensos representan una buena cristalinidad de los materiales. Estos resultados confirman la obtención de los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO.

El método más habitual y sencillo para estimar el tamaño de partículas cristalinas a partir de las anchuras de sus picos de difracción de rayos X es el desarrollado por Scherrer en 1918. Este método, sin embargo, no tiene en cuenta las tensiones que puedan tener lugar en el dominio cristalino (Faraldos & Goberna, 2021). Los pequeños tamaños de cristallitos introducen un ensanchamiento adicional en los picos de difracción. Si los cristallitos son pequeños, la cantidad de planos paralelos disponibles es demasiado pequeña para que se forme un máximo de difracción nítido y los picos en el patrón de difracción se ensanchan (Suryanarayana & Norton, 1998). El tamaño de cristal usando el análisis Williamson-Hall considera los esfuerzos debido a la distorsión y deformación de la red (ec. (15)):

$$\beta_T \cos\theta = \varepsilon(4\text{seno}\theta) + \frac{K\lambda}{D} \quad (15)$$

Donde β_T es la combinación del efecto en el tamaño de cristallito y el microestres (Mote et al., 2012).

El tamaño de cristal estimado para el ZnO prístino, usando la ecuación de Scherrer y el análisis Williamson-Hall, fue de 39.98 nm y 82.04 nm, respectivamente. Estos valores concuerdan con los obtenidos por otros investigadores bajo metodologías de síntesis similares (Dastafkan et al., 2018; Golchinvafo et al., 2022).

La Tabla 5 presenta el tamaño de cristal estimado de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas, usando la ecuación de Scherrer (ec. (14)) y el análisis Williamson-Hall (ec. (15)).

Tabla 5

Tamaño de cristal estimado de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas, usando la ecuación de Scherrer y el análisis Williamson-Hall

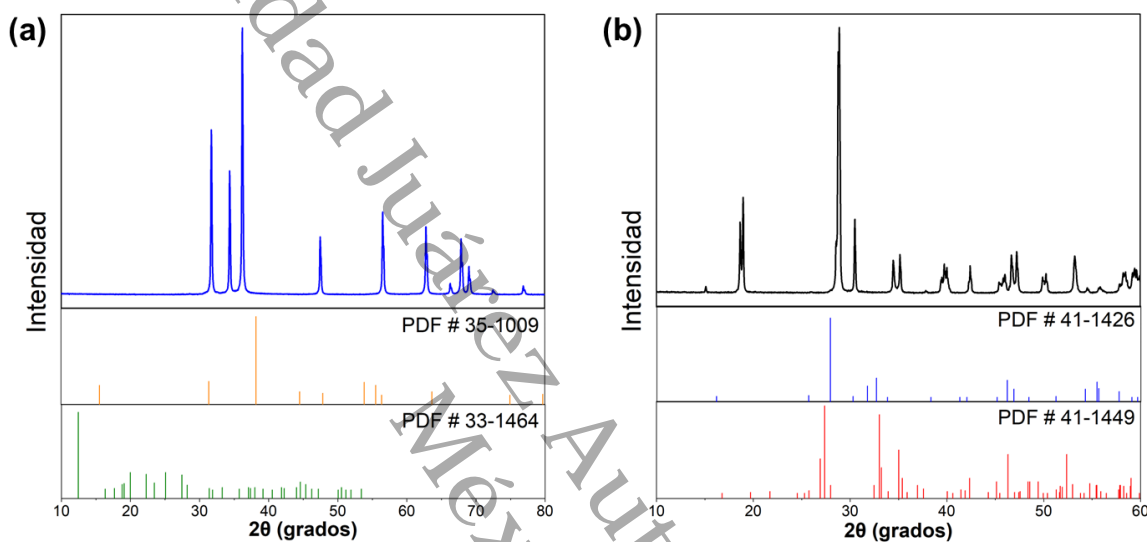
Muestra	Tamaño de cristal (nm)		Tensión
	Scherrer	Williamson-Hall	
ZnO	39.98	82.04	0.00135
BiVO ₄	30.97	99.75	0.00125
20BVZO	40.00	78.78	0.00128
50BVZO	40.03	62.46	0.00088
80BVZO	44.23	30.14	-0.00125

El tamaño de cristal del ZnO prístino estimado en 39.98 nm usando la ecuación de Scherrer coincide con los reportados por otros autores que usaron metodologías de síntesis análogas para la obtención de los materiales y estimaron los tamaños de cristal con la ecuación de Scherrer (Gautier di Confiengo et al., 2024; Rustembekkyzy et al., 2024). El tamaño de cristal estimado para el ZnO usando el análisis de Williamson-Hall es más grande en comparación al tamaño de cristal estimado usando la fórmula de Scherrer, lo cual coincide con los resultados reportados por Slimani *et al.* (2025) and Mote *et al.* (2012). Asimismo, el tamaño de cristal de los compuestos heterogéneos estimado con la ecuación de Scherrer aumenta a medida que aumenta el contenido de BiVO₄ en el compuesto heterogéneo mientras que disminuye usando el análisis Williamson-Hall, debido a que los picos en el patrón de difracción no muestran ensanchamiento, y la ecuación de Scherrer se basa en un solo pico de difracción, en contraste con el análisis de Williamson-Hall. Este comportamiento se atribuye al radio atómico del BiVO₄ con base en lo reportado en la literatura, puesto que al aumentar el contenido de BiVO₄ se limita el crecimiento libre del ZnO, obteniéndose tamaños de cristal más pequeños (Drisy et al., 2020; Faraldos & Goberna, 2021; Suryanarayana & Norton, 1998).

En la Figura 23, se presentan los difractogramas de rayos X de las muestras de ZnO y BiVO₄ sintetizadas por microondas en comparación con las cartas cristalográficas de los materiales precursores que intervienen.

Figura 23

Difractogramas de rayos X de las muestras de (a) ZnO y (b) BiVO₄ sintetizadas por microondas en comparación con las cartas cristalográficas de los materiales precursores



En la Figura 23a, se presenta el difractograma de rayos X de la muestra de ZnO prístino en comparación con la tarjeta PDF # 33-1464 que corresponde al precursor Zn(CH₃COO)₂·2H₂O (Hwang et al., 2019) y la tarjeta PDF # 35-1009 que corresponde al precursor NaOH (Bi et al., 2020). La Figura 23b presenta el difractograma de rayos X obtenido para el BiVO₄ en comparación con la tarjeta PDF # 41-1449 que corresponde al precursor Bi₂O₃ (Ali et al., 2024; Nyakairu et al., 2024) y la tarjeta PDF # 41-1426 que corresponde al precursor V₂O₅ (Parveen et al., 2024). Las difracciones principales de los materiales sintetizados por microondas no se indexan a los planos de las cartas cristalográficas correspondientes a los materiales precursores usados. Lo cual, indica que los materiales sintetizados por microondas no presentan otras fases cristalinas o impurezas provenientes de los materiales precursores que participan en la síntesis.

Los parámetros de red y volumen de celda para la muestra de ZnO fueron calculados mediante la ec. (16) y ec. (18). Por su parte, la ec. (17) y ec. (19) fueron usadas para calcular los parámetros de red y volumen de celda de la muestra de BiVO₄ (Jara et al., 2024).

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(h^2 + hk + \frac{k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (16)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\text{sen}^2\beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \text{sen}^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos\beta}{ac} \right) \quad (17)$$

$$V = 0.866a^2c \quad (18)$$

$$V = abc \text{sen}\gamma \quad (19)$$

Donde d es la distancia interplanar; los planos (h k l) son los índices de Miller; a, b y c son los parámetros de red de la estructura cristalina; β y γ son los ángulos interaxiales del sistema cristalino; y V es el volumen de celda.

La Tabla 6 presenta los parámetros de red, volumen de celda y porcentaje de error de las muestras de ZnO y BiVO₄ sintetizadas por microondas.

Tabla 6

Parámetros de red, volumen de celda y porcentaje de error de las muestras de ZnO y BiVO₄ sintetizadas por microondas

Muestra	Parámetro de red	Parámetro de red		
		Experimental	Teórico	% Error
ZnO	a (Å)	3.2514	3.2498	0.0477
	c (Å)	5.2056	5.2066	0.0198
	Volumen (Å ³)	47.6556	47.6220	0.0705
BiVO ₄	a (Å)	5.2134	5.1950	0.3541
	b (Å)	11.7079	11.7010	0.0590
	c (Å)	5.1011	5.0920	0.1797
	Volumen (Å ³)	311.3639	309.5000	0.6022

Se observa en la Tabla 6 que los parámetros de red estimados para las muestras de ZnO y BiVO₄ sintetizadas por microondas no presentan cambios significativos en comparación con lo reportado en la literatura (Dastafkan et al., 2018; Jara et al., 2024; A. Khan et al., 2024; Lenczewska et al., 2022; Manikantan et al., 2023).

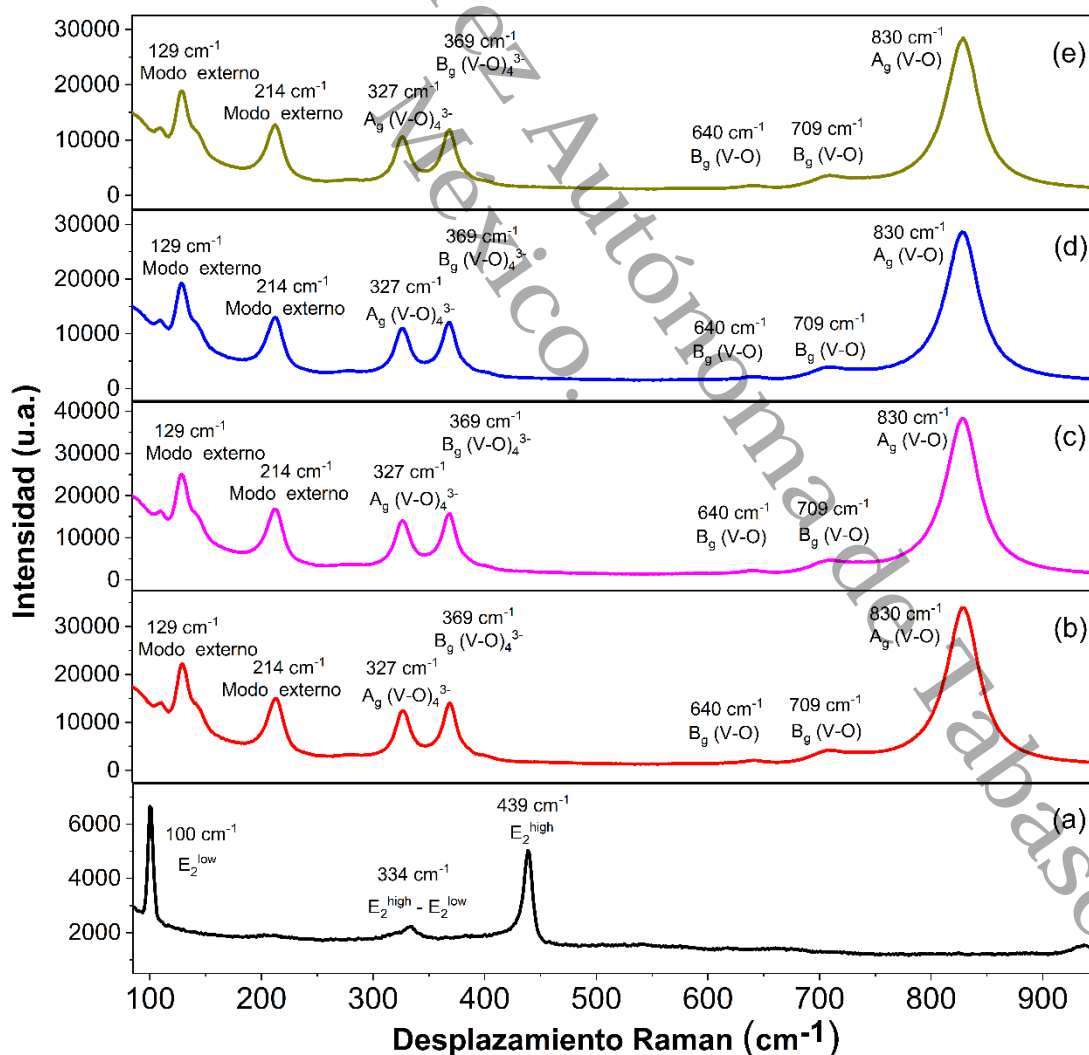
5.2 Análisis de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por espectroscopía Raman

Se realizó un análisis por espectroscopía Raman para complementar la información estructural obtenida por DRX y definir las fases cristalinas presentes en las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO sintetizadas por microondas

En la Figura 24, se presentan los datos de espectroscopía Raman a temperatura ambiente usando un láser a 633 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas.

Figura 24

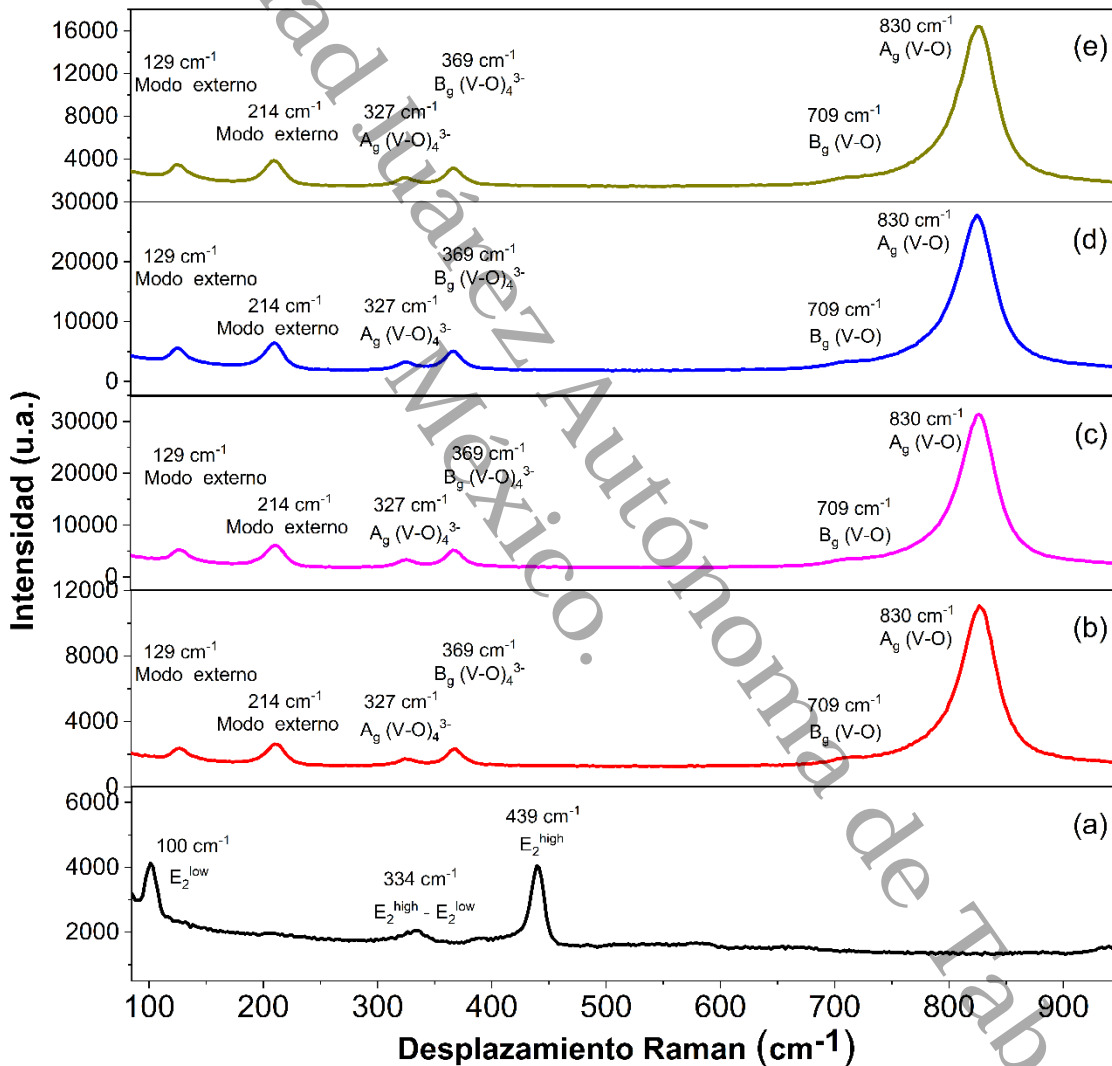
Espectros Raman a temperatura ambiente usando un láser a 633 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas



En la Figura 25, se presentan los datos de espectroscopía Raman a temperatura ambiente usando un láser a 488 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas.

Figura 25

Espectros Raman a temperatura ambiente usando un láser a 488 nm de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO obtenidas



El espectro Raman de la muestra de ZnO prístino sintetizado por microondas, presentado en la Figura 24a, tiene una señal fuerte en 437 cm⁻¹ – 439 cm⁻¹ y una señal menos intensa ubicada aproximadamente en 330 cm⁻¹ (Osipov et al., 2024). La señal más intensa alrededor de 439 cm⁻¹, del espectro Raman de la muestra de ZnO, está asociado con el modo de vibración

E_2^{high} que implica el movimiento de los átomos de oxígeno y confirma la estructura cristalina de las partículas de ZnO. La señal característica de la estructura wurtzita del ZnO que se localiza en 334 cm^{-1} está asociada con el modo vibracional $E_2^{\text{high}} - E_2^{\text{low}}$. Los modos E_2^{low} y E_2^{high} se relacionan con la subred Zn^{2+} y la subred O^{2-} , respectivamente (Miranda et al., 2021). El modo vibracional más intenso E_2^{low} está ubicado alrededor de 100 cm^{-1} . Con base en los típicos modos activos para la estructura hexagonal tipo wurtzita presentes en el espectro Raman para la muestra de ZnO prístino sintetizado por microondas que concuerdan bien con los reportados previamente en la literatura y aunado a los datos de DRX, se confirma que la fase obtenida para la muestra de ZnO es la wurtzita hexagonal.

El espectro Raman de la muestra de BiVO_4 sintetizada por microondas, observado en la Figura 24a, presenta los modos vibracionales característicos de la fase monoclinica, localizados alrededor de 129 cm^{-1} , 214 cm^{-1} , 327 cm^{-1} , 369 cm^{-1} , 640 cm^{-1} , 709 cm^{-1} y 830 cm^{-1} . Estos resultados concuerdan con la bibliografía, donde se han reportado señales alrededor de 129 cm^{-1} , 212 cm^{-1} , 327 cm^{-1} , 369 cm^{-1} , 643 cm^{-1} , 713 cm^{-1} y 829 cm^{-1} en muestras de BiVO_4 , en su fase monoclinica, sintetizadas mediante una ruta hidrotermal asistida por microondas (Kshetri et al., 2021). La señal más intensa alrededor de 830 cm^{-1} y una señal ligeramente pronunciada en 713 cm^{-1} son atribuidas al modo vibracional simétrico (A_g) y modo vibracional asimétrico (B_g), respectivamente, de los enlaces V-O. De forma similar las señales identificadas alrededor de 327 cm^{-1} y 369 cm^{-1} están relacionados con los modos vibracionales simétrico (A_g) y asimétrico (B_g), respectivamente, del ion VO_4^{3-} . La vibración de estiramiento asimétrico del enlace V-O es responsable de la señal alrededor de 640 cm^{-1} . Las señales encontradas alrededor de 214 cm^{-1} y 129 cm^{-1} se atribuyen a los modos externos (rotación/traslación), que están asociados con el ion vanadato (Helal et al., 2024; Kshetri et al., 2021; Z. Wang et al., 2024a). El análisis de Raman para la muestra de BiVO_4 sintetizada por microondas concuerda con el análisis por DRX ya que se confirma la presencia de BiVO_4 en su estructura monoclinica.

En los espectros Raman de las muestras 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas por microondas, presentados en la Figura 24 c, d, e, las longitudes de enlace del vanadio y del oxígeno del BiVO_4 se identificaron en las señales alrededor de 830 cm^{-1} y 709 cm^{-1} . Las señales alrededor de 214 cm^{-1} son atribuidos a los modos externos (rotación/traslación) (Helal et al., 2024). Sin embargo, las muestras 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO no presentan las señales características del ZnO, esto puede atribuirse a que la adición del ZnO pudo afectar la polaridad del enlace V-O del BiVO_4 , influyendo posteriormente en su actividad Raman.

Por otra parte, cuando la excitación del láser se cambió a 488 nm, espectros Raman presentados en la Figura 25 a, b, c, d, e, se observaron alteraciones distintivas en la intensidad de las señales características de BiVO₄; estas no fueron tan pronunciadas. Lo anterior, puede indicar que la influencia principal del BiVO₄ se localiza en la superficie de los compuestos heterogéneos formados, en lugar de afectar la configuración electrónica de los materiales (W. Zhang *et al.*, 2025).

Los espectros Raman de los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO, obtenidos con un láser a 633 nm y con un láser a 488 nm, indican que la cantidad de ZnO no modifica la estructura monoclinica del BiVO₄, incluso en las muestras de los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO con mayor concentración de ZnO (Fu *et al.*, 2014). Li *et al.*, (2021) reportaron resultados similares.

5.3 Análisis de banda prohibida de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por espectroscopía UV-Vis

La banda prohibida de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO fue calculada con la ecuación de Kubelka-Munk (ec. (20)) modificada mediante la multiplicación de la función F(R) por $h\nu$. Esto último, usando el coeficiente correspondiente (n) asociado con una transición electrónica (ec. (21)). Además, la ec. (22) también fue usada para calcular la banda prohibida con fines comparativos.

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (20)$$

$$(F(R) * h\nu)^n \quad (21)$$

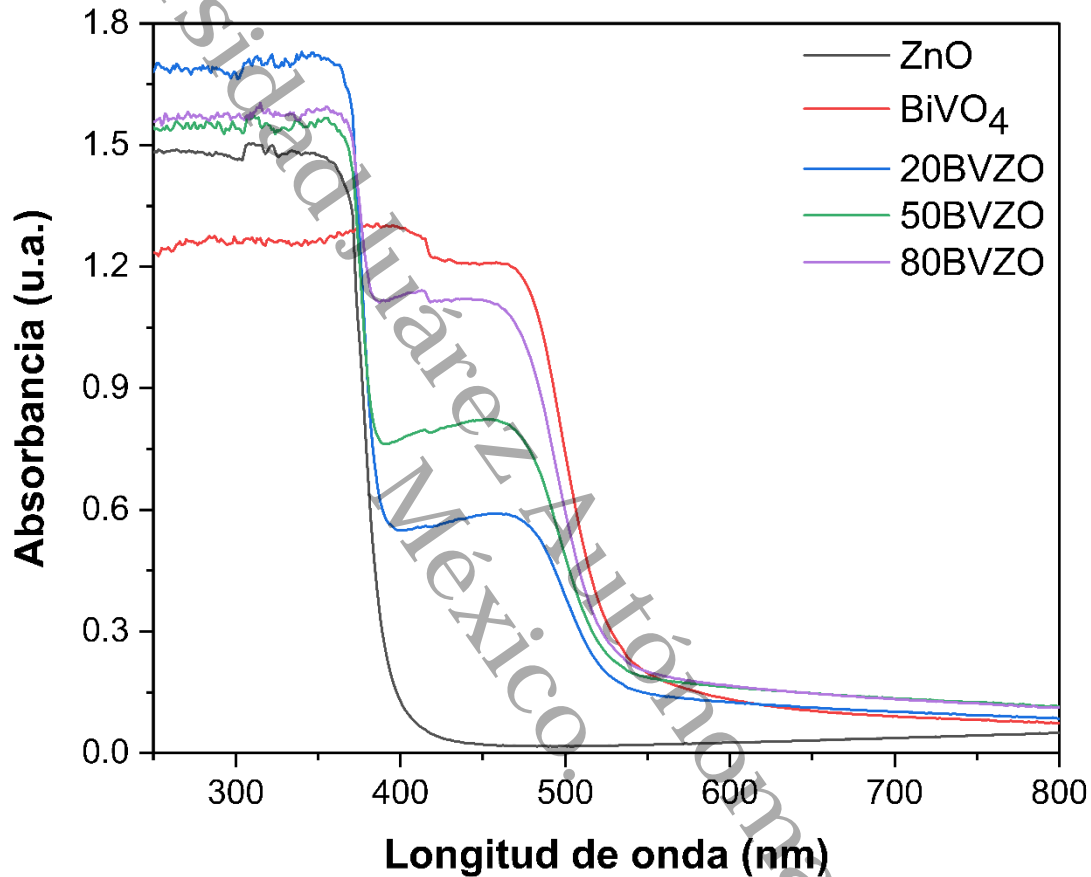
$$E_g = \frac{(1239.84)(m)}{-b} \quad (22)$$

Donde R es la reflectancia, F(R) es proporcional al coeficiente de extinción o absorptividad molar (α), E_g denota la energía de banda prohibida del fotocatalizador en eV, m y b son obtenidos mediante el ajuste lineal de la sección plana del espectro UV-Vis (López & Gómez, 2012).

En la Figura 26, se presentan los espectros de absorción óptica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO.

Figura 26

Espectros de absorción óptica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO

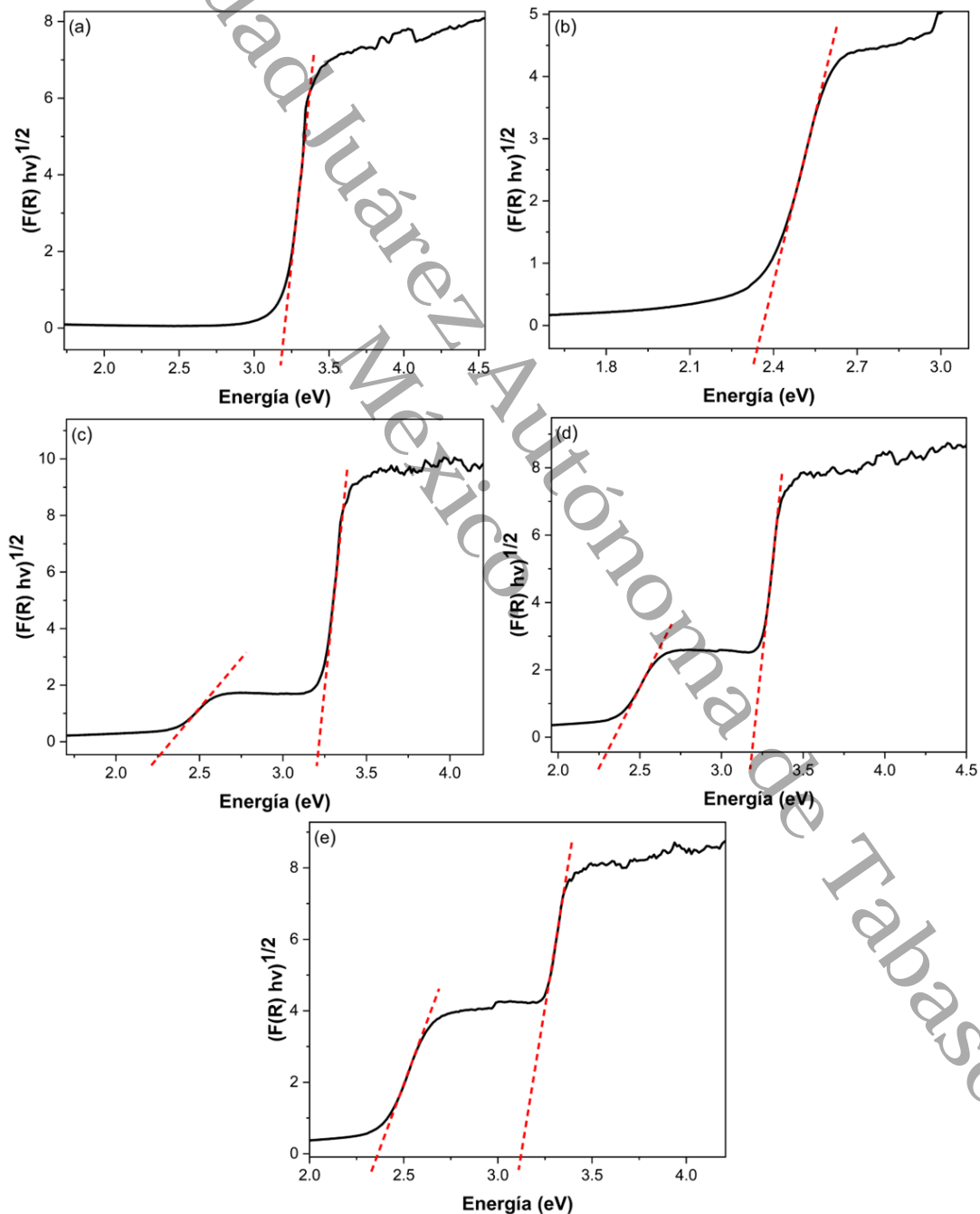


La muestra de ZnO prístino sintetizado por microondas reveló un borde de absorción agudo en la región UV (200 nm a 400 nm) mientras que el borde de absorción del material BiVO₄ prístino sintetizado por microondas se encuentra dentro de la región visible. En la creación de los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO, es posible observar dos valores de borde de absorción que están asociados con la interacción electrónica entre ZnO y BiVO₄; el primero se atribuye a la contribución de la unión generada entre los dos materiales, con un ligero desplazamiento del borde de absorción, mientras que el segundo se atribuye principalmente a la contribución de BiVO₄ (B. *et al.*, 2018; Wannakan *et al.*, 2023).

En la Figura 27, se presenta la estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de $(F(R)h\nu)^{1/2}$ contra energía.

Figura 27

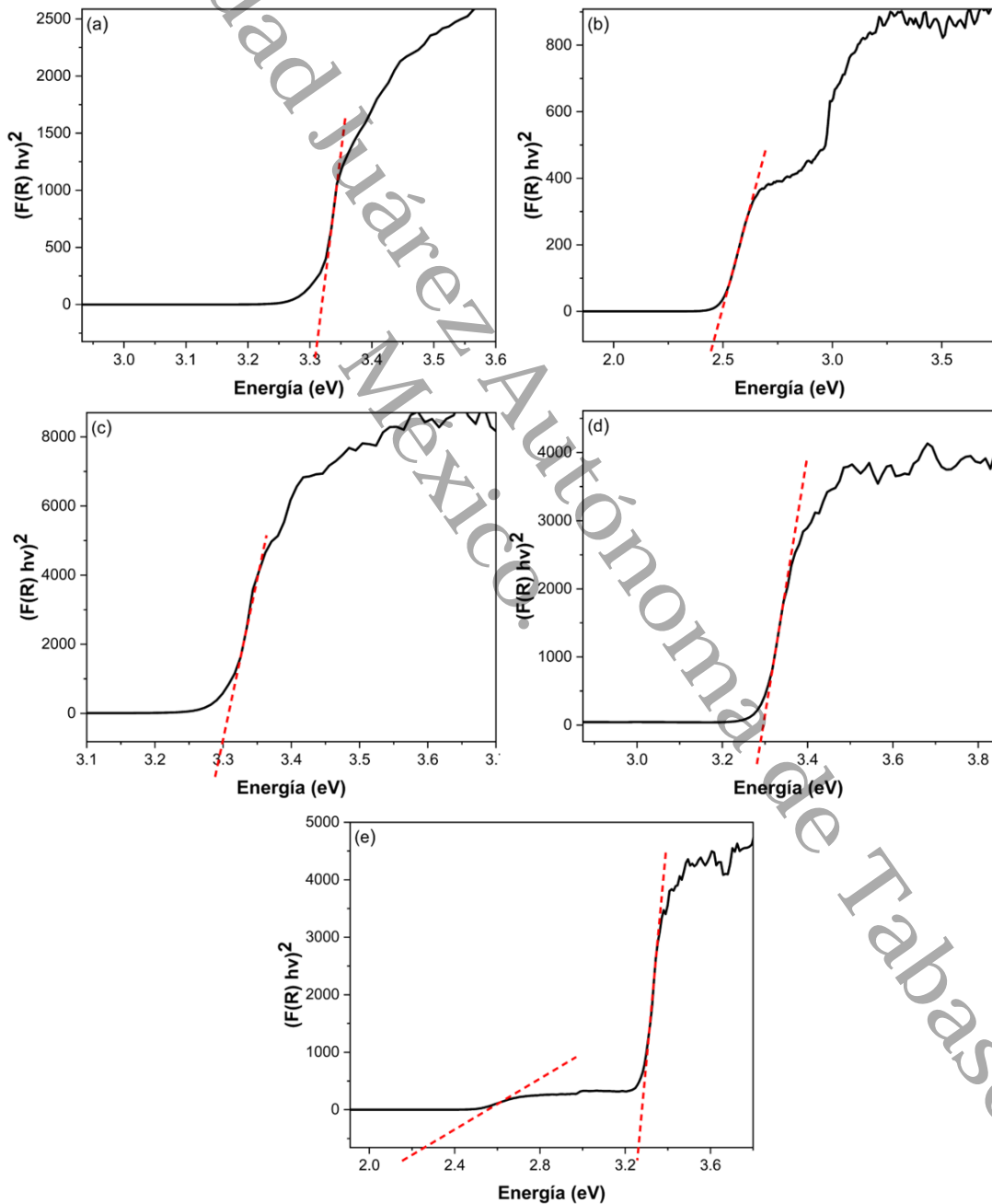
Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de $(F(R)h\nu)^{1/2}$ contra energía



En la Figura 28, se presenta la estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de $(F(R)h\nu)^2$ contra energía.

Figura 28

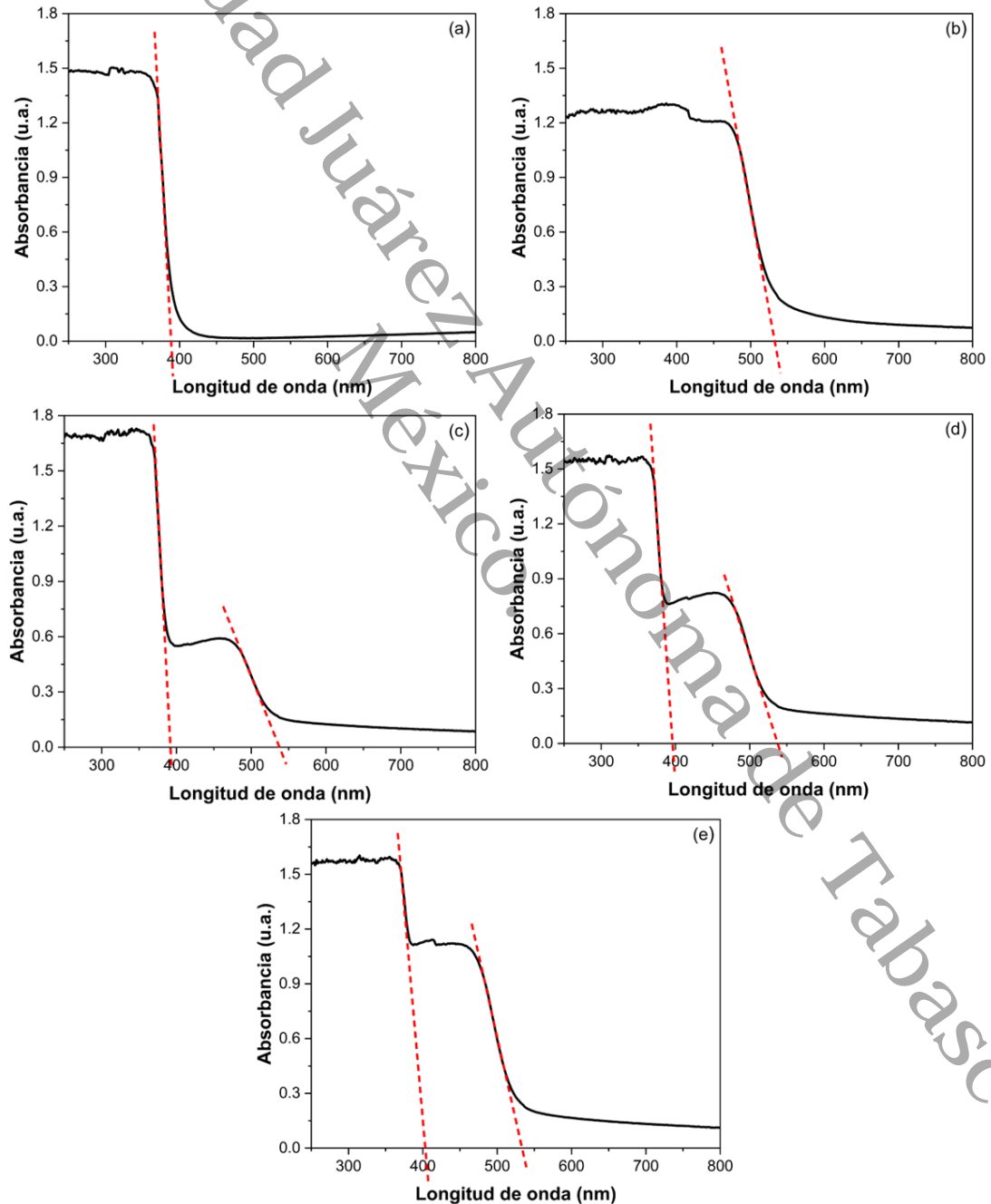
Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de $(F(R)h\nu)^2$ contra energía



En la Figura 29, se presenta la estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de absorbancia.

Figura 29

Estimación de banda prohibida de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO usando la representación gráfica de absorbancia



Los potenciales de borde de banda de la BV y la BC de los materiales semiconductores se pueden calcular teóricamente usando la electronegatividad de Mulliken y la banda prohibida del material, como se describe en las ecuaciones siguientes:

$$E_{BV} = \chi - E_e + \frac{1}{2} E_g \quad (23)$$

$$E_{BC} = \chi - E_e - \frac{1}{2} E_g = E_{BV} - E_g \quad (24)$$

$$E_{fp} = E_{fp}^0 - 0.05915 \text{ pH} \quad (25)$$

Donde E_{BV} y E_{BC} son los potenciales de la BV y la BC, respectivamente, χ es la media geométrica de la electronegatividad de Mulliken de los átomos constituyentes del semiconductor, E_e es la energía del electrón libre en la escala del electrodo de hidrógeno (~ 4.5 eV vs ENH), E_{fp} es el potencial de Fermi en función del pH y E_{fp}^0 es el potencial de referencia del nivel de Fermi en condiciones estándar (pH = 0). La electronegatividad de Mulliken χ se define como la media aritmética de la primera energía de ionización y la primera afinidad electrónica de un átomo (Padwal *et al.*, 2025).

Para el ZnO, la electronegatividad de Mulliken χ se calculó en 5.95 eV, basado en los valores de los átomos de zinc (Zn) y oxígeno (O) en el ZnO, como se presenta a continuación:

$$\chi_{Zn} = \frac{I_1 + E_1}{2} = \frac{(906.4 + 0) \frac{KJ}{mol}}{2} = \frac{(453.2 \frac{KJ}{mol}) (\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-22} \text{ KJ}})}{6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 4.70 \text{ eV} \quad (26)$$

$$\chi_O = \frac{I_1 + E_1}{2} = \frac{(1,314 + 141) \frac{KJ}{mol}}{2} = \frac{(727.5 \frac{KJ}{mol}) (\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-22} \text{ KJ}})}{6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 7.54 \text{ eV} \quad (27)$$

Para calcular la electronegatividad del compuesto, se emplea la ecuación (28), donde χ_A y χ_B representan la electronegatividad de los átomos A y B, mientras que a y b son el número de átomos A y B en el compuesto:

$$\chi_{ZnO} = [(\chi_A)^a (\chi_B)^b]^{\frac{1}{(a+b)}} = [(4.70 \text{ eV})^1 (7.54 \text{ eV})^1]^{\frac{1}{(1+1)}} = 5.95 \text{ eV} \quad (28)$$

Para el BiVO_4 , la electronegatividad de Mulliken χ se calculó en 6.03 eV, de forma análoga al procedimiento para calcular la electronegatividad de Mulliken χ del ZnO.

La Tabla 7 presenta la banda prohibida estimada usando la ecuación de Kubelka-Munk (ec. (20)) modificada y el método de absorbancia (ec. (22)); y los potenciales de banda calculados usando las ecuaciones (23), (24) y (25) de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas.

Tabla 7

Banda prohibida y potenciales de banda de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas

Muestra	Banda prohibida (eV)		E _{BV} (eV)	E _{BC} (eV)	
	Kubelka-Munk	Método Abs.			
ZnO	3.22	3.16	2.59	-0.63	
BiVO ₄	2.34	2.31	2.65	0.31	
20BVZO	ZnO	3.19	3.15	2.57	-0.62
20BVZO	BiVO ₄	2.31	2.29	2.63	0.32
50BVZO	ZnO	3.18	3.12	2.57	-0.61
50BVZO	BiVO ₄	2.32	2.30	2.64	0.32
80BVZO	ZnO	3.12	3.02	2.54	-0.58
80BVZO	BiVO ₄	2.35	2.32	2.65	0.30

El análisis de la banda prohibida ha mostrado un ligero cambio en la banda prohibida de la muestra 80BVZO después de la introducción de BiVO₄, de 3.22 a 3.12 eV estimado con la ecuación de Kubelka-Munk modificada y de 3.16 eV a 3.02 eV usando el método de absorbancia. Se deduce que la cantidad creciente de BiVO₄ disminuye la banda prohibida en el compuesto heterogéneo de BiVO₄/ZnO formado. Esto, concuerda con los reportado por otros autores donde se logra reducir la banda prohibida de 3.23 eV a 2.5 eV y de 3.20 eV a 2.65 eV en la fabricación de compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO con diversas proporciones de BiVO₄ (Alhaddad *et al.*, 2022; Liaqat *et al.*, 2024).

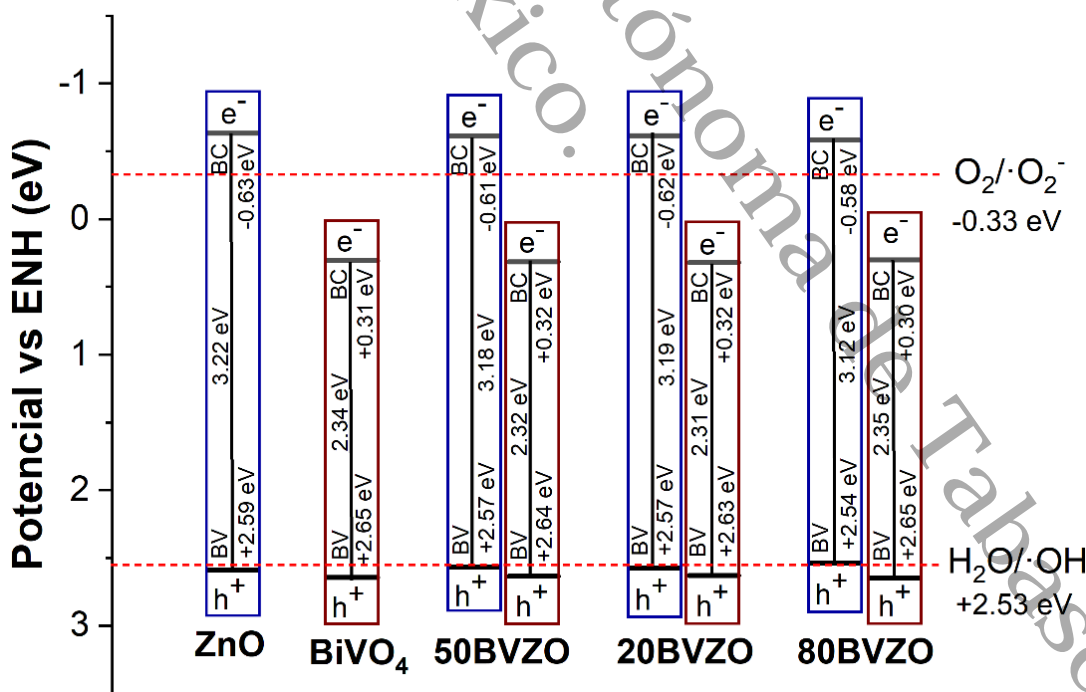
La BC de las muestras de ZnO es más negativa que la energía potencial estándar de O₂/·O₂⁻, que es de -0.33 eV en relación con ENH (Electrodo Normal de Hidrógeno), es decir, tiene la energía suficiente para convertir oxígeno en radicales superóxidos O₂/·O₂⁻ y por lo tanto permite que los electrones fotogenerados creen especies reactivas de ·O₂⁻. La BV de las muestras de

ZnO tiene una energía más positiva que la energía potencial estándar de $\text{H}_2\text{O}/\cdot\text{OH}$ (2.53 eV vs ENH), dicha energía permite convertir moléculas de H_2O en radicales $\cdot\text{OH}$ a través de los huecos fotogenerados. Por su parte, la BV del BiVO_4 es más positiva que la energía potencial estándar de $\text{H}_2\text{O}/\cdot\text{OH}$, sin embargo, la BC del BiVO_4 no es más negativa que la energía potencial estándar de $\text{O}_2/\cdot\text{O}_2^-$. Por lo tanto, los huecos y electrones fotogenerados no son todos capaces de generar radicales reactivos ($\cdot\text{O}_2^-$ y $\cdot\text{OH}$) a través de reacciones redox (Batra *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). Lo anterior, se relaciona con los porcentajes obtenidos de degradación fotocatalítica de AM, TC y CIP, que bajo la acción continua de radicales reactivos usando BiVO_4 son menores en comparación con las pruebas realizadas con ZnO; y se observó un aumento en la eficacia fotocatalítica de las muestras 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO a medida que disminuye el contenido de BiVO_4 en los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO .

En la Figura 30, se presenta el diagrama de energía de bandas donde se observa la diferencia energética de las muestras de ZnO, BiVO_4 , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas.

Figura 30

Diagrama de los niveles de energía de las muestras de ZnO, BiVO_4 , 50BVZO, 20BVZO y 80BVZO obtenidas

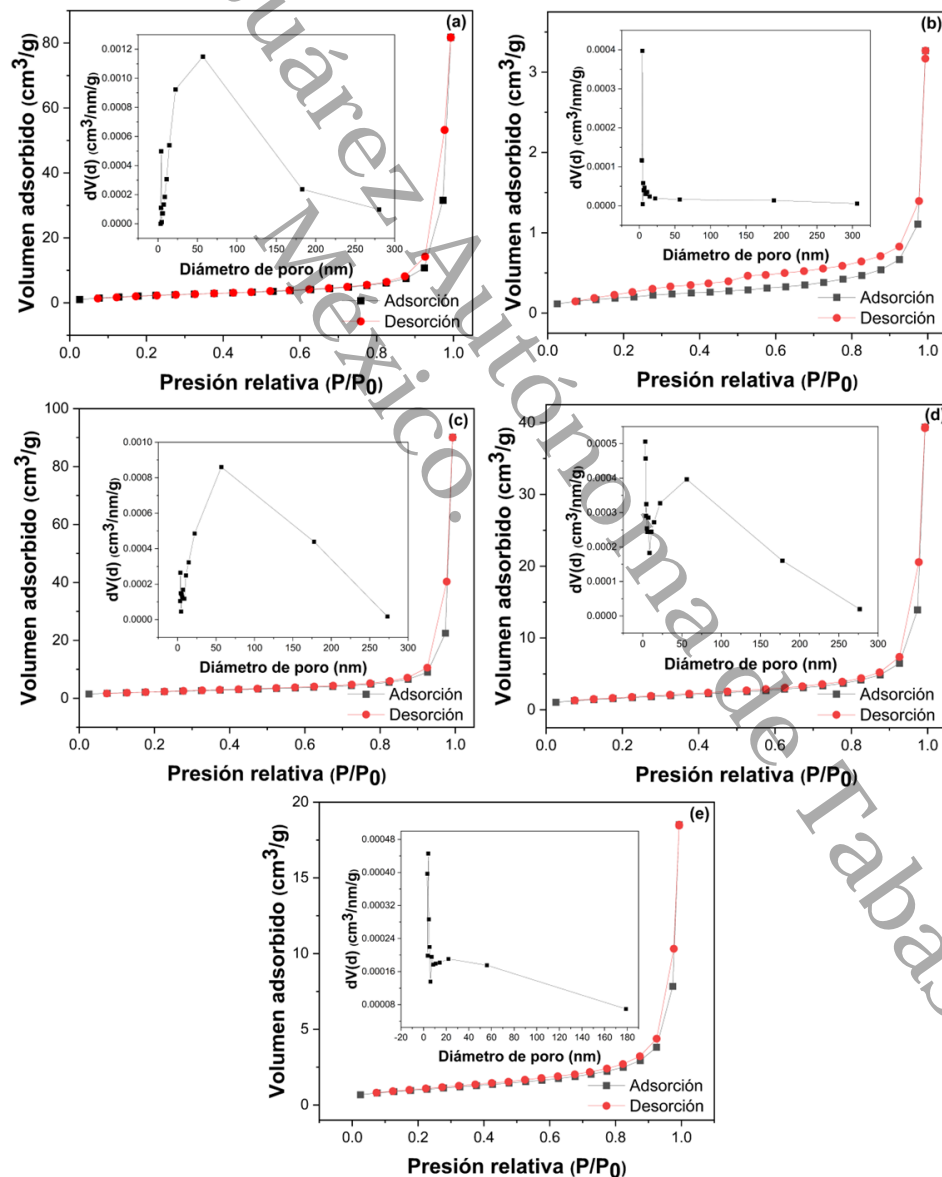


5.4 Análisis textural de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO por fisisorción de N₂

En la Figura 31, se presentan las isotermas de adsorción-desorción de N₂ a temperatura constante usando un baño a temperatura del nitrógeno líquido (77 K) y la distribución de los tamaños de poro de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO.

Figura 31

Isotermas de adsorción-desorción de N₂ a temperatura constante usando un baño a temperatura del nitrógeno líquido (77 K) de las muestras de (a) ZnO, (b) BiVO₄, (c) 20BVZO, (d) 50BVZO y (e) 80BVZO. (Insertos) Distribución de los tamaños de poro



Las muestras 50BVZO y 80BVZO exhibieron isotermas de adsorción de N₂ tipo IV con un ciclo de histéresis tipo H3 con base en los estándares de la IUPAQ (Figura 31 d, e), que son resultados representativos de los materiales mesoporosos con una porosidad media (La *et al.*, 2025). Esto, concuerda con las curvas de distribución del tamaño de poro promedio, donde se determinó que los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO con 50 % y 80 % de contenido de BiVO₄, muestras 50BVZO y 80BVZO, eran materiales mesoporosos (Manikantan *et al.*, 2023). Las muestras de ZnO y 20BVZO exhibieron isotermas de adsorción de N₂ tipo III con un ciclo de histéresis tipo H3 (Figura a, c), lo cual indica una superficie mesoporosa y macroporosa del material, que concuerda con los valores estimados para los diámetros de poro promedio (Allah *et al.*, 2025; Sumantrao *et al.*, 2025). Por otra parte, la muestra de BiVO₄ prístino exhibe una isoterma de adsorción de N₂ tipo IV con un ciclo de histéresis tipo H4 (Figura 31b), lo que concuerda con los valores estimados para el volumen de poro y el diámetro promedio de poro (Alomayri, 2025).

El método multipunto Brunauer, Emmett y Teller (BET) midiendo la adsorción de N₂ en la superficie de los materiales en función de la presión relativa (P/P₀) y el método Barret, Joyner, Halenda (BJH) fueron usados para conocer el área superficial específica y realizar el análisis de la estructura de poro, respectivamente, de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO.

La Tabla 8 presenta las propiedades texturales de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas. Estos resultados se correlacionan con los hallazgos sobre fisisorción de N₂ reportados previamente por otros investigadores (Alshahrani *et al.*, 2025; Hekmat *et al.*, 2023; Lims *et al.*, 2025; Nain *et al.*, 2025; Shiny *et al.*, 2024).

Tabla 8

Propiedades texturales de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas

Muestra	Área superficial específica (m²/g)	Volumen de poro (cm³/g)	Diámetro promedio de poro (nm)
ZnO	8.53	0.127	56.89
BiVO ₄	0.72	0.005	4.07
20BVZO	7.99	0.139	56.93
50BVZO	5.91	0.060	3.22
80BVZO	3.59	0.028	4.05

La muestra de ZnO prístino presenta un valor mayor de área superficial específica en comparación con las muestras de BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO, lo que sugiere que proporciona más sitios activos. Por otra parte, tanto los valores de volumen de poro como el diámetro promedio de poro, así como los valores de área superficial específica, disminuyeron con el incremento de la cantidad de BiVO₄ en los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO: muestras 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO. Esta disminución del volumen de poro sugiere una mejora en las propiedades de transporte de carga de los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO obtenidos (Cinnathambi Subramani *et al.*, 2025). La disminución del área superficial específica con el aumento del contenido de BiVO₄ en compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO ha sido reportada previamente en la literatura. Lo anterior, puede atribuirse a que la incorporación de BiVO₄ en los compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO fabricados puede provocar una disminución del área superficial específica de estos últimos debido a la posible aglomeración de partículas o cambios en la morfología de las partículas. Esto último, sugiere que las partículas de BiVO₄ pueden estar llenando los poros de las partículas de ZnO, reduciendo de esta forma el área superficial específica (Alshahrani *et al.*, 2025).

La mayor adsorción de N₂ observada para la muestra 20BVZO en comparación con las muestras 50BVZO y 80BVZO, indica que la cantidad decreciente de BiVO₄ aumenta tanto el área superficial específica como la porosidad, lo que beneficia el rendimiento fotocatalítico (Sarker *et al.*, 2025a). Es decir, a pesar del área superficial específica menor de la muestra 20BVZO en comparación con la muestra de ZnO, el tamaño de poro ligeramente incrementado puede ser ventajoso para el transporte de masa y la accesibilidad de las moléculas contaminantes (Padwal *et al.*, 2025). La muestra 20BVZO presenta un valor de área superficial específica mayor en comparación con las muestras 50BVZO y 80BVZO. Lo anterior, indica que la muestra 20BVZO puede acomodar una cantidad significativa de moléculas contaminantes durante la actividad fotocatalítica. Eso último, se puede atribuir a la interacción sinérgica del ZnO con el BiVO₄.

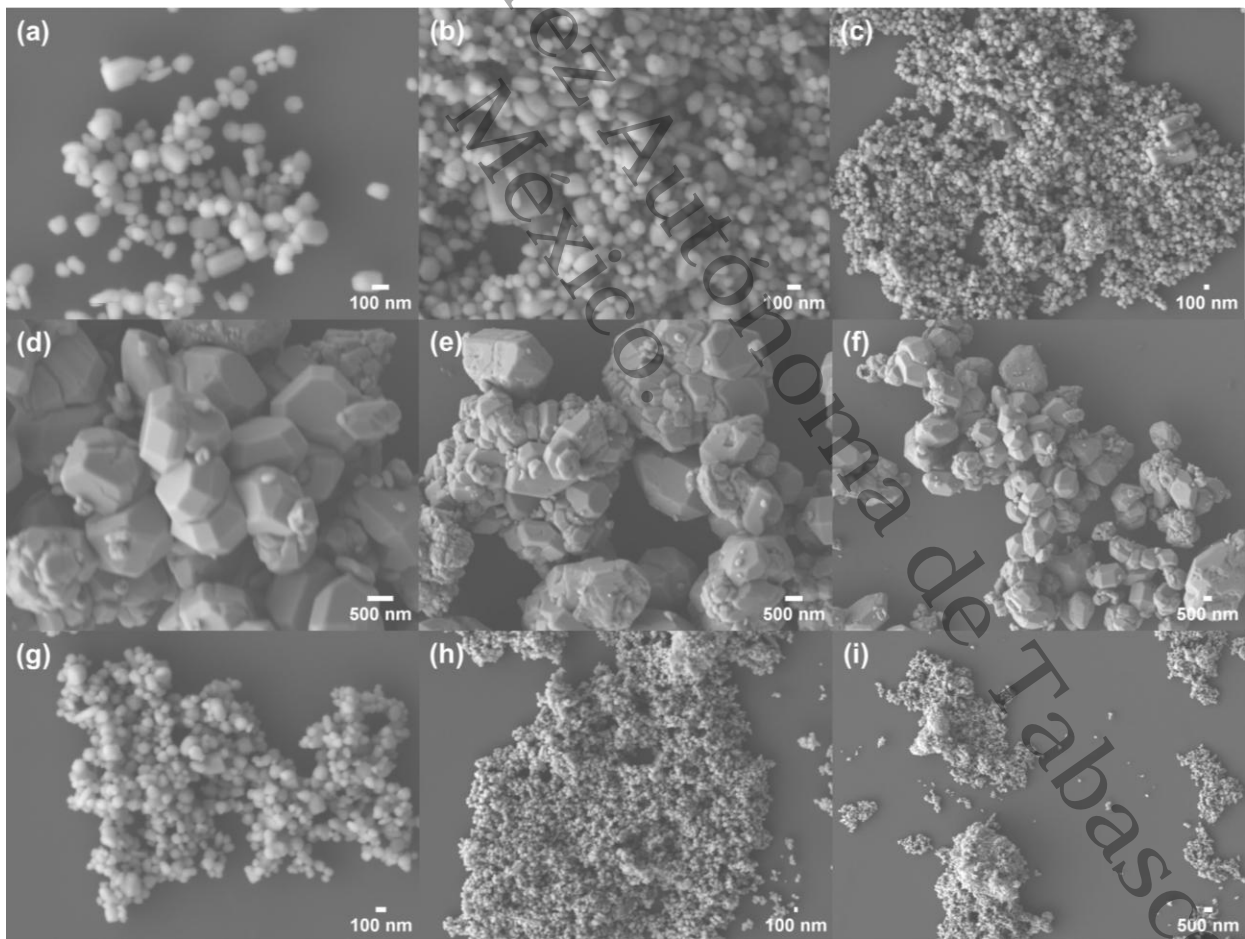
5.5 Estudio morfológico de las muestras de ZnO, BiVO₄ y 20BVZO por MEB y MET

Se realizó el análisis morfológico de las muestras de ZnO, BiVO₄ y el compuesto heterogéneo de BiVO₄/ZnO con mejor desempeño fotocatalítico: 20BVZO, en comparación con las muestras 50BVZO y 80BVZO. Esto, para determinar el tamaño de grano y la distribución de partículas en los compuestos obtenidos.

En la Figura 32, se muestran las micrografías de MEB de ZnO magnificación (a) x50k, (b) x40k, (c) x15k; BiVO₄ magnificación (d) x15k, (e) x10k, (f) x5k; y 20BVZO magnificación (g) x30k, (h) x10k, (i) x5k.

Figura 32

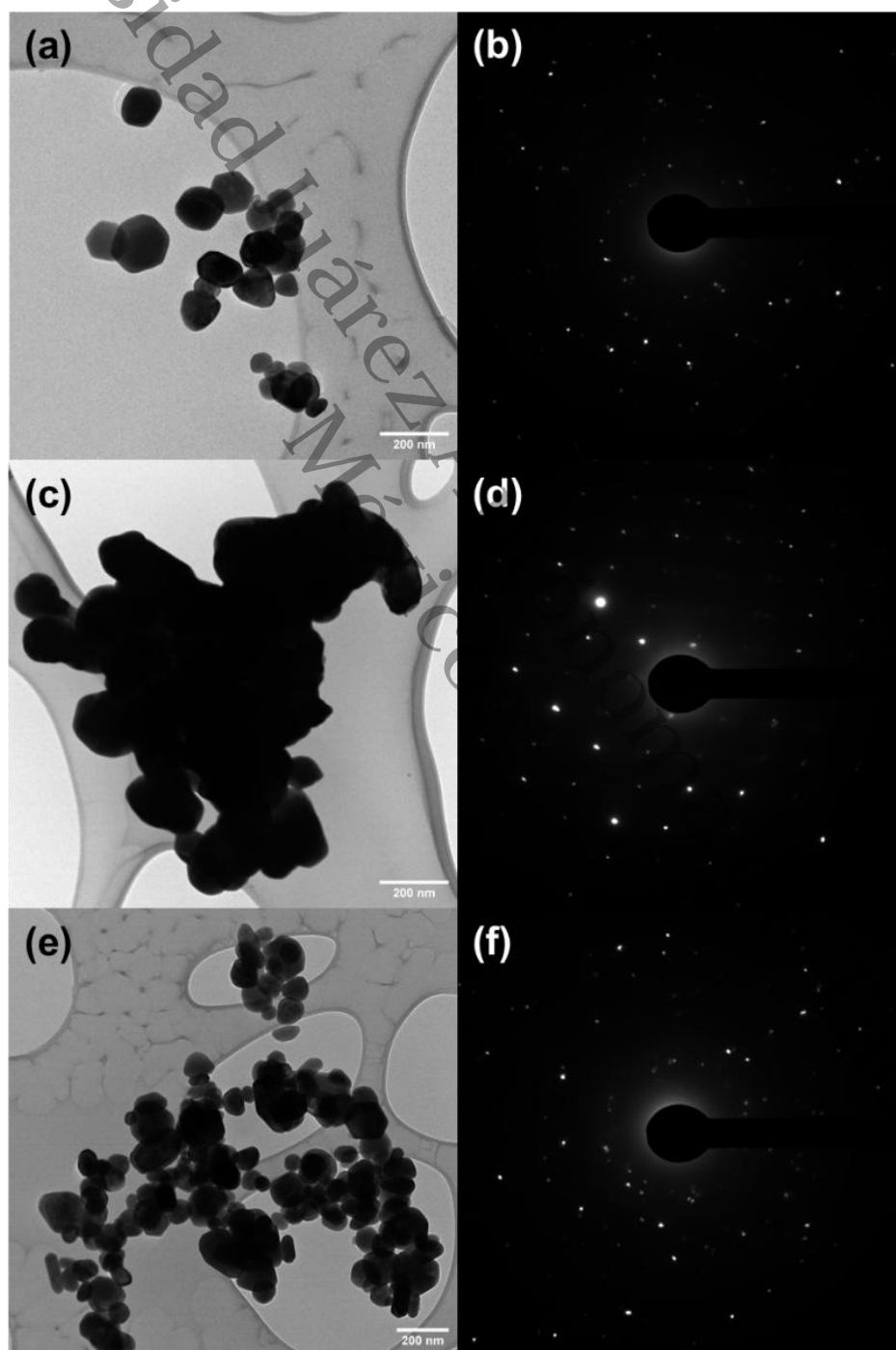
Micrografías de MEB de ZnO magnificación (a) x50k, (b) x40k, (c) x15k; BiVO₄ magnificación (d) x15k, (e) x10k, (f) x5k; y 20BVZO magnificación (g) x30k, (h) x10k, (i) x5k



En la Figura 33, se presentan las imágenes de MET de (a) ZnO, (c) BiVO₄, (e) 20BVZO y los patrones de difracción de electrones de (b) ZnO, (d) BiVO₄, (f) 20BVZO.

Figura 33

Imágenes de MET de (a) ZnO, (c) BiVO₄, (e) 20BVZO y patrones de difracción de electrones de (b) ZnO, (d) BiVO₄, (f) 20BVZO



Las micrografías de MEB de la muestra de ZnO sintetizada por microondas, presentadas en la Figura 32 a, b, c, mostraron estructuras semiesféricas aglomeradas, similares a las reportadas por Sarker *et al.*, (2025), Allah *et al.*, (2025), Sumantrao *et al.*, (2025) y Arellano-Cortaza *et al.*, (2021). Por su parte, las micrografías de MEB de la muestra de BiVO₄ sintetizada por microondas mostraron morfologías poligonales irregulares, como se observa en la Figura 32 d, e, f. Dashtpeyma & Shabani, (2023), Rohilla *et al.*, (2023) y Wannakan *et al.*, (2023) reportaron morfologías similares para el BiVO₄. Por otro lado, la morfología del compuesto heterogéneo 20BVZO mostró una distribución más abundante de estructuras asociadas al ZnO en comparación con las correspondientes al BiVO₄. Asimismo, se evidenció la coexistencia de ZnO y BiVO₄ sin alterar la morfología de los materiales individuales (Figura 32 g, h, i), lo cual coincide con lo reportado por Wannakan *et al.*, (2023) y J. Zhang & Xie, (2021). El tamaño promedio de partícula de las muestras de ZnO, BiVO₄ y 20BVZO estimado fue de 110 nm, 1390 nm y 118 nm, respectivamente.

Las morfologías de las partículas de las muestras de ZnO, BiVO₄ y 20BVZO, observadas en las imágenes de MET (Figura 33), son semejantes a las micrografías obtenidas mediante MEB, similar a lo reportado por Lims *et al.*, (2025) y Alhaddad *et al.*, (2022). Se puede observar en la Figura 33e, una mayor proporción relativa de partículas correspondientes a ZnO en comparación con las de BiVO₄. El tamaño de grano estimado de las micrografías de MET fue de 107 nm, 160 nm y 111 nm correspondientes a las muestras de ZnO, BiVO₄ y 20BVZO, respectivamente. El patrón de difracción de electrones obtenido de la muestra de ZnO, que se presenta en la Figura 33b, reveló el plano (100) correspondiente a la fase wurtzita hexagonal del ZnO. El patrón de difracción de electrones obtenido de la muestra de BiVO₄ confirmó la estructura monoclinica del BiVO₄ (Figura 33d). Los planos cristalinos (110) y (121) del ZnO y BiVO₄, respectivamente, se identificaron en el patrón de difracción de electrones obtenido del compuesto heterogéneo 20BVZO, como se muestra en la Figura 33f. Los resultados del análisis MET concuerdan con el análisis de DRX, lo que confirma la formación del compuesto heterogéneo BiVO₄/ZnO.

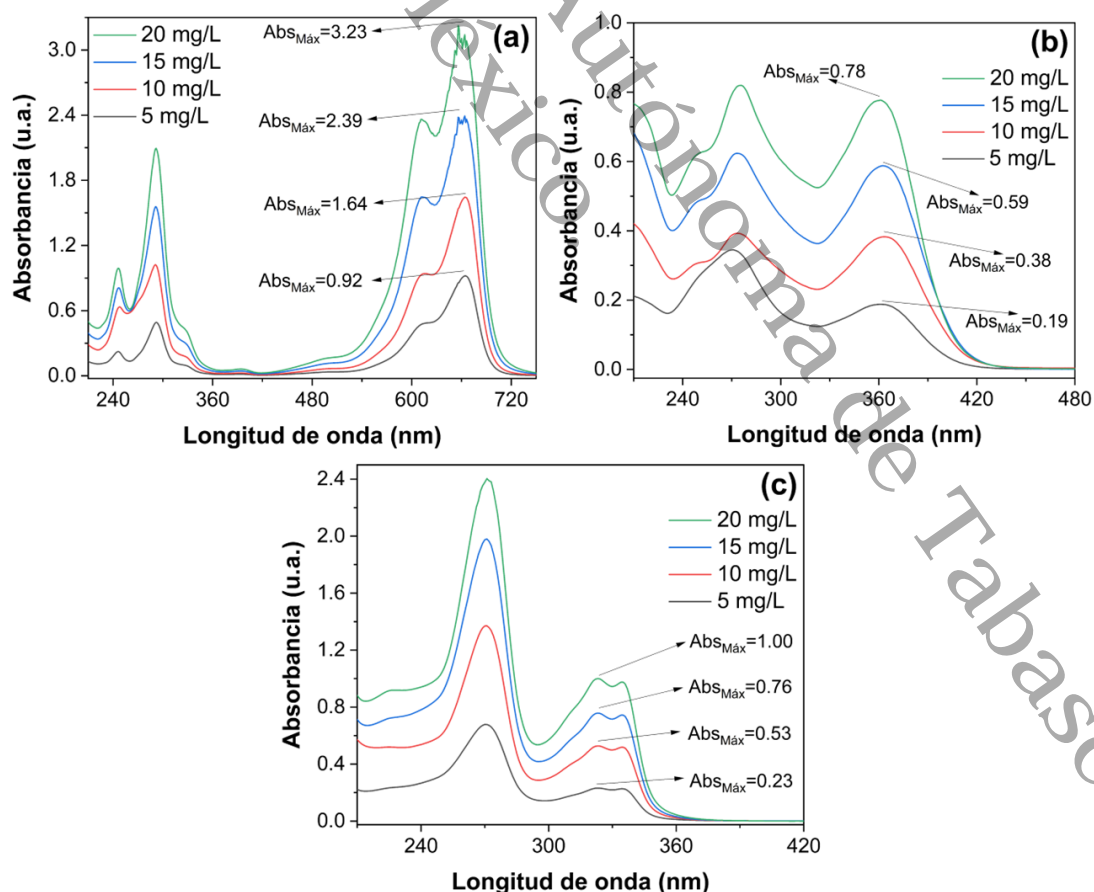
5.6 Actividad fotocatalítica de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO

5.6.1 Pruebas fotocatalíticas

En la Figura 34, se presentan los espectros de absorción de soluciones de (a) AM, (b) TC y (c) CIP con diferentes concentraciones: 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L y 20 mg/L. Con base en estos resultados, soluciones de AM, TC y CIP con una concentración de 10 mg/L, 15 mg/L y 15 mg/L, respectivamente, fueron preparadas para realizar el monitoreo de las bandas características de las moléculas. Esto, mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 664 nm, 357 nm y 323 nm para el AM, TC y CIP, respectivamente. Debe notarse que las lecturas de absorbancia por espectroscopía UV-Vis de la molécula de CIP pueden ser afectadas debido a que los compuestos resultantes de la degradación fotocatalítica tienen una estructura similar al compuesto original (Sanjuan-Galindo *et al.*, 2023).

Figura 34

Espectros de absorción de solución de (a) AM, (b) TC y (c) CIP con diferentes concentraciones: 5 mg/L, 10 mg/L, 15 mg/L y 20 mg/L



El uso de una lámpara UVA Tecnolite de 20 W fue determinado para la realización de las pruebas fotocatalíticas debido a que el ZnO es inactivo bajo luz visible (H. Khan *et al.*, 2020). Belahlou *et al.*, (2025) lograron ~ 93 % de degradación fotocatalítica del herbicida linurón bajo radiación UV usando fotocatalizadores de ZnO sintetizados mediante ruta hidrotermal. Por otra parte, Drisya *et al.*, (2020) reportaron baja actividad fotocatalítica frente al colorante sintético AB113 usando BiVO₄ preparando por sol-gel como fotocatalizador, bajo un simulador solar con lámpara de arco de xenón sin ozono de 1.6 kW. Además, Wannakan *et al.*, (2023) reportaron la degradación fotocatalítica mejorada de contaminantes orgánicos bajo radiación UV después de 4 h usando materiales de BiVO₄ y ZnO/BiVO₄.

Debido a la estructura molecular de los antibióticos TC y CIP, sus formas iónicas dependen del pH (Costa Junior *et al.*, 2022). De acuerdo con la bibliografía, se evita trabajar en condiciones de pH ácido usando ZnO como fotocatalizador a causa de la posible disolución del material; las condiciones óptimas reportadas en la literatura se encuentran entre los valores de pH 5 y 7 (Nugroho *et al.*, 2024). Las pruebas de degradación fotocatalítica usando los contaminantes AM, TC y CIP fueron realizadas en condiciones de pH natural, es decir, el pH de la solución contaminante en contacto con el fotocatalizador (pH ~ 7), con base en lo reportado en trabajos previos, cuyos resultados muestran el valor de pH 7 como óptimo en las pruebas de degradación fotocatalítica en medio acuoso usando materiales basados en Bi y ZnO como fotocatalizador (Jayeola *et al.*, 2024).

La degradación fotocatalítica de los contaminantes AM, TC y CIP usados se calculó mediante la ec. (29). La cinética de degradación se calculó utilizando la ec. (30).

$$\% \text{ Degradación fotocatalítica} = \left(1 - \frac{c \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{c_0 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)} \right) * 100 \quad (29)$$

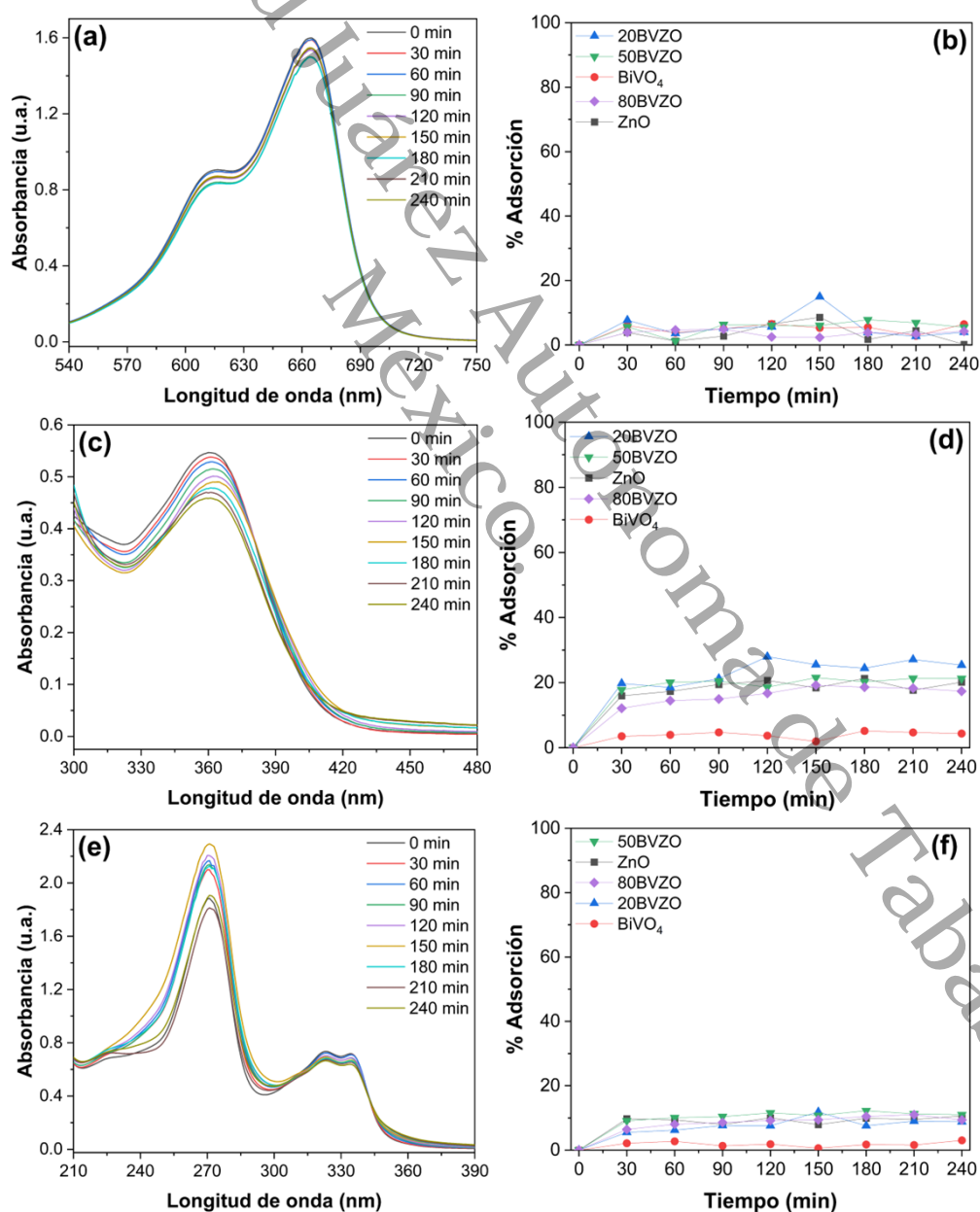
$$\ln \left(\frac{c_0 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{c \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)} \right) = k \left(\text{min}^{-1} \right) t \left(\text{min} \right) \quad (30)$$

Donde C₀ (mg/L) y C (mg/L) representan la concentración inicial y la concentración final, respectivamente, que se relacionan con la absorbancia inicial y final de la solución contaminante después de diferentes tiempos, k (min⁻¹) es la constante cinética y t (min) es el tiempo de exposición a la radiación (Gupta *et al.*, 2023; Liaqat *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2023).

En la Figura 35, se presentan los espectros de absorción de (a) AM, (c) TC y (e) CIP registrados a diferentes intervalos durante el fenómeno de fotólisis; y los porcentajes de adsorción de (b) AM, (d) TC y (f) CIP usando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO.

Figura 35

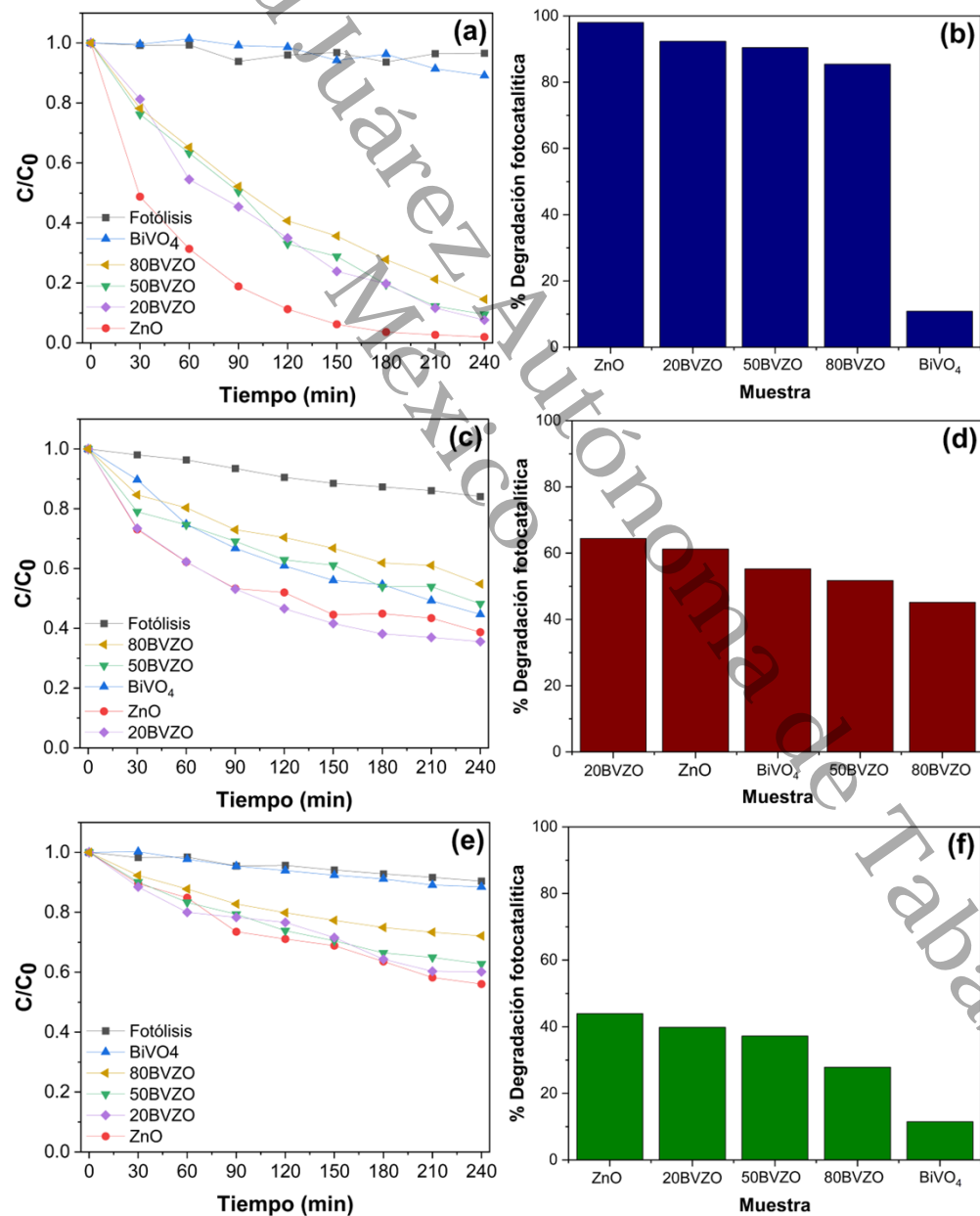
Espectros de absorción de (a) AM, (c) TC y (e) CIP registrados a diferentes intervalos durante el fenómeno de fotólisis; y porcentajes de adsorción de (b) AM, (d) TC y (f) CIP usando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO



En la Figura 36, se presenta la relación de la concentración de (a) AM, (c) TC y (e) CIP contra el tiempo de radiación UV; y los porcentajes de degradación fotocatalítica de (b) AM, (d) TC y (f) CIP después de 4 h de radiación UV usando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador.

Figura 36

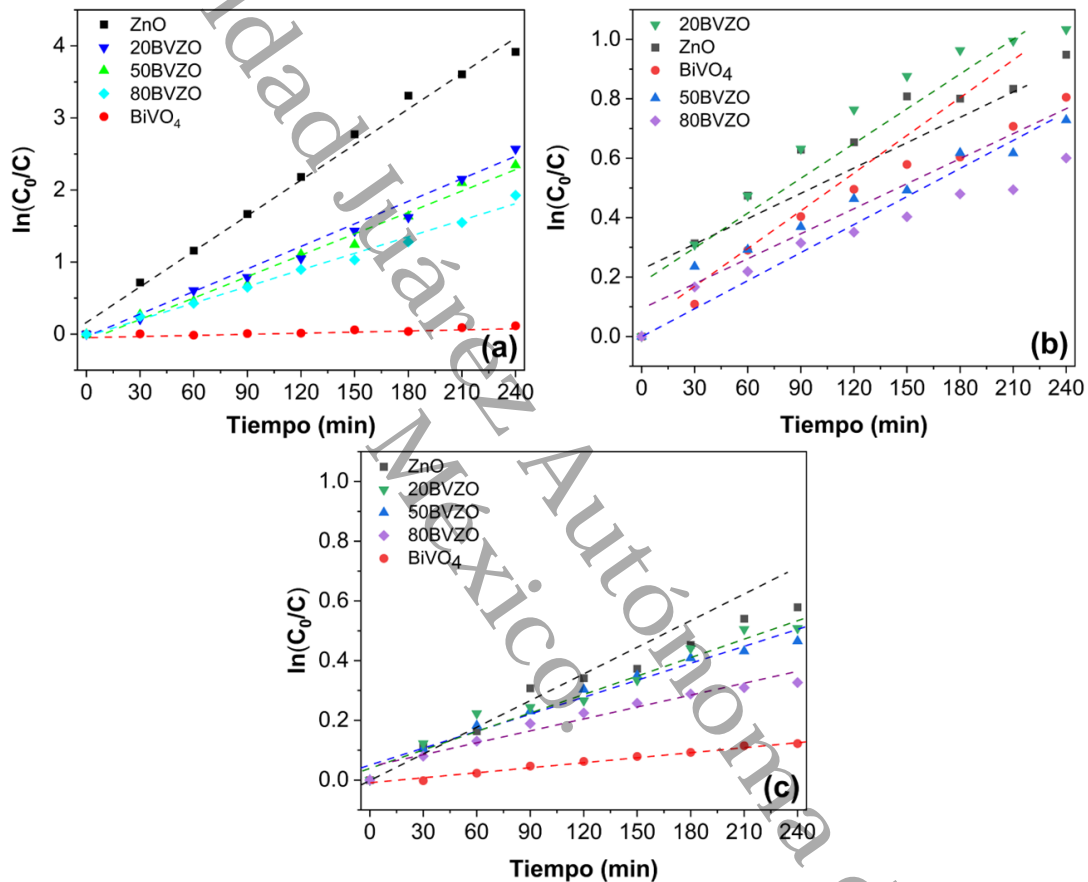
Relación de la concentración de (a) AM, (c) TC y (e) CIP contra el tiempo de radiación UV; y porcentajes de degradación fotocatalítica de (b) AM, (d) TC y (f) CIP después de 4 h de radiación UV usando muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador



En la Figura 37, se presentan las gráficas del ajuste de los datos de la degradación fotocatalítica de (a) AM, (b) TC y (c) CIP a una cinética de primer orden a temperatura ambiente.

Figura 37

Ajuste de los datos de la degradación fotocatalítica de (a) AM, (b) TC y (c) CIP a una cinética de primer orden a temperatura ambiente



Se puede ver en la Figura 35 a, c, que la degradación mediante el fenómeno de fotólisis del antibiótico TC y el colorante AM bajo la radiación UV puede despreciarse. Por lo tanto, la eliminación del antibiótico TC y del colorante AM se puede atribuir exclusivamente al proceso fotocatalítico utilizando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas. Por otra parte, la disminución de absorción de luz a 323 nm refleja que hay una tendencia decreciente en los diferentes intervalos de tiempo que se puede relacionar con la posible desactivación de la molécula de CIP causado por el fenómeno de fotólisis (Figura 35c). Sin embargo, los resultados de las pruebas usando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO aunando la radiación UV demuestran que la contribución de ambos factores es

necesaria para la degradación del antibiótico CIP, es decir, la longitud de máxima absorción del contaminante CIP decrece, lo que se atribuye a un aumento de la degradación de CIP en presencia del fotocatalizador y la radiación UV. El proceso de adsorción de los contaminantes AM, TC y CIP (Figura 35 b, d, f), usando las muestras ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO durante el proceso adsorción-desorción, no es significativo en comparación con los porcentajes de degradación fotocatalítica obtenidos con el uso de las muestras ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador bajo radiación UV.

La Tabla 9 presenta los porcentajes de degradación fotocatalítica de AM, TC y CIP y las constantes de velocidad de reacción de primer orden usando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador bajo radiación UV.

Tabla 9

Porcentaje de degradación fotocatalítica de AM, TC y CIP y constante de velocidad de reacción de primer orden usando muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador bajo radiación UV

Muestra	AM (10 mg/L)		TC (15 mg/L)		CIP (15 mg/L)	
	%	K (min ⁻¹)	%	K (min ⁻¹)	%	K (min ⁻¹)
	Degradación fotocatalítica		Degradación fotocatalítica		Degradación fotocatalítica	
ZnO	98.01	0.01652	61.26	0.00344	43.94	0.00236
BiVO ₄	10.86	0.00048	55.30	0.00323	11.50	0.00056
20BVZO	92.35	0.01044	64.43	0.00412	39.84	0.00206
50BVZO	90.43	0.00988	51.74	0.00269	37.22	0.00190
80BVZO	85.43	0.07610	45.15	0.00222	27.87	0.00132

La muestra de ZnO exhibió la mayor tasa de degradación fotocatalítica frente al contaminante AM; 98.01 % después de 4 h bajo radiación UV. En contraste, la muestra de BiVO₄ no exhibió una actividad significativa (10.86 %) frente al AM después de 4 h. Sin embargo, la degradación fotocatalítica de la TC alcanzó 55.30 % usando la muestra de BiVO₄ como fotocatalizador durante 4 h. Debe notarse que el descenso de la relación de concentración del antibiótico CIP agregando las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO como fotocatalizador fue mayor que en el proceso de fotólisis, indicando que las muestras de ZnO,

BiVO_4 , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO mejoraron el proceso de degradación del contaminante CIP y que la sola exposición de la solución acuosa del contaminante CIP no es un procedimiento eficaz por sí solo. Se observó un aumento de la eficacia de los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO a medida que disminuye el porcentaje de BiVO_4 . La muestra 20BVZO presentó mayor porcentaje de degradación fotocatalítica de las moléculas de AM, TC y CIP en comparación con las muestras 50BVZO y 80BVZO.

Los porcentajes de degradación fotocatalítica siguen una tendencia similar para el AM y CIP. Sin embargo, en el caso de la TC, la muestra 20BVZO mostró una actividad fotocatalítica mayor en comparación con las muestras de ZnO , BiVO_4 , 50BVZO y 80BVZO. Esto es atribuido a que la solución de TC en las pruebas fotocatalíticas es incolora, permitiendo que los polvos de 20BVZO absorbieran adecuadamente la radiación para la activación. Resultados similares fueron reportados por Wang *et al.*, (2023) usando fotocatalizadores basados en Cu para la degradación fotocatalítica de antibióticos y contaminantes orgánicos. Se puede notar en la Tabla 9 que la eficacia de degradación fotocatalítica del colorante AM es mayor que la del antibiótico TC usando los compuestos heterogéneos de BiVO_4/ZnO con diferente contenido de BiVO_4 . La eficacia de la degradación fotocatalítica del colorante AM (10 mg/L) se atribuye a que el colorante AM tiene enlaces como el grupo amino ($-\text{NH}_2$) que son comparativamente menos estables que los grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) e hidroxilo ($-\text{OH}$) del antibiótico TC (15 mg/L) (Liaqat *et al.*, 2024).

Para conocer las constantes cinéticas de la reacción durante la degradación fotocatalítica del contaminante problema, se asumió una cinética de primer orden. Las pendientes de las rectas, representadas en la Figura 37, son las constantes cinéticas; en todos los casos se observa un comportamiento lineal, lo que sugiere una cinética de primer orden. Es decir, se obtuvo un ajuste lineal adecuado ($R^2 > 0.9$), por lo que, no se consideró la necesidad de probar con un modelo de segundo orden. Con base en estos resultados, se propuso que la degradación fotocatalítica de los contaminantes AM, TC y CIP usando las muestras de ZnO , BiVO_4 , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO obtenidas siguen una cinética de primer orden.

Las pruebas de estabilidad a largo plazo de los fotocatalizadores de ZnO , BiVO_4 , 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO no fueron realizadas. Sin embargo, trabajos reportados previamente han proporcionado nuevas perspectivas para la construcción de un fotocatalizador verde flexible y reciclable para eliminar contaminantes emergentes usando materiales basados en BiVO_4 ; y avances en la fabricación de fotocatalizadores a gran escala con propiedades de tratamiento de reciclaje usando materiales basados en ZnO que pueden aplicarse ampliamente en el tratamiento de aguas residuales. Xu *et al.*, (2022) reportaron fotocatalizadores de

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiVO}_4/\text{CuS}$, fabricados mediante el crecimiento directo de CuS sobre la superficie de Fe_3O_4 y BiVO_4 , que exhibieron buena estabilidad y pudieron reutilizarse durante cinco ciclos en un sistema de contaminantes mixtos. Yang *et al.*, (2025) sintetizaron compuestos heterogéneos de ZnO/CuS mediante el método solvotérmico que exhibieron excelentes propiedades fotocatalíticas iniciales y recicladas bajo una lámpara de xenón.

De acuerdo con la literatura, la fotocatálisis heterogénea permite descomponer moléculas contaminantes sin la creación de subproductos más tóxicos (Rajput *et al.*, 2022). Puesto que la concentración de AM, TC y CIP fue medida mediante espectrofotometría UV-Vis a una longitud de onda de 664 nm, 357 nm y 323 nm, respectivamente, los productos de degradación fotocatalítica y la toxicidad de los productos intermedios no fueron estudiados durante el proceso fotocatalítico (Bian *et al.*, 2022). Sin embargo, los posibles mecanismos de degradación fotocatalítica para el AM, TC y CIP son propuestos a continuación.

5.6.2 Mecanismo de degradación fotocatalítica

La actividad del sistema fotocatalizador se atribuye principalmente a los impactos combinados de numerosos factores, incluida la inmersión en la luz. A continuación, se presentan algunos componentes críticos del mecanismo fotocatalítico.

La fotocatálisis tiene cuatro pasos:

1. Absorción de luz para generar pares e^-h^+
2. Separación del portador de carga
3. Transferencia de e^-h^+ a la superficie del semiconductor
4. Utilización de cargas superficiales en reacciones redox.

Al final, la recombinación de muchos e^-h^+ entre sí o van a la superficie. Debido a esta recombinación, se libera energía potencial en forma de calor o luz. Las característicasceptoras/donantes de los tipos sorbidos determinan las vías redox específicas que son estimuladas por cargas superficiales que son fotoinducidas y perduran durante mucho tiempo. Para que un fotocatalizador semiconductor estimule e^- desde la BV a la BC y genere los portadores de carga, la energía de un fotón ocupado debe ser igual o mayor que la banda prohibida de un fotocatalizador (Batra *et al.*, 2022).

5.6.2.1 Mecanismo de degradación fotocatalítica de AM. El posible mecanismo de oxidación se describe a continuación: El electrón cargado negativamente (e^-) que absorbe energía fotónica ($h\nu$), se mueve a la BC y deja una vacante, conocida como un hueco cargado

positivamente (h^+) en la BV, creando así un par e^-h^+ . En la BV, los huecos reaccionan con agua e iones hidróxido (OH^-) para formar radicales hidroxilos altamente reactivos (OH^*) que rompen los enlaces dobles y desestabilizan la estructura electrónica de la molécula de AM.

En la BC, los electrones reaccionan con el oxígeno disuelto (O_2) para producir aniones radicales superóxido (O_2^{*-}) y luego reaccionan con iones de hidrógeno disueltos (H^+) para finalmente producir H_2O_2 . Este último reacciona con electrones, así como con el anión radical superóxido (O_2^{*-}), produciendo radicales hidroxilos altamente reactivos (OH^*). Además, el H_2O_2 también se descompone en OH^* al exponerse a la radiación luminosa. Estos potentes radicales hidroxilos (OH^*) reaccionan con el colorante AM en la superficie del fotocatalizador, oxidando los grupos metilo ($-CH_3$) unidos a la estructura del AM. Los anillos presentes en la molécula se vuelven susceptibles a la ruptura con la pérdida de los grupos funcionales. La apertura de estos anillos genera compuestos intermedios que posteriormente son oxidados por la vía de ataques sucesivos de radicales, dando como resultado productos finales de ácidos minerales, agua y CO_2 (Batra *et al.*, 2022; Qi *et al.*, 2024):



5.6.2.2 Mecanismo de degradación fotocatalítica de TC. Se propone la ruptura de la molécula TC como se describe a continuación. Cuando la energía adsorbida por el material semiconductor es igual o mayor que la banda prohibida, el e^- fotogenerado en la BV pasa a la BC y el h^+ permanece en la BV del semiconductor. Los electrones generados en la BC y los huecos formados en la BV poseen cargas opuestas y tienden a moverse hacia la superficie del fotocatalizador. Posteriormente, el oxígeno adsorbido del sistema reacciona con los electrones

para formar radicales superóxidos ($\bullet O_2^-$) altamente reactivos. Estos radicales, debido a su potente capacidad oxidativa, oxidan directamente la TC. Además, los huecos fotogenerados en la BV, como oxidantes potentes, inician directamente la oxidación de la TC adherida a la superficie del fotocatalizador. La acción de oxidación combinada de los huecos fotogenerados y los radicales superóxidos ($\bullet O_2^-$) conduce a la descomposición de la TC adherida a la superficie del fotocatalizador, se generan compuestos intermedios con la pérdida del grupo amino de la TC y posteriormente, la sustancia activa ($\bullet O_2^-$) degrada la molécula de TC mediante la apertura de los grupos aromáticos. Este proceso puede continuar hasta que las sustancias orgánicas intermediarias se conviertan completamente en productos como iones minerales, agua y CO_2 (M. Liu *et al.*, 2024; Phakathi *et al.*, 2025):



5.6.2.3 Mecanismo de degradación fotocatalítica de CIP. El posible mecanismo de la ruptura de la molécula CIP debido a la oxidación de la cadena piperazinilo por la actividad fotocatalítica se describe a continuación: Cuando la energía adsorbida por el material semiconductor es igual o mayor que la banda prohibida, el e^- fotogenerado en la BV pasa a la BC y el h^+ permanece en la BV del semiconductor. Estos h^+ causan la oxidación de la cadena piperazinilo, primero se forman grupos aldehídos que seguidamente se pierden por descarbonilación. El siguiente producto intermedio se forma cuando la molécula pierde una amina secundaria y un grupo formaldehído. Posteriormente, debido a la actividad $h^+/\bullet OH$ la estructura de anillo se abre para remover el grupo quinolona y se cierra para formar un anillo con cinco átomos de carbono. El anillo de cinco elementos se abre para remover los grupos laterales (M. Chen *et al.*, 2023; Makama *et al.*, 2020):



Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Se obtuvieron muestras de ZnO prístino y BiVO₄ prístino mediante síntesis asistida por microondas seguido de una ruta ultrasónica para fabricar compuestos heterogéneos de BiVO₄/ZnO con diferente contenido de BiVO₄. Esto, se confirmó mediante el análisis de DRX y espectroscopía Raman.

Los porcentajes de degradación fotocatalítica de AM fueron los siguientes: ZnO (98.01 %) > 20 BVZO (92.35 %) > 50 BVZO (90.43 %) > 80BVZO (85.43 %) > BiVO₄ (10.86 %). En el caso de la TC, los porcentajes de degradación fotocatalítica fueron: 20BVZO (64.43 %) > ZnO (61.26 %) > BiVO₄ (55.30 %) > 50 BVZO (51.74 %) > 80 BVZO (45.15 %). Para el CIP, los porcentajes de degradación fotocatalítica fueron: ZnO (43.94 %) > 20BVZO (39.84 %) > 50 BVZO (37.22 %) > 80 BVZO (27.87 %) > BiVO₄ (11.50 %). Se observó que hubo un aumento en el rendimiento fotocatalítico bajo radiación UV de los compuestos heterogéneos con un contenido reducido de BiVO₄. Este comportamiento se asoció con el bajo rendimiento fotocatalítico de BiVO₄ ya que el porcentaje de degradación fotocatalítica del CIP con una concentración inicial de 15 mg/L después de 4 h de exposición a la radiación UV usando BiVO₄ prístino fue de 11.50 %. Sin embargo, el porcentaje de degradación fotocatalítica de TC en las mismas condiciones fue de 55.30 %.

La muestra 20BVZO reveló el mejor rendimiento fotocatalítico (64.43 %), en comparación con las muestras de ZnO, BiVO₄, 50BVZO y 80BVZO, para la degradación fotocatalítica de TC bajo radiación UV con una dosis de fotocatalizador de 0.3 g/L y sin el uso de ningún agente captador. Esto, se atribuye a la disminución de la recombinación de los pares electrón-hueco fotogenerados debido a la banda prohibida del ZnO en el compuesto heterogéneo de BiVO₄/ZnO, con 20 % de contenido de BiVO₄, menor en comparación con las muestras de ZnO, BiVO₄, 50BVZO y 80BVZO; así como su mayor volumen de poro y diámetro promedio de poro en comparación con las muestras de ZnO, BiVO₄, 50BVZO y 80BVZO. Por lo tanto, la muestra 20BVZO puede considerarse como un compuesto heterogéneo mejorado para su uso como fotocatalizador en la degradación fotocatalítica de antibióticos.

Se recomienda determinar los ciclos de reutilización de las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO, así como realizar pruebas fotocatalíticas usando una mezcla de soluciones de TC y CIP para evaluar la competitividad en la degradación fotocatalítica de estas moléculas.

Contribuciones

Participación en conferencias

- Ponencia en modalidad oral denominada “*PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF TETRACYCLINE ANTIBIOTIC USING BiVO_4 , ZnO AND BiVO_4/ZnO SEMICONDUCTING MATERIALS OBTAINED BY MICROWAVE ASSISTED SYNTHESIS*”, Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Erik Ramirez Morales, Laura Lorena Díaz Flores, María Guadalupe Hernández Cruz, Velumani Subramaniam, Lizeth Rojas Blanco, simposio G2 (*Semiconducting Materials: Synthesis, Characterization and Applications*) en la 33.^a edición de *International Materials Research Congress*, Cancún, México, 17 a 21 de agosto de 2025.
- Ponencia en modalidad oral denominada “*PFAS REMOVAL BY UV-DRIVEN TiO_2 -DOPED NANOCOMPOSITES PHOTOCATALYST*”, Dharani Sathwik Ram Panchagnula, Jitendra Choudhary, Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Sreeram Vaddiraju, Guillermo Aguilar, Anish Jantrania, June Wolfe, Velumani Subramaniam, Smriti Shankar, José A. Chávez-Carvayar, Janie McClurkin Moore, Lizeth Rojas Blanco, en la 33.^a edición de *International Materials Research Congress*, Cancún, México, 17 a 21 de agosto de 2025.
- Ponencia en modalidad oral denominada “*CHARACTERIZATION OF BiVO_4 , ZnO AND BiVO_4/ZnO PHOTOCATALYSTS OBTAINED BY MICROWAVE-ASSISTED SYNTHESIS AND THEIR PHOTOCATALYTIC ACTIVITIES FOR DYE DEGRADATION*”, Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Erik Ramirez Morales, María Guadalupe Hernández Cruz, Velumani Subramaniam, Lizeth Rojas Blanco, simposio G5 (*Recent Trends in Functional Semiconducting Materials*) en la 32.^a edición de *International Materials Research Congress*, Cancún, México, 18 a 23 de agosto de 2024.

Artículo bajo preparación

- *Degradation of Antibiotics Using BiVO_4/ZnO Photocatalysts: Effect of Composition on Photocatalytic Performance.*

Estancia de investigación

- Estancia en el departamento de ingeniería mecánica en *Texas A&M University*, bajo la supervisión del Dr. Velumani Subramaniam, del 1 de febrero de 2025 al 30 de junio de 2025.

Referencias citadas

- Aalami, Z., Hoseinzadeh, M., Hosseini Manesh, P., Aalami, A. H., Es'haghi, Z., Darroudi, M., Sahebkar, A., & Hosseini, H. A. (2024). Synthesis, characterization, and photocatalytic activities of green sol-gel ZnO nanoparticles using *Abelmoschus esculentus* and *Salvia officinalis*: A comparative study versus co-precipitation-synthesized nanoparticles. *Heliyon*, *10*(2), e24212. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24212>
- Ait Abdelouhab, Z., Djouadi, D., Chelouche, A., Hammiche, L., & Touam, T. (2020). Structural and morphological characterizations of pure and Ce-doped ZnO nanorods hydrothermally synthesized with different caustic bases. *Materials Science-Poland*, *38*(2), 228–235. <https://doi.org/10.2478/msp-2020-0038>
- Al Abass, N., Qahtan, T. F., Alharthi, A. I., Alotaibi, M. A., Alansi, A. M., Bubshait, A., & Saleh, T. A. (2023). Scalable ambient conditions-based fabrication of flower-like bismuth vanadate (BiVO₄) film incorporating defects aimed at visible-light-induced water-splitting application. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.200>
- Albarrán-Marmolejo, G., & Mendoza, E. (2022). Procesos de oxidación avanzados para la purificación de agua: Revisión. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, *13*, 21–41.
- Alhaddad, M., Amin, M. S., & Zaki, Z. I. (2022). Novel BiVO₄/ZnO heterojunction for amended photoreduction of mercury (II) ions. *Optical Materials*, *127*, 112251. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112251>
- Ali, S., Imran, M., Kousar, R., Fatima, M., Manzoor, M. Z., Ahmed, H. E., Riaz, S., Ullah, H., Nazir, A., & Batool, Z. (2024). Green Synthesis of Bi₂O₃, MnO₂ and their Nanocomposite (Bi₂O₃/MnO₂) for Efficient Photodegradation and Antimicrobial Activity. *Desalination and Water Treatment*, 100688. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100688>
- Allah, M. A. A. H., Ibrahim, H. K., & Alshamsi, H. A. (2025). Enhanced adsorption, anticancer and antibacterial potentials of *Pontederia crassipes* L. extract mediated ecofriendly synthesized ZnO/biochar nanohybrid. *Inorganic Chemistry Communications*, *171*, 113538. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113538>
- Alomayri, T. (2025). Enhanced interfacial charge transfer in BiVO₄/rGO/FeVO₄ heterojunction composite for improved photocatalysis water purification. *Ceramics International*, *51*(8), 10193–10199. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.450>

- Alshahrani, B., Fares, S. S., Alqurashi, R. S., Salman, M., & Korna, A. H. (2025). Effect of gamma irradiation on the structural, optical, and electronic properties of PVC/BiVO₄/ZnO nanocomposite films. *Physics Open*, 23, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2025.100252>
- Arellano-Cortaza, M., Ramírez-Morales, E., Pal, U., Pérez-Hernández, G., & Rojas-Blanco, L. (2021). pH dependent morphology and texture evolution of ZnO nanoparticles fabricated by microwave-assisted chemical synthesis and their photocatalytic dye degradation activities. *Ceramics International*, 47(19), 27469–27478. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.170>
- B., M., Hernandez-Maya, R., Solís-López, M., Th-Th, C., & S., V. (2018). Photocatalytic degradation of Orange G using TiO₂/Fe₃O₄ nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(18), 15436–15444. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9069-1>
- Balu, K., Kaliyamoorthy, S., Durai, M., Aguiar, A., Sobral, M. C. M., Muthuvel, I., Kumaravel, S., Avula, B., Sobral, A. J. F. N., & Ahn, Y.-H. (2023). Porphyrins and ZnO hybrid semiconductor materials: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 154, 110973. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110973>
- Bao, C., Serrano-Lotina, A., Niu, M., Portela, R., Li, Y., Lim, K. H., Liu, P., Wang, W., Bañares, M. A., & Wang, Q. (2023). Microwave-associated chemistry in environmental catalysis for air pollution remediation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 466, 142902. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142902>
- Batra, V., Kaur, I., Pathania, D., Sonu, & Chaudhary, V. (2022). Efficient dye degradation strategies using green synthesized ZnO-based nanoplateforms: A review. *Applied Surface Science Advances*, 11, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100314>
- Belahlou, K., Belaidi, S., Bicha, S., Bensaid, S. O., Sangare, S., & Sehili, T. (2025). Tuned band gap in green-synthesized ZnO, MgO, and Zn_{1-x}Mg_xO for photocatalytic degradation of chlorophenylurea herbicide under UV-A and solar light in diverse water matrices. *Separation and Purification Technology*, 376, 134038. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134038>
- Beura, R., Sooraj, K. P., Singh, P., Ranjan, M., & Mohapatra, S. (2024). Sunlight driven photocatalytic degradation of organic pollutants by solvothermally synthesized rGO-BiVO₄ nanohybrids. *Chemical Physics Impact*, 8, 100595. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100595>

- Bi, X., Wang, R., Yuan, Y., Zhang, D., Zhang, T., Ma, L., Wu, T., Shahbazian-Yassar, R., Amine, K., & Lu, J. (2020). From Sodium–Oxygen to Sodium–Air Battery: Enabled by Sodium Peroxide Dihydrate. *Nano Letters*, 20(6), 4681–4686. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01670>
- Bian, K., Chen, F., Hao, C., & Tang, Y. (2022). Enhanced photocatalytic degradation of tetracycline over carbon quantum dot-decorated MIL-101(Fe) composite. *Desalination and Water Treatment*, 271, 307–316. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28803>
- Boateng, D. (2025). Advances in deep learning-based applications for Raman spectroscopy analysis: A mini-review of the progress and challenges. *Microchemical Journal*, 209, 112692. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112692>
- Braslavsky, S. E. (2007). Glossary of terms used in photochemistry, 3rd edition (IUPAC Recommendations 2006). *Pure and Applied Chemistry*, 79(3), 293–465. <https://doi.org/10.1351/pac200779030293>
- Che, R., Zhu, Y., Tu, B., Miao, J., Dong, Z., Liu, M., Wang, Y., Li, J., Chen, S., & Wang, F. (2023). A Meta-Analysis of Influencing Factors on the Activity of BiVO₄-Based Photocatalysts. In *Nanomaterials* (Vol. 13, Issue 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nano13162352>
- Chen, M., Zhuang, K., Sui, J., Sun, C., Song, Y., & Jin, N. (2023). Hydrodynamic cavitation-enhanced photocatalytic activity of P-doped TiO₂ for degradation of ciprofloxacin: Synergetic effect and mechanism. *Ultrasonics Sonochemistry*, 92, 106265. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106265>
- Chen, S. H., Jiang, Y. S., & Lin, H. Y. (2020). Easy Synthesis of BiVO₄ for Photocatalytic Overall Water Splitting. *ACS Omega*, 5(15), 8927–8933. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00699>
- Cheng, C., Shi, Q., Zhu, W., Zhang, Y., Su, W., Lu, Z., Yan, J., Chen, K., Wang, Q., & Li, J. (2023a). Microwave-Assisted Synthesis of MoS₂/BiVO₄ Heterojunction for Photocatalytic Degradation of Tetracycline Hydrochloride. *Nanomaterials*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/nano13091522>
- Cheng, C., Shi, Q., Zhu, W., Zhang, Y., Su, W., Lu, Z., Yan, J., Chen, K., Wang, Q., & Li, J. (2023b). Microwave-Assisted Synthesis of MoS₂/BiVO₄ Heterojunction for Photocatalytic Degradation of Tetracycline Hydrochloride. *Nanomaterials*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/nano13091522>

- Ch-Th, T., Manisekaran, R., Santoyo-Salazar, J., Schoefs, B., Velumani, S., Castaneda, H., & Jantrania, A. (2021). Graphene oxide decorated TiO₂ and BiVO₄ nanocatalysts for enhanced visible-light-driven photocatalytic bacterial inactivation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 418. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113374>
- Cinnathambi Subramani, M., Kandasamy, B., Budiman, I., Subyakto, S., Chitraningrum, N., Widyaningrum, B. A., Saputra, N. A., Fauzi, A. A. B., Holilah, H., Hata, T., & Nafiqoh, N. (2025). Synthesis and characterization of bamboo stem porous activated carbon/chitosan/zinc oxide (BSPAC/CS/ZnO) ternary nanocomposite for enhancement of biological activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305, 141041. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141041>
- Correia, A., & Marcano, L. (2015). Presencia y eliminación de compuestos farmacéuticos en plantas de tratamientos de aguas residuales: Revisión a nivel mundial y perspectiva nacional. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 55(1), 1–18.
- Costa Junior, I. L., Ferreira, K. A., Kappes, C. A., & Giona, R. M. (2022). Photoperoxidation of ciprofloxacin antibiotic in aqueous medium using Fe₃-XO₄-Y-TiO₂ particles as catalyst. *Eclética Química Journal*, 47(1), 55–63. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v47.1.2022.p55-63>
- Dąbrowska, S., Chudoba, T., Wojnarowicz, J., & Łojkowski, W. (2018). Current Trends in the Development of Microwave Reactors for the Synthesis of Nanomaterials in Laboratories and Industries: A Review. *Crystals*, 8(10), 379. <https://doi.org/10.3390/cryst8100379>
- Dashtpeyma, G., & Shabanian, S. R. (2023). Efficient photocatalytic oxidative desulfurization of liquid petroleum fuels under visible-light irradiation using a novel ternary heterogeneous BiVO₄-CuO/modified natural clinoptilolite zeolite. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 445, 115024. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115024>
- Dastafkan, K., Kiani, A., Obeydavi, A., & Rahimi, M. (2018). Crystallization and solid solution attainment of samarium doped ZnO nanorods via a combined ultrasonic-microwave irradiation approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.008>
- Drisya, K. T., Solís-López, M., Ríos-Ramírez, J. J., Durán-Álvarez, J. C., Rousseau, A., Velumani, S., Asomoza, R., Kassiba, A., Jantrania, A., & Castaneda, H. (2020). Electronic and optical

- competence of TiO₂/BiVO₄ nanocomposites in the photocatalytic processes. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69032-9>
- Espenti, C. S., Rao, K. M., Rao, K. S. V. K., Mettu, M. R., & Han, S. S. (2025). Advancements in transmission and scanning electron microscopy for nanomaterials: Insights into structural, morphological, and functional characteristics. *Applied Materials Today*, 45, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102829>
- Faraldos, M., & Goberna, C. (2021). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales* (3rd ed.). Consejo superior de investigaciones científicas.
- Fu, X., Xie, M., Luan, P., & Jing, L. (2014). Effective Visible-Excited Charge Separation in Silicate-Bridged ZnO/BiVO₄ Nanocomposite and Its Contribution to Enhanced Photocatalytic Activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(21), 18550–18557. <https://doi.org/10.1021/am505651d>
- Gautier di Confiengo, G., Faga, M. G., La Parola, V., Magnacca, G., Paganini, M. C., & Testa, M. L. (2024). "Microwave approach and thermal decomposition: A sustainable way to produce ZnO nanoparticles with different chemo-physical properties." *Materials Chemistry and Physics*, 321, 129485. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129485>
- Gavernet, L. (2021). *Introducción a la Química Medicinal*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Geraldes, C. F. G. C. (2020). Introduction to Infrared and Raman-Based Biomedical Molecular Imaging and Comparison with Other Modalities. *Molecules*, 25(23), 5547. <https://doi.org/10.3390/molecules25235547>
- Golchinvafo, S., Masoudpanah, S. M., & Alamolhoda, S. (2022). Ultra-broadband FeNi₃/NiZnFe₂O₄/ZnO composite powders for microwave absorption. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 1737–1748. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.123>
- Govinda, V., & Manish, M. (2018). Development and optimization of UV-Vis spectroscopy - A review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 7(11), 1170–1180.
- Guo, Y., Liu, C., Ye, R., & Duan, Q. (2020). Advances on Water Quality Detection by UV-Vis Spectroscopy. *Applied Sciences*, 10(19), 6874. <https://doi.org/10.3390/app10196874>

- Gupta, N., Sarkar, A., Pradhan, B., & Biswas, S. K. (2023). Hydrothermal Synthesis of Mesoporous FeTiO₃ for Photo-Fenton Degradation of Organic Pollutants and Fluoride Adsorption. *RAiSE-2023*, 134. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059134>
- Hekmat, A., Ghasemi, S., & Vossoughi, M. (2023). Unveiling the synergistic effect of ionic liquid and metal-organic framework on the efficiency of BiVO₄: BiVO₄-MIL-100(Fe) as a visible light-induced photocatalyst for Basic Red 46 degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110658. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110658>
- Helal, A., Yu, J., Ghanem, M. A., Labib, A. A., & El-Sheikh, S. M. (2024). Boosting the photocatalytic activity of bismuth vanadate (BiVO₄) via optimization of the internal polarization. *Journal of Molecular Structure*, 1312, 138553. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138553>
- Hemavibool, K., Sansenya, T., & Nanan, S. (2022). Enhanced Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Oxytetracycline Antibiotics by BiVO₄ Photocatalyst under Visible Light and Solar Light Irradiation. *Antibiotics*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/antibiotics11060761>
- Holzwarth, U., & Gibson, N. (2011). The Scherrer equation versus the “Debye-Scherrer equation.” *Nature Nanotechnology*, 6(9), 534–534. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.145>
- Hwang, S.-H., Kim, Y. K., Hong, S. H., & Lim, S. K. (2019). Cu/CuO@ZnO Hollow Nanofiber Gas Sensor: Effect of Hollow Nanofiber Structure and P–N Junction on Operating Temperature and Sensitivity. *Sensors*, 19(14), 3151. <https://doi.org/10.3390/s19143151>
- Jácome-Acatitla, G. (2016). *Fotodegradación de naproxeno sódico y oxitetraciclina en medio acuoso empleando como fotocatalizadores óxidos mixtos derivados de hidróxidos dobles laminares MgAl* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Jahan Tamanna, N., Sahadat Hossain, Md., Mohammed Bahadur, N., & Ahmed, S. (2024). Green synthesis of Ag₂O & facile synthesis of ZnO and characterization using FTIR, bandgap energy & XRD (Scherrer equation, Williamson-Hall, size-train plot, Monshi-Scherrer model). *Results in Chemistry*, 7, 101313. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101313>
- Jara, P., Fernández-Jiménez, R., Ferreiro, A., Urbieto, A., Rabanal, M. E., & Fernández, P. (2024). Morphological, structural and luminescent characterization of Nd-doped ZnO nano- and microstructures grown by vapor-solid method. *Materials Science and Engineering: B*, 299, 116941. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116941>

- Jayeola, K. D., Sipuka, D. S., Sebokolodi, T. I., Nkwachukwu, O. V., Muzenda, C., Koiki, B. A., Babalola, J. O., Zhou, M., & Arotiba, O. A. (2024). The design and characterisation of a Z-scheme Bi₂O₂S/ZnO heterojunction photoanode for the photoelectrochemical removal of ciprofloxacin in synthetic and real wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147482. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147482>
- Kabir, F., Murtaza, A., ur Rehman, W., Ghani, A., & Yang, S. (2024). Energy gap and defects engineered optical, and magnetic properties of ZnO-based diluted magnetic semiconducting nanoparticles. *Results in Physics*, 60, 107650. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107650>
- Kamble, G. S., Natarajan, T. S., Patil, S. S., Thomas, M., Chougale, R. K., Sanadi, P. D., Siddharth, U. S., & Ling, Y. C. (2023). BiVO₄ As a Sustainable and Emerging Photocatalyst: Synthesis Methodologies, Engineering Properties, and Its Volatile Organic Compounds Degradation Efficiency. In *Nanomaterials* (Vol. 13, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano13091528>
- Karathuparathottathil-Damodharan, D. (2021). *Synthesis and photocatalytic properties of TiO₂/BiVO₄ nanocomposites and heterostructures* [PhD thesis]. Le Mans Université; Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- Khan, A., Mohamed, S. E., Al-Naggar, T. I., Albargi, H. B., Algethami, J. S., & Abdalla, A. M. (2024). Influence of sintering temperature on structural and optical properties of pure and Cl-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(2), 100910. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100910>
- Khan, H., Habib, M., Khan, A., & Boffito, D. C. (2020). A modified sol-gel synthesis to yield a stable Fe³⁺/ZnO photocatalyst: Degradation of water pollutants and mechanistic insights under UV and visible light. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104282. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104282>
- Kovács, Z., Molnár, C., Gyulavári, T., Magyari, K., Tóth, Z.-R., Baia, L., Pap, Z., & Hernádi, K. (2022). Solvothermal synthesis of ZnO spheres: Tuning the structure and morphology from nano- to micro-meter range and its impact on their photocatalytic activity. *Catalysis Today*, 397–399, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.03.004>
- Kshetri, Y. K., Chaudhary, B., Kamiyama, T., Kim, T.-H., Rosei, F., & Lee, S. W. (2021). Determination of ferroelastic phase transition temperature in BiVO₄ by Raman spectroscopy. *Materials Letters*, 291, 129519. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129519>

- Kurian, M. (2021). Advanced oxidation processes and nanomaterials -a review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100090>
- La, D. D., Van Lai, D., Nguyen, D., & Nguyen, D. D. (2025). Self-assembled porphyrin on coral-like ZnO nanoplates: A novel hybrid for enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants under simulated sunlight. *Catalysis Today*, 449, 115181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.115181>
- Lenczewska, K., Szymański, D., & Hreniak, D. (2022). Control of optical properties of luminescent BiVO₄:Tm³⁺ by adjusting the synthesis parameters of microwave-assisted hydrothermal method. *Materials Research Bulletin*, 154, 111940. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111940>
- Li, Y., Sun, X., Tang, Y., Ng, Y. H., Li, L., Jiang, F., Wang, J., Chen, W., & Li, L. (2021). Understanding photoelectrocatalytic degradation of tetracycline over three-dimensional coral-like ZnO/BiVO₄ nanocomposite. *Materials Chemistry and Physics*, 271, 124871. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124871>
- Liaqat, M., Younas, A., Iqbal, T., Afsheen, S., Zubair, M., Kamran, S. K. S., Syed, A., Bahkali, A. H., & Wong, L. S. (2024). Synthesis and characterization of ZnO/BiVO₄ nanocomposites as heterogeneous photocatalysts for antimicrobial activities and waste water treatment. *Materials Chemistry and Physics*, 315, 128923. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128923>
- Lims, S. C., Jose, M., Aswathappa, S., Jude Dhas, S. S., Kumar, R. S., & Pham, P. V. (2025). Exploring the photocatalytic breakdown of organic pollutants using intercalated ZnO/SiO₂ nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 329, 130050. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130050>
- Liu, F., Zou, X., Yue, N., Zhang, W., & Zheng, W. (2023). Correlative Raman imaging and scanning electron microscopy for advanced functional materials characterization. *Cell Reports Physical Science*, 4(10), 101607. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101607>
- Liu, M., Huang, J., Xie, H., Li, L., Han, W., Jiang, X., Wang, J., Wei, P., Xie, Y., & Qi, Y. (2024). Constructing a novel type-II ZnO/BiOCOOH heterojunction microspheres for the degradation of tetracycline and bacterial inactivation. *Chemosphere*, 346, 140664. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140664>

- López, R., & Gómez, R. (2012). Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol-gel and commercial TiO₂: a comparative study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 61(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2582-9>
- López-Pacheco, I. Y., Silva-Núñez, A., Salinas-Salazar, C., Arévalo-Gallegos, A., Lizarazo-Holguin, L. A., Barceló, D., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2019). Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects. *Science of The Total Environment*, 690, 1068–1088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.052>
- Makama, A. B., Salmiaton, A., Choong, T. S. Y., Hamid, M. R. A., Abdullah, N., & Saion, E. (2020). Influence of parameters and radical scavengers on the visible-light-induced degradation of ciprofloxacin in ZnO/SnS₂ nanocomposite suspension: Identification of transformation products. *Chemosphere*, 253, 126689. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126689>
- Manikantan, K., Shanmugasundaram, K., & Thirunavukkarasu, P. (2023). Enhanced photocatalytic dye degradation and hydrogen evolution performance of Cu encapsulated BiVO₄ under visible light irradiation. *Chemical Physics Impact*, 6, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100178>
- Martínez-Alcalá, I., Soto, J., & Lahora, A. (2020). Antibiotics as emerging pollutants. Ecotoxicological risk and control in wastewater and reclaimed water. *Ecosistemas*, 29(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2070>
- May-Ix, L.-A. (2023). *Síntesis y caracterización de materiales nanoestructurados con actividad fotocatalítica para la reducción de 4-nitrofenol y oxidación de arsénico en medio acuoso* [Tesis de Doctorado]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Miranda, G. G., de Sousa e Silva, R. L., dos Santos Pessoni, H. V., & Franco, A. (2021). Raman spectroscopy study of Ga-doped ZnO ceramics: An estimative of the structural disorder degree. *Physica B: Condensed Matter*, 606, 412726. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412726>
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). Scanning Electron Microscopy (SEM): A review. *ISSN 1454 - 8003 Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX*.

- Mote, V., Purushotham, Y., & Dole, B. (2012). Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2251-7235-6-6>
- Nain, K., Chander, S., Bansal, S., & Bhukal, S. (2025). Fabrication of BMIM-PF6 modified mesoporous ZnO-IL and CuO-IL NMs for CV dye adsorption: Modeling, mechanism, and textile effluent decolourisation feasibility. *Journal of Molecular Structure*, 141963. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.141963>
- Newell, J. (2010). *Ciencia de Materiales. Aplicaciones en ingeniería* (Primera Edición). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.
- Nugroho, D., Thinthasit, A., Wannakan, K., Surya, R., Nanan, S., & Benchawattananon, R. (2024). Well-synthesized carbon dots from flower of Cassia fistula and its hydrothermally grown heterojunction photocatalyst with zinc oxide (CDs@ZnO-H400) for photocatalytic degradation of ciprofloxacin and paracetamol. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(9), 105931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105931>
- Nyakairu, G. W. A., Kapanga, P. M., Ntale, M., Lusamba, S. N., Tshimanga, R. M., Ammari, A., & Shehu, Z. (2024). Synthesis, characterization and application of Zeolite/Bi2O3 nanocomposite in removal of Rhodamine B dye from wastewater. *Cleaner Water*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100004>
- Osipov, A. A., Osipova, L. M., Chromčiková, M., Hruška, B., & Liška, M. (2024). Effect of PbO replacement with ZnO on short- and intermediate-range order borate structures in ZnO-PbO-B2O3 glasses as probed by Raman spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 637, 123062. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2024.123062>
- Padwal, Y., Sumbe, P., Shinde, M., More, M. A., Ashokkumar, M., Chauhan, R., & Gosavi, S. W. (2025). Dextrose-mediated in-situ synthesis of BiVO4/C composite: Advances in multifunctional behaviour towards photocatalysis and field electron emission properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 106, 511–527. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.393>
- Paraguay-Delgado, F. (2020). Técnicas de microscopía electrónica usadas en el estudio de nanopartículas. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 13(25), 101–131. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.25.69626>

- Parveen, A., Surumbarkuzhali, N., Meeran, M. N., Ramachandran, K., BoopathiRaja, R., & Parthibavarman, M. (2024). A dual-purpose photocatalytic reaction for hydrogen evolution and simultaneous organic pollutant degradation of V₂O₅/Ppy based composite photocatalyst. *Chemical Physics Impact*, 8, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100646>
- Patterson, A. L. (1939). The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review*, 56(10), 978–982. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>
- Peltzer-y-Blancá, E.-L. (2021). *Introducción a la física de semiconductores y dispositivos electrónicos*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Phakathi, N. A., Tichapondwa, S. M., & Chirwa, E. M. N. (2025). Enhanced photodegradation of tetracycline by novel porous g-C₃N₄ nanosheets under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 462, 116252. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116252>
- Pham, M. Q., Ngo, T. M., Nguyen, V. H., Nong, L. X., Vo, D. V. N., Tran, T. Van, Nguyen, T. D., Bui, X. T., & Nguyen, T. D. (2020). Facile solvothermal synthesis of highly active monoclinic scheelite BiVO₄ for photocatalytic degradation of methylene blue under white LED light irradiation. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 8388–8394. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.05.029>
- Qi, S., Hu, X., Zhang, K., Li, H., & Wu, S. (2024). Investigation of the mechanism and stability of highly efficient photocatalytic degradation of Methylene blue using Ni doped CdS photocatalyst. *Polyhedron*, 262, 117176. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2024.117176>
- Rahman, N. A. A. A., Khasri, A., Salleh, N. H. M., Jamir, M. R. M., Ansar, S., Boopathy, R., & Syafiuddin, A. (2023). Optimization of microwave sol–gel synthesis of N-Ce-AC/TiO₂ for adsorption/photodegradation of tetracycline. *Desalination and Water Treatment*, 303, 151–159. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29791>
- Rajput, R. B., Shaikh, R., Sawant, J., & Kale, R. B. (2022a). Recent developments in ZnO-based heterostructures as photoelectrocatalysts for wastewater treatment: A review. *Environmental Advances*, 9, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100264>
- Rajput, R. B., Shaikh, R., Sawant, J., & Kale, R. B. (2022b). Recent developments in ZnO-based heterostructures as photoelectrocatalysts for wastewater treatment: A review. *Environmental Advances*, 9, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100264>

- Rocha, F. S., Gomes, A. J., Lunardi, C. N., Kaliaguine, S., & Patience, G. S. (2018). Experimental methods in chemical engineering: Ultraviolet visible spectroscopy—UV-Vis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(12), 2512–2517. <https://doi.org/10.1002/cjce.23344>
- Rodrigues, M. H. de M., Borges, K. C. M., Tello, A. C. M., Roca, R. A., Gonçalves, R. de F., da Silva, A. B. F., Longo, E., & Godinho, M. J. (2023). Effect of pH on the synthesis of BiVO₄ to improve photocatalysis and antimicrobial properties. *Materials Chemistry and Physics*, 296, 127198. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127198>
- Rodríguez-Peña, M., & Barrera-Díaz, C.-E. (2020). *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua* (1st ed.). PUBLICACIONES UAEM.
- Rohilla, P., Pal, B., & Das, R. K. (2023). Improved photocatalytic degradation of rhodamine B by g-C₃N₄ loaded BiVO₄ nanocomposites. *Heliyon*, 9(11), e21900. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21900>
- Rustembekkyzy, K., Sabyr, M., Kanafin, Y. N., Khamkhash, L., & Atabaev, T. Sh. (2024). Microwave-assisted synthesis of ZnO structures for effective degradation of methylene blue dye under solar light illumination. *RSC Advances*, 14(23), 16293–16299. <https://doi.org/10.1039/D4RA02451F>
- Sánchez, O. A., Rodríguez, J. L., Barrera-Andrade, J. M., Borja-Urby, R., & Valenzuela, M. A. (2020). High performance of Ag/BiVO₄ photocatalyst for 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid degradation under visible light. *Applied Catalysis A: General*, 600, 117625. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117625>
- Sanjuan-Galindo, R., Peña-González, A., Reyes-González, M., Aba-Guevara, C., & Ramos-Delgado, N. (2023). Método de degradación de antibióticos y evaluación de la actividad antibiótica residual. *Journal of Basic Sciences*, 9(26), 23–36.
- Santos-Arias, M. (2023). *Degradación Fotocatalítica de Azul de Metileno usando TiO₂/VO₂* [Tesis de licenciatura inédita]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Sarker, A., Fahim, S. A., Putul, R. A., Gazi, H., Masum, S. Md., & Molla, Md. A. I. (2025a). ZnO/CdS nanocomposites: Synthesis, characterization and assessment of photocatalytic performance. *Next Nanotechnology*, 8, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100146>

- Sarker, A., Fahim, S. A., Putul, R. A., Gazi, H., Masum, S. Md., & Molla, Md. A. I. (2025b). ZnO/CdS nanocomposites: Synthesis, characterization and assessment of photocatalytic performance. *Next Nanotechnology*, 8, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100146>
- Shi, Y., Wang, X., Feng, C., & Yang, S. (2024). Nano-clay montmorillonite removes tetracycline in water: factors and adsorption mechanism in aquatic environments. *IScience*, 108952. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108952>
- Shiny, D., Usha, D., Anjana, P. M., Smonia Joe Princy, S., Almutairi, M. H., Almutairi, B. O., Bindhu, M. R., & Aminabhavi, T. M. (2024). Tailoring Sb-F doped ZnO nanoparticles for dual-functionality: Photocatalytic and supercapacitor applications. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155720. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155720>
- Slimani, Y., Khan, A., Sivakumar, R., Nawaz, M., & Thakur, A. (2025). Synergistic impact of lanthanum and cerium co-doping ZnO for improved photocatalytic rhodamine B degradation efficiency under UV light. *Journal of Molecular Structure*, 1322, 140366. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140366>
- Song, C. (2023). Enhancing Photocatalytic Degradation of Hydrolyzed Polyacrylamide in Oilfield Wastewater Using BiVO₄/TiO₂ Heterostructure Nano-Photocatalyst Under Visible Light Irradiation. *International Journal of Electrochemical Science*, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100363>
- Sotomayor, F., Cychosz, K., & Thommes, M. (2018). Characterization of Micro/Mesoporous Materials by Physisorption: Concepts and Case Studies. *Acc. Mat. Surf. Res.*, 3, 34–50.
- Sumantrao, S. K., Kariyajjanavar, P., C, Vidyasagar. C., Shridhar, A. H., Ghagane, S. C., Chigari, S. S., Bonageri, G., Ansari, M. Z., & Alsubaie, A. S. (2025). Sunlight-driven GO/ZnO nanocomposite for photocatalytic degradation of Chlorpyrifos insecticide and its biological activities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 115437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115437>
- Suryanarayana, C., & Norton, M. G. (1998). *X-Ray Diffraction a Practical Approach* (1st ed.). Springer Science+Business Media.
- Tang, S., Wang, Z., Yuan, D., Zhang, Y., Qi, J., Rao, Y., Lu, G., Li, B., Wang, K., & Yin, K. (2020). Enhanced photocatalytic performance of BiVO₄ for degradation of methylene blue under

- LED visible light irradiation assisted by peroxy monosulfate. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(3), 2470–2480. <https://doi.org/10.20964/2020.03.09>
- Tapia-Zarate, K. A. (2022). *Respuesta óptica de los componentes inorgánicos TiO₂ utilizados en protectores solares*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Thomas, C.-T. (2021). *Photocatalytic treatment of biological organisms in water using graphene oxide doped TiO₂ and BiVO₄ nanocomposites* [PhD thesis]. Le Mans Université; Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- United Nations. (2023). *United Nations | Peace, dignity and equality on a healthy planet*. United Nations. <https://www.un.org/en/>
- Vázquez-Tapia, I., Salazar-Martínez, T., Acosta-Castro, M., Meléndez-Castolo, K. A., Mahlkecht, J., Cervantes-Avilés, P., Capparelli, M. V., & Mora, A. (2022). Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review. *Chemosphere*, 308, 136285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
- Waghadkar, Y. B., Umarji, G., Kekade, S. S., Rane, S., Chauhan, R., Ashokkumar, M., & Gosavi, S. W. (2024). Synthesis and characterization of indium-doped ZnO nanoparticles by coprecipitation method for highly photo-responsive UV light sensors. *Sensors International*, 5, 100271. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100271>
- Wang, D., Ji, X., & Shi, Z. (2023). Facile synthesis of Cu-complex for visible light photodegradation of organic dyes and sulfonamide antibiotics with added H₂O₂. *Desalination and Water Treatment*, 292, 122–130. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29506>
- Wang, Z., Gong, Z., & Zhao, H. (2024a). Enhancement of photocatalytic degradation performance under visible-light by the construction of heterogeneous structures of BiVO₄-G/FTO worm-like bilayer films. *Journal of Solid State Chemistry*, 339, 124903. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124903>
- Wang, Z., Gong, Z., & Zhao, H. (2024b). Enhancement of photocatalytic degradation performance under visible-light by the construction of heterogeneous structures of BiVO₄-G/FTO worm-like bilayer films. *Journal of Solid State Chemistry*, 339, 124903. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124903>
- Wannakan, K., Khansamrit, K., Senasu, T., & Nanan, S. (2023). Ultrasound-Assisted Synthesis of a ZnO/BiVO₄ S-Scheme Heterojunction Photocatalyst for Degradation of the Reactive

- Red 141 Dye and Oxytetracycline Antibiotic. *ACS Omega*, 8(5), 4835–4852. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07020>
- Widiyandari, H., Pratama, E. D., Parasdila, H., Suryana, R., Arutanti, O., & Astuti, Y. (2023). Synthesis of ZnO-Cdots nanoflower by hydrothermal method for antibacterial agent and dye photodegradation catalyst. *Results in Materials*, 20, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100491>
- Xu, G., Du, M., Zhang, J., Li, T., Guan, Y., & Guo, C. (2022). Facile fabrication of magnetically recyclable Fe₃O₄/BiVO₄/CuS heterojunction photocatalyst for boosting simultaneous Cr(VI) reduction and methylene blue degradation under visible light. *Journal of Alloys and Compounds*, 895, 162631. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162631>
- Yang, L., Yang, T., Hong, C., & Zhao, S. (2025). Enhanced recyclable photocatalysis performance of corn-like ZnO/CuS Z-type heterojunctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 1036, 182110. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182110>
- Yuan, R., Guo, Y., Gurgan, I., Siddique, N., Li, Y.-S., Jang, S., Noh, G. A., & Kim, S. H. (2025). Raman spectroscopy analysis of disordered and amorphous carbon materials: A review of empirical correlations. *Carbon*, 238, 120214. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120214>
- Zarazua Aguilar, Y., Velázquez Herrera, F. D., & Garzón Pérez, A. S. (2023). Las microondas en la síntesis de nanomateriales. *Revista Digital Universitaria*, 24(5). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.5.2>
- Zhang, J., & Xie, L. (2021). Synthesis and sonophotocatalytic activities of ZnO\BiVO₄\Co₃O₄ composites. *Chemical Physics Letters*, 775, 138660. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138660>
- Zhang, W., Hao, B., Gao, Q., Wang, Y., Bian, X., Gong, H., Tian, R., Wei, A., Wang, J., & Liu, Y. (2025). NiOOH-coated BiVO₄ for selective glycerol oxidation: Surface effects and pH-Bias voltage synergy. *Applied Catalysis A: General*, 697, 120205. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2025.120205>
- Zhu, M., Yang, S., Wang, D., Hogan, J., & Sadrzadeh, M. (2024). CTAC-assisted monoclinic BiVO₄ with oxygen defects for efficient photocatalytic performances: A combined experimental and DFT study. *Journal of Alloys and Compounds*, 990, 174404. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174404>

Zhu, R., Yang, S., Yu, N., Zhang, R., & Wu, M. (2025). Raman spectroscopy assisted diagnosis and photodynamic therapy efficacy evaluation of actinic keratosis: Case report. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 104624. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.104624>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Anexo 1

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Desarrollo de fotocatalizadores basados en BiVO_4 para la degradación de fármacos
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Víctor Alfonso Sánchez Fleites
ORCID:	0009-0007-8291-4111
Resumen de la Tesis:	<p>La fotocatalisis heterogénea ha demostrado su eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos tóxicos mediante óxidos semiconductores. La síntesis asistida por microondas es un método muy atractivo para la fabricación de fotocatalizadores, ya que la irradiación de microondas interactúa directamente con las moléculas del disolvente gracias a sus propiedades dieléctricas, lo que permite lograr un calentamiento uniforme y rápido. En este trabajo, se fabricaron materiales de ZnO, BiVO_4 y BiVO_4/ZnO con diferentes proporciones (20BVZO; 20 % de contenido de BiVO_4, 50BVZO; 50 % de contenido de BiVO_4 y 80BVZO; 80 % de contenido de BiVO_4) mediante síntesis asistida por microondas, sin calcinación posterior a alta temperatura. Se confirmó mediante difracción de rayos X y espectroscopía Raman que las estructuras cristalinas obtenidas fueron wurtzita hexagonal para ZnO y scheelita monoclinica para BiVO_4. La técnica de espectroscopía ultravioleta-visible fue realizada para</p>

	<p>determinar la banda prohibida de los materiales. Las propiedades texturales de los materiales fueron investigadas mediante fisorción de nitrógeno. El área superficial específica fue estimada en 8.53 m²/g, 0.72 m²/g, 7.99 m²/g, 5.91 m²/g y 3.59 m²/g para las muestras de ZnO, BiVO₄, 20BVZO, 50BVZO y 80BVZO, respectivamente. Se realizó el análisis morfológico para determinar el tamaño de grano y la distribución de partículas. La actividad fotocatalítica de las muestras fue probada frente a azul de metileno (AM), tetraciclina (TC) y ciprofloxacino (CIP). La muestra 20BVZO reveló un rendimiento fotocatalítico mejorado (64.43 %), en comparación con las muestras de ZnO, BiVO₄, 50BVZO y 80BVZO, para la degradación fotocatalítica de TC.</p>
Palabras claves de la Tesis:	BiVO ₄ /ZnO, fotocatálisis, antibióticos
Referencias citadas:	Página 86 a página 101

Anexo 2



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2025

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Erik Ramirez Morales, Laura Lorena Díaz Flores, María Guadalupe Hernández Cruz, Velumani Subramaniam, Lizeth Rojas Blanco* presented the contribution: **PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF TETRACYCLINE ANTIBIOTIC USING BiVO₄, ZnO AND BiVO₄/ZnO SEMICONDUCTING MATERIALS OBTAINED BY MICROWAVE- ASSISTED SYNTHESIS** as Oral modality, in the *G2. Semiconducting Materials: Synthesis, Characterization and Applications* Symposium at the **33rd International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 17th to 21st, 2025.

Sincerely,

Dra. Cecilia Noguez Garrido
SMMater President



SG2-0016

Anexo 3



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2025

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Dharani Sathwik Ram Panchagnula, Jitendra Choudhary, Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Sreeram Vaddiraju, Guillermo Aguilar, Anish Jantrania, June Wolfe, Velumani Subramaniam, Smriti Shankar, José A. Chávez-Carvayar, Janie McClurkin Moore, Lizeth Rojas Blanco* presented the contribution: **PFAS REMOVAL BY UV-DRIVEN TiO₂-DOPED NANOCOMPOSITES PHOTOCATALYST** as **Oral** modality, in the *G2. Semiconducting Materials: Synthesis, Characterization and Applications* Symposium at the **33rd International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 17th to 21st, 2025.

Sincerely,

Dra. Cecilia Noguez Garrido
SMMater President



SG2-0020

Anexo 4



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2024

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Víctor Alfonso Sánchez Fleites, Erik Ramirez Morales, María Guadalupe Hernández Cruz, Velumani Subramaniam, Lizeth Rojas Blanco* presented the contribution: **CHARACTERIZATION OF BiVO_4 , ZnO AND BiVO_4/ZnO PHOTOCATALYSTS OBTAINED BY MICROWAVE-ASSISTED SYNTHESIS AND THEIR PHOTOCATALYTIC ACTIVITIES FOR DYE DEGRADATION** as Oral modality, in the *G5. Recent Trends in Functional Semiconducting Materials* Symposium at the **32nd International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 18th to 23th, 2024.

Sincerely,

Jesús González Hernández
President

SG5-0038

Anexo 5

COLLEGE OF ENGINEERING

J. MIKE WALKER '66 DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING



Guillermo Aguilar, Ph.D.
Department Head
James and Ada Forsyth Professor
Tel: 979.458.6631, Fax: 979.845.3081
Email: tamu-me-head@tamu.edu

July 1, 2025

To Whom It May Concern,

This letter is to confirm that Mr. Víctor Alfonso Sánchez Fleites served as a Visiting Research Scholar in the Department of Mechanical Engineering at Texas A&M University, under the supervision of Dr. Velumani Subramaniam.

The duration of his appointment was from February 1, 2025, to June 30, 2025. During this period, Mr. Sánchez Fleites actively engaged in research activities within our department, applying his knowledge and skills to gain practical experience in his professional field.

Should you require any additional information, please do not hesitate to contact our office.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'aguilar' with a stylized flourish below it.

Guillermo Aguilar, Ph.D.
Department Head
James and Ada Forsyth Professor

3123 TAMU
College Station, TX 77843-3123

Tel. 979.845.1251 Fax. 979.845.3081
<http://engineering.tamu.edu/mechanical>