UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

"OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO"

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

ANA LILIA CRISANTO BENITEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES

CUNDUACAN, TABASCO, MÉXICO A 25 DE MAYO DEL 2025

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de **Cunduacán, Tabasco**, el día **25** del mes de **mayo** del año **2025**, la que suscribe **Ana Lilia Crisanto Benítez**, egresada del programa de **ingeniería química**, con número de matrícula **211D22177** adscrita a la **División Académica de Ingeniería y Arquitectura**, de la **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco** como autora de la tesis presentada para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Química** y titulada **"OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO"** Dirigida por la **Dra. Lizeth Rojas Blanco** como Directora y el **Dr. Erik Ramírez Morales** como Codirector.

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 del 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.

Cunduacán, Tabasco a 25 de mayo de 2025.

Ana Lilia Crisanto Benítez

Nombre y firma

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/BiVO4 POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	eprints.uanl.mx Internet	229 palabras — 2%
2	oujdi-tal-mout1.skyrock.com Internet	208 palabras — 2%
3	hdl.handle.net Internet	196 palabras — 2%
4	www.coursehero.com Internet	108 palabras — 1%
5	modern-physics.org Internet	96 palabras — 1%
6	repositorio.upct.es Internet	88 palabras — 1%
7	dialnet.unirioja.es Internet	70 palabras — 1%
8	repositorioinstitucional.buap.mx Internet	41 palabras — < 1%
9	ri.ujat.mx Internet	40 palabras — < 1%

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UJAT
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TERMINALES

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0499/2025
FECHA: 20 de mayo de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. ANA LILIA CRISANTO BENITEZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por la DRA. LIZETH ROJAS BLANCO y el DR. ERIK RAMÍREZ MORALES, titulado:

"OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO".

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

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA

DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-400
DRA' DMFM/M´LHC

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: **COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL**
FECHA: 20 DE MAYO DE 2025
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/400/ID400/2025

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

"OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO"

Desarrollado por la C. ANA LILIA CRISANTO BENITEZ de la Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA bajo la modalidad de "**Tesis**", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
Revisor

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
Revisor

DRA. MARCELA DEL CARMEN ARELLANO CORTAZA
Revisor

DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA
Revisor

M.C.I. MOISES MOHENO BARRUETA
Revisor

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
Director de Trabajo Recepcional

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
Co-Director de Trabajo Recepcional

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Cunduacán, Tabasco a 25 de mayo de 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como Autores en la creación de la obra denominada **"OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO".**

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 periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la universidad.

COLABORADORES

Ana Lilia Crisanto Benítez
EGRESADA

Lizeth Rojas Blanco
DIRECTORA

Erik Ramírez Morales
CODIRECTOR

TESTIGOS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Dedicatoria

A la vida, por cada enseñanza, cada reto y cada oportunidad que me ha permitido crecer y llegar hasta aquí.

A mis tres amados hijos Britany Sherlin, Wendy Paola y Juan Pablo, mis más grandes tesoros. Ustedes son mi mayor motivación que impulsa cada uno de mis esfuerzos, recuerdo aquellas noches en las que después de un largo día, aún tenía que sentarme a estudiar mientras ustedes dormían y en mi corazón solo había un pensamiento, hacer de nuestro futuro uno mejor. Que este logro les sirva como prueba de que los sueños se alcanzan con dedicación, amor y perseverancia. Con esta meta cumplida, abro nuevas puertas para nuestro futuro brindándoles un mejor camino lleno de oportunidades.

A mí misma, por no rendirme, por creer en mis capacidades y por demostrarme que todo esfuerzo tiene su recompensa. Hoy puedo decir que cada sacrificio, cada obstáculo superado, y cada momento de duda se convierten ahora en una recompensa que es tanto mía como de los que me acompañan en este viaje.

Con gratitud y amor.

Ana Lilia Crisanto Benítez.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Agradecimientos

Hoy quiero agradecer profundamente a Dios y a la vida por brindarme la oportunidad, la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A la universidad, por brindarme las herramientas, espacios y oportunidades para formarme como profesionista.

A mis directores de tesis, la Dra. Lizeth Rojas Blanco y el Dr. Erik Ramírez Morales, gracias por haber creído en mí capacidad, por su guía, confianza, paciencia y valiosas enseñanzas. Agradezco por impulsar mi crecimiento académico y por acompañarme con firmeza y apoyo en cada etapa del proyecto. Extiendo mi más profundo agradecimiento a la Dra. Lizeth Rojas Blanco, por darme la oportunidad para colaborar con ellos y por motivarme a superar cada obstáculo con firmeza y dedicación.

A los docentes de la carrera de ingeniería química, por todos los conocimientos compartidos, de cada uno de ellos me llevo un grato recuerdo y muchos aprendizajes.

A mis hijos, quienes son mi refugio en todo momento, ellos son mi mayor inspiración para seguir adelante y luchar por mis sueños. Debo decirles gracias por su amor incondicional, paciencia y comprensión durante este camino.

También quiero agradecer a mi familia que me enseñó a forjar mi propio camino, a construir con esfuerzo todo lo que soy hoy, de ellos aprendí a no depender del afecto ajeno para crecer y a buscar en mí misma la fuerza para seguir adelante. Gracias porque en la distancia y el silencio también hubo una lección.

A todos los miembros del laboratorio de semiconductores quienes fueron una pieza clave para poder desarrollar mi proyecto, especialmente a José Mercedes, Víctor, Edicson, Javier, y Francisco, quienes siempre estuvieron dispuestos a apoyarme y a compartir su conocimiento conmigo, agradezco su paciencia, su amabilidad y su compañerismo.

Finalmente, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos mis compañeros y amigos que caminaron conmigo a lo largo de este viaje. Cada paso fue más llevadero gracias a su compañía. En especial, a Jesús Manuel Morales Márquez, Julio Candelero Pulido y a Karen Guadalupe Suárez Díaz, quienes no solo me ofrecieron su apoyo, sino también su amistad. Su presencia convirtió este reto académico en una etapa llena de aprendizajes, sonrisas y momentos que llevaré siempre conmigo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Índice general

Capítulo 1. Introducción 7
1.1. Antecedentes históricos 8
1.2. Justificación 9
1.3. Pregunta de investigación 11
1.4. Hipótesis 11
1.5. Objetivos 11
1.5.1. Objetivo general 11
1.5.2. Objetivos específicos 11
Capítulo 2: Marco teórico 12
2.1 Semiconductores y su clasificación 12
2.1.2. Clasificación de los semiconductores según su origen 13
2.2.1. Semiconductores intrínsecos 13
2.2.2 Semiconductores extrínsecos 13
2.2. Fotocatálisis 15
2.2.1 Fotocatálisis homogénea 16
2.2.2 Fotocatálisis heterogénea 17
2.3 Métodos de síntesis 17
2.3.1 Método Sol-Gel 18
2.4. Propiedades generales del ZnO 19
2.5. Propiedades generales del $BiVO_4$ 20
2.6. Contaminantes en cuerpos de agua 20
2.6.1. Colorantes como contaminantes 21
2.6.2. Clasificación de los colorantes 22
2.6.3. Azul de Metileno (MB) 22
2.7. Métodos de caracterización 23
2.7.1. Difracción de Rayos X (DRX) 24
2.7.3. Espectroscopia ultravioleta-visible UV-VIS (DRS) 26
2.7.4. Espectroscopia Raman (RS) 29
Capítulo 3. Procedimiento experimental 31
3.1. Procedimiento para la síntesis de ZnO mediante el método sol-gel 31
3.2. Procedimiento para la síntesis de $BiVO_4$ mediante el método sol-gel 34

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

3.3. Procedimiento para la obtención del material compuesto $ZnO/BiVO_4$ mediante el método sol-gel 36
3.4. Procedimiento para la evaluación de la actividad fotocatalítica 37
Capítulo 4. Resultados experimentales y discusiones 40
4.1. Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX) 40
4.1.1. Análisis de Difracción de Rayos X (DRX) del ZnO 40
4.1.2. Análisis de Difracción de Rayos X (DRX) del $BiVO_4$ 42
4.1.3. Análisis DRX del acoplamiento $ZnO/BiVO_4$ mediante el método sol-gel 43
4.2. Caracterización por Espectroscopia Raman (RS) 44
4.3. Caracterización mediante espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa (DRS) 46
4.4. Evaluación de la actividad fotocatalítica 52
Capítulo 5. Conclusiones y propuestas 59
5.1. Conclusiones generales 59
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros 60
Referencias 62

índice de tablas

TABLA 1. VALORES NUMÉRICOS OBTENIDOS PARA EL EFECTO DE DEGRADACIÓN PARA CADA UNO DE LOS MATERIALES 57
TABLA 2. VALORES CALCULADOS DE LA BANDA PROHIBIDA PARA LOS FOTOCATALIZADORES 50

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Índice de figuras

Figura 1 Bandas de energía de los materiales conductores, semiconductores y aislantes 12
Figura 2 Semiconductor extrínseco tipo N, aporta electrón extra 14
Figura 3 Semiconductor extrínseco tipo P, con un sitio vacante 15
Figura 4 Proceso de fotocatálisis en una partícula semiconductora 16
Figura 5 Síntesis de nanopartículas semiconductoras por técnica Sol-Gel 18
Figura 6 19
Figura 7 Estructuras cristalinas del BiVO4: a) Monoclínica, b) Tetragonal y c) Ortorrómbica 20
Figura 8 Formula química del colorante Azul de Metileno 23
Figura G Fases comunes que se pueden formar en un material: a) cúbica, b) tetragonal y c) ortorrómbica 24
Figura 10 Interferencia constructiva 25
Figura 11 Interferencia destructiva 25
Figura 12 Técnica de caracterización por DRX 26
Figura 13 Espectrofotómetro, dispositivo utilizado en la técnica de caracterización UV-Vis 27
Figura 14 Dispersión Rayleigh y dispersión Raman 30
Figura 15 Disolución del precursor NaOH en etanol mediante baño ultrasónico y agitación magnética 31
Figura 16 Preparación de las soluciones C y D 32
Figura 17 Control de temperatura y agitación constante durante la síntesis 32
Figura 18 Goteo lento de la solución G en F, manteniendo el control de temperatura y agitación 33
Figura 1G Solución en envejecimiento por 24 horas, secado del material en horno 34
Figura 20 Representación del procedimiento experimental para la obtención de $BiVO_4$ 35
Figura 21 Etapas del proceso de acoplamiento del ZnO/$BiVO_4$ mediante el método sol-gel 36
Figura 22 Solución para la muestra contaminada con MB 37
Figura 23 Ruta del proceso para realizar las pruebas fotocatalíticas 38
Figura 24 Difractogramas de rayos X de nanopartículas de ZnO en su fase Wurtzita 41
Figura 25 Difractogramas de rayos X de nanopartículas de $BiVO_4$ en su fase monocíclica scheelita 42
Figura 26 Representación gráfica del acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ a diversas proporciones 43
Figura 27 Caracterización por espectroscopia Raman de los fotocatalizadores ZnO, $BiVO_4$ y de ZnO/$BiVO_4$ a diferentes proporciones 45
Figura 28 Ajuste lineal para las curvas de ZnO y $BiVO_4$ 48
Figura 2G Ajuste lineal para las curvas de ZnO/$BiVO_4$ a (70:30 y 30:70) 49
Figura 30 Ajuste lineal para la curva de ZnO/$BiVO_4$ (50:50) 50
Figura 31 Espectros de reflectancia difusa en función de la energía (eV) para diferentes muestras 51
Figura 32 Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador ZnO 52
Figura 33 Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador $BiVO_4$ y ZnO/$BiVO_4$ (50:50) 53
Figura 34 Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador ZnO/$BiVO_4$ (30:70) y (70:30) 54
Figura 35 Efectos de degradación del Azul de Metileno con los diferentes fotocatalizadores 55
Figura 36 Datos experimentales obtenidos de concentración (C) con respecto al tiempo (t) para cada una de las muestras con los diferentes fotocatalizadores 56

Universidad Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 1. Introducción

La contaminación es un problema ambiental que hoy en día tiene al mundo consternado por la gran cantidad de elementos tóxicos que se encuentran en el agua, aire y suelo (Luo et al., 2024). Estos contaminantes tóxicos representan una amenaza tanto para el medio ambiente, la salud humana, la calidad de vida y los ecosistemas. Entre las principales fuentes de contaminación se incluyen actividades industriales, agrícolas, domésticas y urbanas (du Plessis, 2022; Lin et al., 2022).

El agua es un recurso indispensable para la supervivencia del ecosistema, debido a que no hay organismo que pueda sobrevivir sin ella. En la actualidad un alto porcentaje del agua en el mundo se encuentra dominado por las altas concentraciones de contaminación, lo que impide el abastecimiento adecuado de este recurso de vital importancia, afectando no solo a los seres humanos, sino también a la flora y fauna acuáticas (du Plessis, 2022; Lin et al., 2022). La creciente industrialización y urbanización tiene como consecuencia la expansión de agentes químicos en los cuerpos de agua, como ríos, lagos y océanos. La contaminación en el agua puede darse por distintos medios, puede ser por la descarga de desechos industriales, la afluencia de agua agrícola, las aguas residuales domésticas y los vertidos de petróleo (Dippong et al., 2025).

Existe una gran cantidad de contaminantes que se encuentran el agua causando daños irreversibles al ecosistema, entre los más comunes podemos encontrar los metales pesados, los nutrientes como nitratos y fosfatos, los patógenos y los compuestos orgánicos. Los metales pesados suelen ser utilizados en múltiples aplicaciones industriales, domésticas, agrícolas, médicas y tecnológicas. Esta multiplicidad a promovido la distribución de estos metales en el medio ambiente, contribuyendo significativamente al riesgo de entrada en los cuerpos de agua (Järup, 2003; Tchounwou et al., 2012). Una cantidad excesiva de nutrientes es causa de eutrofización, tal proceso reduce el oxígeno en el agua dañando de esta forma a la biota acuática (Smith et al., 1999). Los patógenos, incluyendo bacterias y virus, representan un riesgo significativo para la salud humana ya que propician epidemias de enfermedades (Ly, 2021). Los compuestos orgánicos, particularmente los colorantes, son una categoría de contaminantes que ha recibido una atención creciente debido a su persistencia y toxicidad (Forgacs et al., 2004).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Los colorantes son una especie de contaminantes orgánicos complejos con una gran diversidad de estructuras químicas, estos colorantes generan una gran preocupación debido a las cantidades excesivas que suelen desecharse en los cuerpos hídricos, se estima que alrededor de 200 toneladas de estos colorantes son desechados por la industria textil cada año sin un tratamiento adecuado, esto como producto de un ineficiente proceso de teñido. Recientes investigaciones han estimado el uso de más de 10,000 tintes y pigmentos en la industria, además de la producción anual de más de 0,7 millones de toneladas de tintes sintéticos a nivel global, esto los hace difíciles de eliminar por métodos convencionales de tratamiento de aguas debido a su alta solubilidad y estabilidad química (Forgacs et al., 2004; Robinson et al., 2001;

Actualmente se considera la industria textil como la principal fuente de colorantes sintéticos desechados en el medio acuático, se estima que alrededor de 1.5 millones de litros de agua por día son severamente afectados por estos pigmentos, típicamente se suelen encontrar restos de triarilmetanos, xantenos, fenotiazinas, antraquinona, azufrados, índigos, nitrados y azoicos. Dentro de estos grupos se incluyen el azul de metileno, la malaquita verde, el violeta cristal, el verde brillante y la rodamina B, entre otros (Belpaire et al., 2015; dos Santos et al., 2007; Hanh et al., 2024; Nidheesh et al., 2018).

1.1. Antecedentes históricos

En el año de 1985 Mantsunaga y colaboradores dieron a conocer que había una forma de eliminar microorganismos que se encontraban presentes en el agua, con el uso de un semiconductor y utilizando la radiación con luz UV artificial, se hicieron pruebas en periodos de 30 a 120 minutos y se encontró que la irradiación de un semiconductor suspendido provoca la excitación de un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción. Dando lugar a un electrón excitado y un hueco, generando radicales HO+ junto con otras especies reactivas de oxígeno las cuales tienen la cualidad de atacar a las especies que contaminan el agua, Dando así lugar a los fotocatalizadores (Apella et al., 2007).

En la actualidad, los materiales fotocatalizadores se utilizan para erradicar contaminantes que se encuentran en el agua residual, en diversas instituciones académicas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

a lo largo del mundo se están desarrollando nuevos materiales con el fin de mejorar sus características y con ello su efectividad. Se han reportado estudios realizados en China, Alemania, Colombia y Estados Unidos, donde se ha demostrado la efectividad de estos fotocatalizadores al realizar pruebas a nivel laboratorio de distintos materiales, para estas pruebas se han utilizado distintos contaminantes en el agua y la efectividad a variado dependiendo del contaminante utilizado (Aznate et al., 2013; Ismael, 2022; Khanh Huyen et al., 2021).

En México, múltiples instituciones de educación superior ya están abordando estos temas de vital importancia, entre ellos se encuentra la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN). En el contexto estatal, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) ya se encuentra involucrada con investigaciones ambientales, tales como son los fotocatalizadores, sin embargo, aún se necesita trabajar arduamente en la investigación y mejora de estos materiales que son de vital importancia para mantener nuestro ecosistema en óptimas condiciones (Olivia Gabriela 2020; García José M, 2021; Martínez, Rojas et al., 2015; Pérez Jiménez, 2020).

Una de las principales ventajas de los fotocatalizadores basados en ZnO/$BiVO_4$ se encuentran su alta eficiencia para degradar contaminantes orgánicos, el aprovechamiento de energías renovables, como la luz solar ya que esto disminuye notablemente los costos de tratamiento en el agua y también se incluye como ventaja la posibilidad de reutilizar los materiales. También se tienen desventajas ya que la inestabilidad del ZnO en medios acuosos no es favorable y los altos costos al producir estos materiales pueden limitar la escalabilidad y el acceso a materiales de alta calidad (Deebasree et al., 2018; López Guemez et al., 2024).

1.2. Justificación

En el contexto actual, la fotocatálisis ha surgido como una opción eficiente para la degradación de contaminantes y diversos desafíos ambientales, se ha demostrado que es una tecnología eficaz, valiosa y adaptable además de tener un alto potencial al superar otras técnicas ya empleadas, como las técnicas de absorción, la catálisis térmica y la catálisis de ruptura anódica. Siendo la fotocatálisis un proceso que aprovecha fuentes de energías renovables y no requiere de temperaturas muy altas, lo que la hace más sostenible

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

con el medio ambiente al no generar subproductos peligrosos (Laurence M. Peter, 2016; D. Schneider et al., 2016); (Hu et al., 2019).

Si bien existe una gran diversidad de fotocatalizadores, es esencial continuar trabajando arduamente en mejorar los materiales fotocatalíticos, buscando métodos sencillos que reduzcan el costo y aumenten la eficiencia (Hu et al., 2019). La investigación continua permitirá el desarrollo de nuevos fotocatalizadores que aprovechen de una forma óptima las energías renovables, con el fin de combatir la saturación de contaminantes en los recursos hídricos (Kubiak et al., 2025; Li et al., 2024).

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor que tiene una amplia aplicación en diversos materiales como son los plásticos, cerámicas, vidrios, cementos, pinturas, adhesivos y selladores. El ZnO ha destacado como un material fotocatalítico altamente eficiente, gracias a sus propiedades ópticas y electrónicas favorables. El uso de ZnO como material fotocatalítico en la degradación de contaminantes orgánicos es muy prometedor para degradar eficientemente compuestos orgánicos presentes en el agua (Chang et al., 2020), (Rasheed et al., 2025). Existen estudios que han revelado que el ZnO ha degradado eficazmente compuestos orgánicos entre ellos el 4-nitrofenol bajo la irradiación de luz solar. Entre la gran cantidad de estudios realizados, el ZnO ha demostrado degradar agentes colorantes hasta en un 90% de una manera exitosa. Entre las ventajas que ofrece, está su bajo costo, buena estabilidad química y especialmente respeto con el medio ambiente ya que es un material que no es toxico (Chang et al., 2020; Naknonhan et al., 2025; Rasheed et al., 2025; Samadi et al., 2019a; Sun et al., 2025).

Entre los semiconductores conocidos por ser buenos fotocatalizadores se encuentra el vanadato de bismuto ($BiVO_4$) debido a sus características físicas y químicas únicas y su naturaleza no tóxica, este material ha demostrado ser un excelente fotocatalizador utilizando la luz visible. Diversos estudios donde se utilizó $BiVO_4$ como fotocatalizador han evidenciado su efectividad en la degradación de diferentes contaminantes (Kamble et al., 2023; Khanh Huyen et al., 2021; Obaid Qamar et al., 2024a, 2024b; Wang et al., 2025).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

1.3. Pregunta de investigación

¿En qué medida la combinación de ZnO y $BiVO_4$ puede mejorar la actividad fotocatalítica al ser sintetizado por el método sol-gel, para la obtención de materiales fotocatalíticos de ZnO/$BiVO_4$ y aplicarlo en la degradación de Azul de Metileno?

1.4. Hipótesis

La combinación de ZnO y $BiVO_4$ mediante el método sol-gel resultará en un fotocatalizador con una mayor eficiencia en la degradación de Azul de Metileno, en comparación con los fotocatalizadores individuales de ZnO y $BiVO_4$, debido a una mayor área de superficie y una mejor interacción entre los materiales.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Sintetizar materiales a base de ZnO y $BiVO_4$ mediante el método sol-gel para evaluar su eficiencia como fotocatalizadores, en la degradación de Azul de Metileno presente en el agua.

1.5.2. Objetivos específicos

- Sintetizar ZnO, $BiVO_4$ y ZnO/$BiVO_4$ mediante el método sol-gel.
- Caracterizar los polvos de ZnO, $BiVO_4$ y ZnO/$BiVO_4$ mediante Difracción de rayos X (DRX), Espectroscopia de reflectancia difusa UV-Vis (DRS) y Espectroscopia Raman (RS).
- Determinar la actividad fotocatalítica de los semiconductores de ZnO, $BiVO_4$ y ZnO/$BiVO_4$ usando Azul de Metileno como contaminante orgánico.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

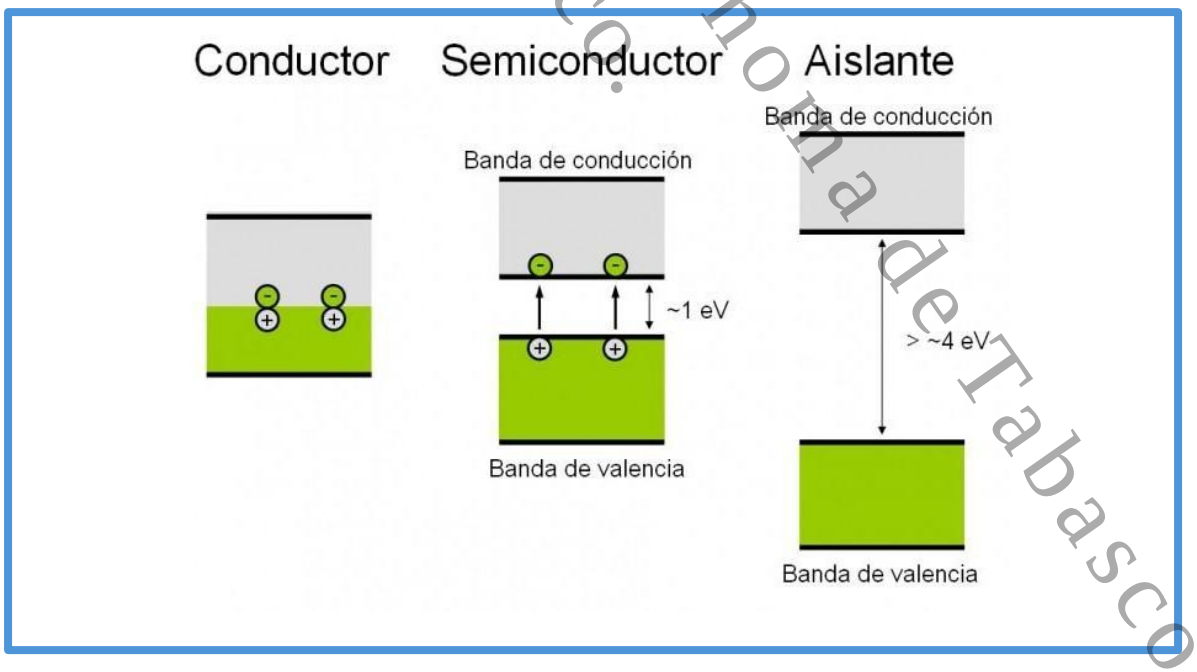
Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Semiconductores y su clasificación

En el mundo existen distintos materiales conocidos por su capacidad de conducir electrones, entre ellos contamos con los semiconductores, elementos que podemos encontrar en la naturaleza, su principal característica es tener un comportamiento de aislante bajo algunas condiciones, esto pasa a temperaturas bajas menores a 25°C, cuando aumenta su temperatura estos materiales se comportan como un conductor eléctrico, por lo que se define a estos materiales con una capacidad de conducción eléctrica intermedia, es decir no son excelentes conductores como los metales, ni tan ineficientes como los aislantes (C. Ferrer Roca, 2007; Rocha Juan C , 2020; R. López Ahumada, 2002). A continuación, se presenta una figura que ilustra estos materiales (figura 1), en la cual se puede apreciar claramente la distancia entre la banda de conducción y la banda de valencia separada por una brecha de energía (Marder, 2010).

Figura 1

Bandas de energía de los materiales conductores, semiconductores y aislantes



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Los semiconductores se pueden clasificar de diferentes formas, puede ser de acuerdo con su composición química, donde se trata a los semiconductores dependiendo de cómo están formados, los elementales son aquellos que contienen un solo elemento como pudiera ser el Silicio (Si) o el Germanio (Ge), mientras que los compuestos están formados por más de dos elementos, entre ellos se encuentra el Arseniuro de Galio (GaAs). Entre las formas de clasificar los semiconductores se puede dependiendo a su aplicación, para esta forma se encuentran los semiconductores electrónicos, ópticos y termoeléctricos. Otra forma de clasificarlos es dependiendo de su origen (Rocha Juan C, 2020).

2.1.2. Clasificación de los semiconductores según su origen

2.2.1. Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor en estado puro sin ningún tipo de impureza añadida se considera un semiconductor intrínseco. En su estado natural, los electrones están ligados a los átomos, lo que limita su conductividad eléctrica. Esto significa que el número de electrones que se mueven a la banda de conducción siempre es igual al número de agujeros dejados detrás en la banda de valencia. En estos materiales se utiliza calor para aumentar la energía de los electrones, esto los ayuda a saltar a un nivel de energía más alto dejando huecos en sus posiciones originales. Hacer esto permite el flujo de corriente eléctrica, sin embargo, su capacidad de conducción sigue siendo muy baja (James Newell, 2011).

2.2.2. Semiconductores extrínsecos

Se considera un semiconductor extrínseco aquel material semiconductor que ha sido dopado con un elemento contaminante (impurezas) generalmente del grupo III o V de la tabla periódica, en este tipo de semiconductores se introducen impurezas con el fin de alterar sus propiedades eléctricas, reduciendo la resistividad de este. Existen dos tipos de semiconductores extrínsecos (Rocha Juan, 2020).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

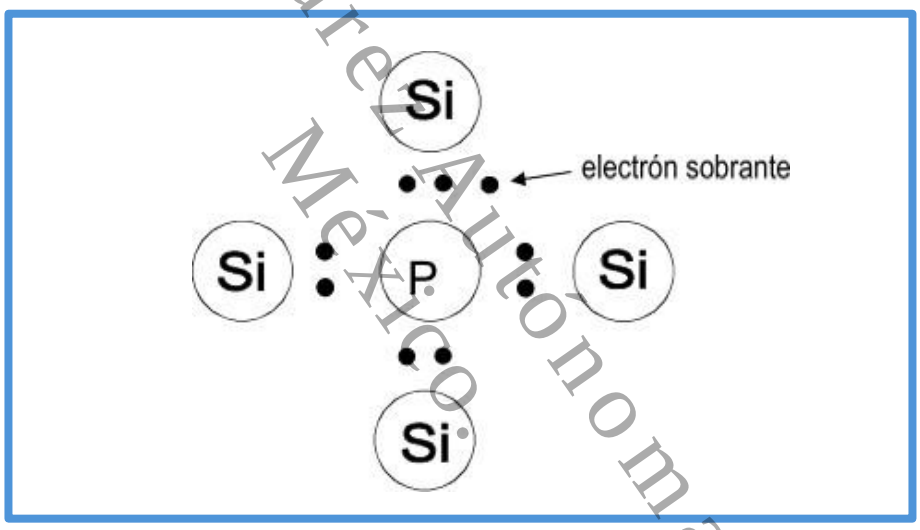
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

2.2.2.1. Semiconductor extrínseco (Dopado tipo N)

Se conoce como dopante tipo N cuando se aporta electrones extra al semiconductor (figura 2), estos electrones pueden moverse libremente por el material ya que no están ligados directamente al núcleo del átomo. A estos materiales se les conoce como donador y suelen ser dopados por impurezas del grupo V (P, As, Sb). Para este tipo de semiconductores se completan los cuatro enlaces covalentes con cuatro átomos vecinos, de este modo sobra un electrón débilmente ligado.

Figura 2

Semiconductor extrínseco tipo N, aporta electrón extra

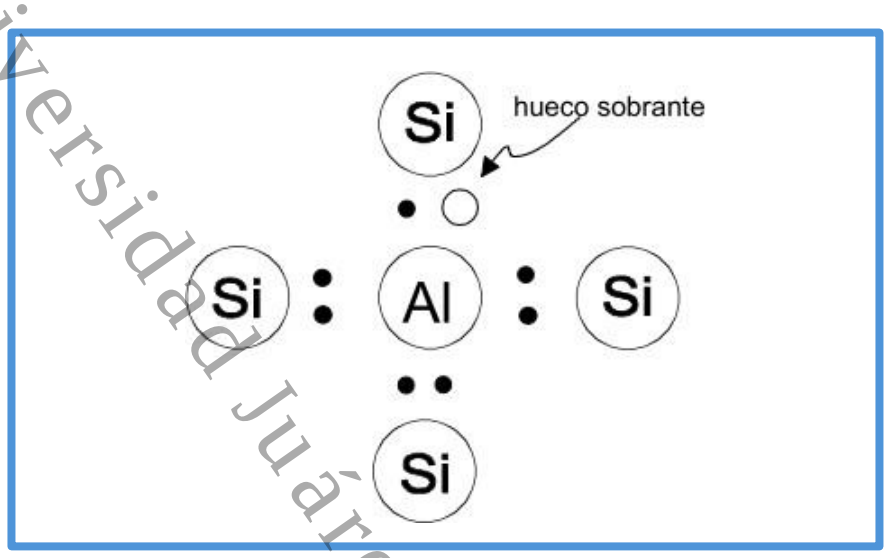


2.2.2.2. Semiconductor extrínseco (Dopado tipo P)

Este tipo de materiales se conoce como aceptores, suelen ser dopados por contaminantes del tipo III (B, Al, Ga, In), en estos materiales los átomos completan únicamente tres enlaces covalentes por lo que uno queda incompleto (figura 3), el cual puede ser completado por un electrón perteneciente a otro átomo, aportando una pequeña cantidad de energía, cuando esto sucede se genera un hueco, lo que hace que el material tenga un exceso de huecos (C. Ferrer Roca, 2007; Ing. Rocha Juan, 2020; R. López Ahumada, 2002).

Figura 3

Semiconductor extrínseco tipo P, con un sitio vacante



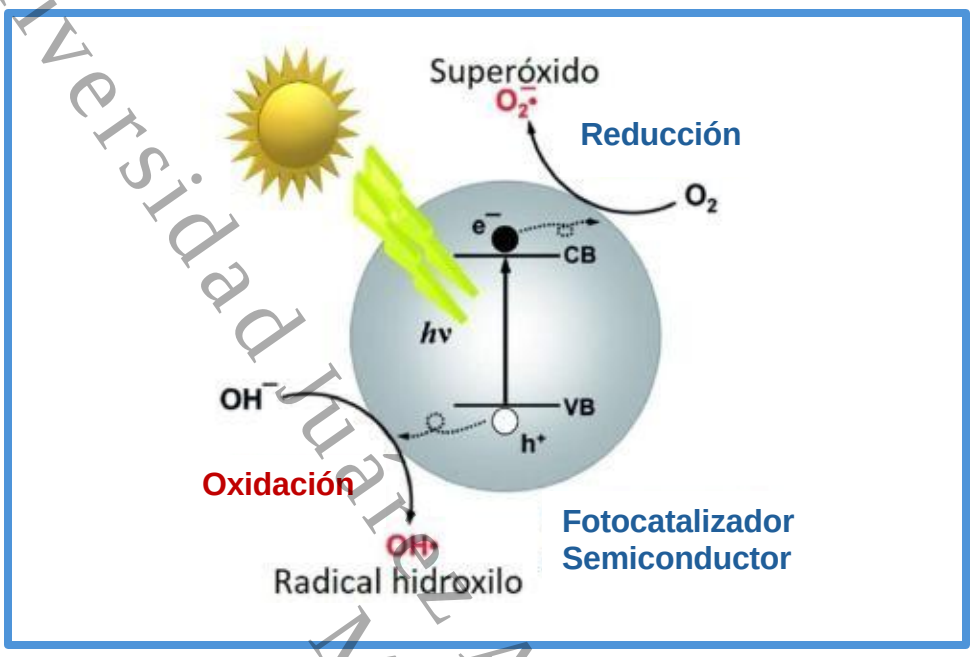
2.2. Fotocatálisis

Se considera a la fotocatálisis como un proceso químico, que ha cobrado relevancia en los últimos años gracias a la efectividad que ha demostrado en la purificación ambiental, en este proceso se utiliza un fotocatalizador el cual es activado por energía luminosa, iniciando reacciones que ayudan en la degradación de varios contaminantes en una diversidad de medios (Sayra L, 2010). La fotocatálisis emplea el uso de semiconductores que tiene la capacidad de absorber energía luminosa (figura 4), gracias a sus características pueden generar pares de electrón-hueco. La característica principal de estos pares de electrón-hueco es que tiene la capacidad de reaccionar con sustancias del entorno en el que se encuentran, pudiera ser el agua o el oxígeno, lo que origina la formación de radicales libres altamente reactivos, como los radicales hidroxilos (+OH). Estas especies reactivas poseen la capacidad de oxidar y descomponer contaminantes orgánicos, eliminar microorganismos además de ello tienen la particularidad de transformar compuestos tóxicos en sustancias inocuas (Garcés Giraldo et al., 2004; Leyre marzo, 2018).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 4

Proceso de fotocatálisis en una partícula semiconductora



2.2.1 Fotocatálisis homogénea

Los procesos fotocatalíticos homogéneos (reacciones Foto-Fenton) se presentan cuando el catalizador y los reactivos se encuentran en la misma fase, suele ocurrir en solución acuosa. El peróxido de hidrogeno y iones ferrosos contribuyen a una fuente significativa de radicales hidroxilos, este compuesto químico es considerado un fuerte oxidante de sustancias orgánicas, cuando las velocidades de degradación aumentan al completar el proceso de radiación UV/Visible ocurre el proceso Foto-Fenton. Este proceso se considera catalítico ya que el ion Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} en la reacción de Fenton. Después de eso, por medio de radiación, Fe^{3+} se reduce nuevamente a Fe^{2+}, en ambas reacciones se generan radicales hidroxilos.

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + OH \qquad \textbf{(Ecuación 1)}$$

$$Fe^{3+} + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + OH \qquad \textbf{(Ecuación 2)}$$

Este tipo de fotocatálisis es altamente eficiente considerando que el reactivo y el catalizador entran en contacto directo, lo que permite mejorar la velocidad de reacción, sin

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

embargo, su aplicación a gran escala está limitada debido a la dificultad para recuperar el catalizador una vez utilizado (Aznate et al., n.d.; Casillas Gabriela, 2020; López E. Sánches V., 2019).

2.2.2 Fotocatálisis heterogénea

En la fotocatálisis heterogénea, el catalizador y los reactivos se encuentran en fases distintas, usualmente con un catalizador sólido y reactivos en fase líquida o gaseosa. La fotocatálisis heterogénea es un proceso en el cual una reacción química se acelera mediante la acción de un catalizador sólido. Este catalizador, al ser excitado electrónicamente por la incidencia de radiación luminosa, genera un compuesto energético que facilita la reacción. En otras palabras, la presencia de un catalizador sólido permite que una reacción química se lleve a cabo más rápidamente cuando el catalizador es activado por luz, aumentando así la eficiencia del proceso (Belousov, 2024; Bhabal C Shimpi, 2024; Casillas Gabriela, 2020). Este proceso consiste en aprovechar la energía solar en la región UV y visible para llevar a cabo reacciones químicas útiles mediante el empleo de materiales fotocatalíticos adecuados.

Los fotocatalizadores poseen un amplio potencial para absorber la luz, lo que hace posible la identificación de contaminantes a través de diferentes técnicas. Estos materiales aprovechan la energía solar y la convierten en energía química, esto nos permite degradar ciertos contaminantes (Ma et al., 2024). Se ha investigado ampliamente a los materiales semiconductores para su uso como fotocatalizadores (Ismael, 2022).

2.3 Métodos de síntesis

La obtención de nanomateriales implica el uso de diversas técnicas de síntesis adaptadas a las propiedades deseadas, buscando generalmente métodos que consuman poca energía y sean amigables con el medio ambiente. Entre las técnicas más destacadas están la hidrotermal, coprecipitación, el método sol-gel y la síntesis asistida por microondas (Debalke et al., 2024). Técnicas químicas como el estado sólido, sol-gel es particularmente popular por su versatilidad, permitiendo la creación de una amplia variedad de nanomateriales con un control preciso sobre sus características (Mai et al., 2023).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

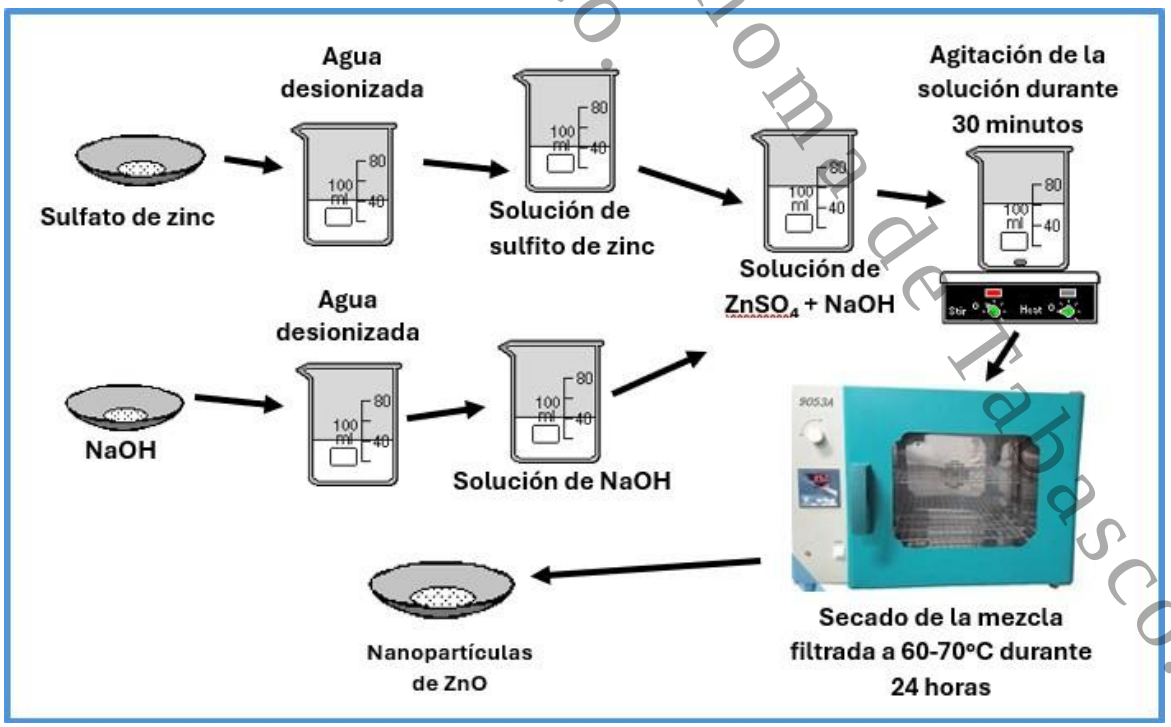
2.3.1. Método Sol-Gel

El método sol-gel presenta ventajas a comparación con otros procesos. Entre ellas la temperatura de procesamiento, ya que se utilizan a temperaturas muy bajas. Los materiales obtenidos presentan alta pureza y un buen control de tamaño y forma de las partículas (Deebasree et al., 2018b).

El proceso sol-gel es un método sencillo y económico que permite un control preciso de las condiciones del proceso (figura 5). En este método se emplea comúnmente un alcóxido como percusor, que consiste en un grupo orgánico unido a un átomo metálico. Los alcóxidos son preferidos porque reaccionan fácilmente con agua. Esta reacción, denominada hidrólisis, implica la combinación de un ion hidroxilo con un átomo de metal. Luego sigue la condensación en la que se elimina en moléculas de agua o alcohol para formar una red de metal-oxígeno-metal (M-O-M); Después, el gel resultante pasa por una etapa de envejecimiento o maduración en la que la red de gel se fortalece y se contrae dentro de la solución. Finalmente, el secado elimina el líquido o disolvente restante, dejando el material sólido (Belousov, 2024; Brinker C Scherer, 2013).

Figura 5

Síntesis de nanopartículas semiconductoras por técnica Sol-Gel

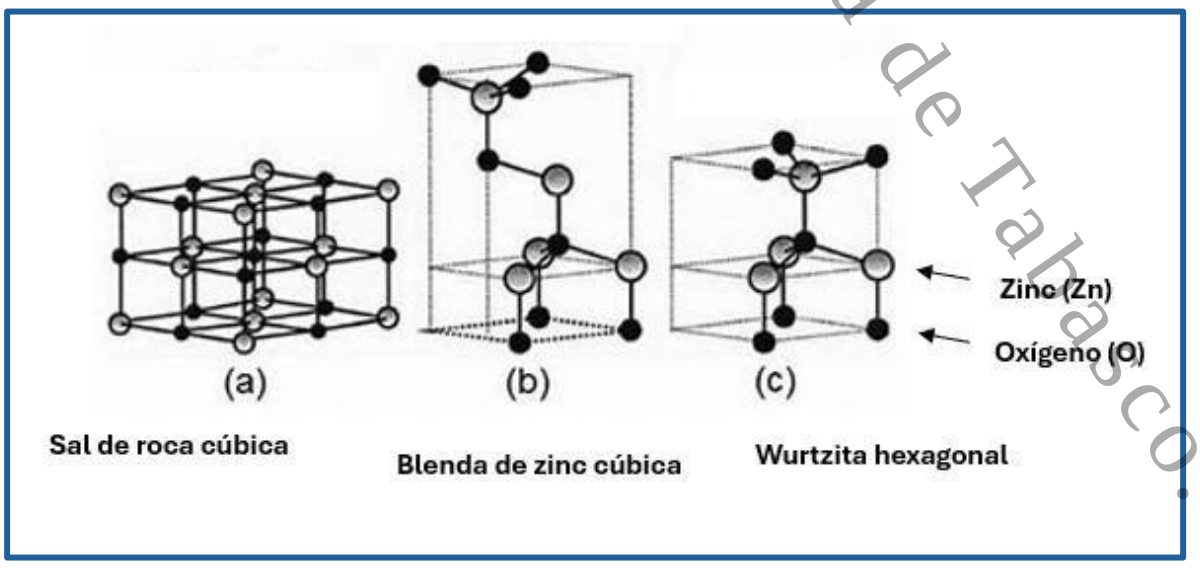


2.4. Propiedades generales del ZnO

El ZnO se distingue por tener un alto punto de fusión y conductividad térmica, grandes constantes elásticas y una gran banda prohibida de alrededor de 3.3 electrón voltios, además de ello también exhibe propiedades multifuncionales, incluidas capacidades antibacterianas. El ZnO es un semiconductor inorgánico que puede clasificarse como tipo n, tiene una amplia gama de aplicaciones, entre ellos los diodos emisores de luz, celdas solares y procesos fotocatalíticos (Singh, Gade, Dakeshwar V., et al., 2024; Van Duy et al., 2019). Puede ser dopado con impurezas para aumentar la cantidad de portadores de carga negativa, electrones, por lo tanto, mejorar su conductividad eléctrica (Hanh et al., 2024b). Es transparente en el espectro visible y ultravioleta, lo que, lo hace útil en dispositivos ópticos y pantallas. Puede ser dopado para tener alta conductividad eléctrica, esto lo hace adecuado para dispositivos electrónicos como diodos emisores de luz led y transmisiones, además es estable en altas temperaturas y tiene una baja toxicidad comparado con otros materiales semiconductores como el arseniuro de Galio, el ZnO es menos tóxico y más ecológico. El ZnO (figura 6, a), b), c).) se presenta en diferentes estructuras cristalinas como, la wurtzita, la blenda de zinc y la sal de roca, de las cuales la fase wurtzita es la más estable en condiciones ambientales (Askeland C Wright, 2016; Samadi et al., 2019b).

Figura 6

Estructuras cristalinas del ZnO: a) Sal de roca cúbica, b) Blenda de zinc cúbica y c) Wurtzita hexagonal.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

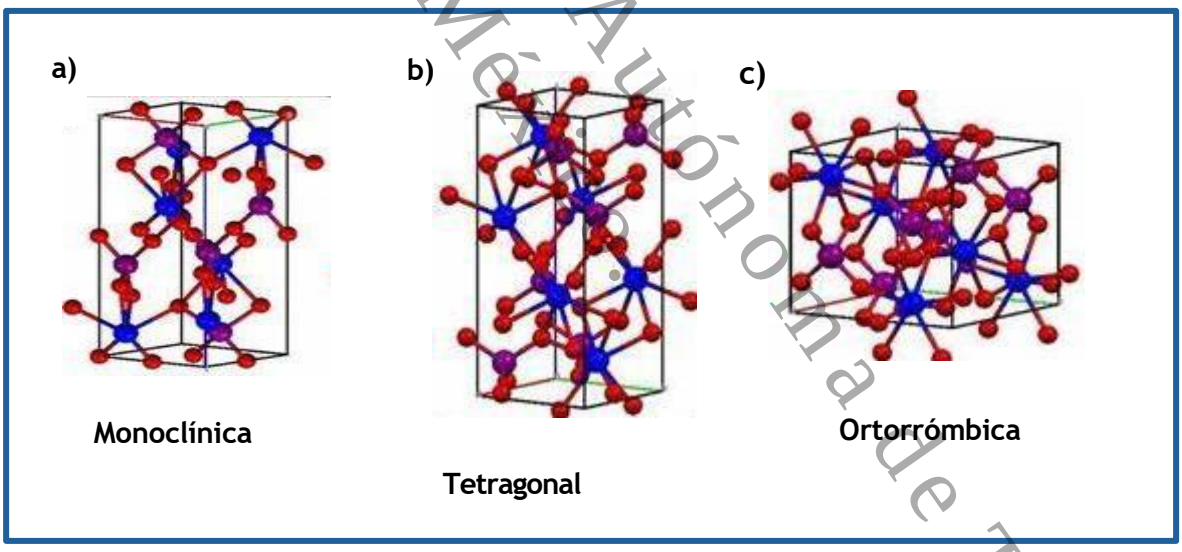
2.5. Propiedades generales del $BiVO_4$

El $BiVO_4$ es un semiconductor tipo n con absorción en la región visible del espectro electromagnético (Eg = 2.4 eV), El $BiVO_4$ es considerado como un material con pobres propiedades de transferencia de carga, debido a la alta tasa de recombinación de las cargas causada por la mezcla de los orbitales Bi 6s con los orbitales O 2p de la banda de valencia y los orbitales V 3d de la banda de conducción (García Pérez, 2011).

El $BiVO_4$ presenta tres estructuras cristalinas diferentes (figura 7, a), b), c): una monoclínica tipo esquelita (m-$BiVO_4$), una tetragonal tipo zircón (tz-$BiVO_4$) y una tetragonal tipo esquelita (ts-$BiVO_4$). Para aplicaciones fotocatalíticas la fase cristalina monoclínica tipo esquelita ha llamado poderosamente la atención de diversos grupos de investigación, dada la buena actividad mostrada (García Pérez et al., 2011).

Figura 7

Estructuras cristalinas del $BiVO_4$: a) Monoclínica, b) Tetragonal y c) Ortorrómbica.



2.6. Contaminantes en cuerpos de agua

La contaminación en cuerpos acuáticos puede darse por distintas sustancias y suele ser un campo de estudio altamente abordado en la actualidad, debido a que tiene un fuerte impacto negativo en la calidad y salud de los ecosistemas y seres humanos, entre los

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México

contaminantes que podemos encontrar en el agua existentes, se consideran tres principales, contaminantes orgánicos, contaminantes inorgánicos y contaminantes biológicos.

Los contaminantes orgánicos están compuestos principalmente por carbono en su estructura y son de origen natural o sintéticos, provienen de diversas actividades como la industria, agrícola o doméstica. Entre estos contaminantes encontramos hidrocarburos, aceites, detergentes, productos químicos domésticos, pesticidas, herbicidas y materia orgánica en descomposición. Por otro lado, cuando hablamos de contaminantes inorgánicos, se trata de sustancias minerales que no contienen carbono en su composición estos desechos provienen generalmente de desechos industriales, minería o escorrentías agrícolas, dentro de esta clasificación se tienen los metales pesados, nitratos, fosfatos, sales y minerales. Mientras al abordar el tema de contaminantes biológicos se considera a los microorganismos patógenos los cuales causan enfermedades tanto en animales como en seres humanos, se trata entonces de bacterias, virus, paracitos, hongos y algas tóxicas, las cuales se suelen generar en aguas residuales, por desechos de animales o escorrentía agrícola (Apella et al., 2007; Armijo Elena et al., 2012).

2.6.1. Colorantes como contaminantes

Existen diversas formas de fabricar colorantes, puede ser a partir de fuentes vegetales, minerales o animales. Los colorantes son un material utilizado para colorear, estos materiales suelen ser solubles en agua y aportan color a partir de reacciones físicas y/o químicas, generan el color al absorber de manera específica ciertas frecuencias del espectro visible debido a sus propiedades. Estos materiales pueden ser orgánicos o inorgánicos, Los colorantes generalmente se utilizan para teñir papel, tejidos, cuero, madera o alimentos, además de su uso en productos derivados del petróleo, como ceras y aceites lubricantes, también se emplea en el análisis de muestras biológicas en laboratorios, entre muchas otras aplicaciones.

Los colorantes suelen utilizarse en la industria alimentaria con el fin de potenciar los colores en los alimentos para hacerlos más atractivos para el consumidor, en la industria textil los colorantes más utilizados son los sintéticos, de igual forma un alto contenido de colorantes suelen ser reactivos, Esto indica la presencia de un enlace éter entre el colorante

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

y el tejido, lo que prolonga la permanencia del color. Entre otras aplicaciones, los colorantes suelen utilizarse en la industria cosmética, sus usos en esta industria suelen ser en tintes para el cabello, maquillajes, champús, acondicionadores, labiales, mascarillas para pestañas cremas y lociones entre muchos otros productos. Entre los colorantes más utilizados en la industria y encontrados en los cuerpos de agua destacan el índigo, remazo amarillo y azul de metileno. (De et al., 2022; Ogugbue C Sawidis, 2011).

2.6.2. Clasificación de los colorantes

Existen diferentes formas de clasificar los colorantes, una de ellas puede ser según la procedencia del color.

Con esta forma de clasificación, podemos subdividir los colorantes naturales y los colorantes sintéticos. Los colorantes orgánicos se obtienen a partir de plantas, animales o minerales de la naturaleza, estos se dividen a su vez en orgánicos e inorgánicos. Los colorantes orgánicos son de tonos vivos y brillantes, pero su estabilidad es baja y la duración es corta.

Por otro lado, los colorantes inorgánicos, al no disolverse en agua, actúan como pigmentos. Para su obtención, los minerales que los componen se muelen y se combinan con un agente dispersante. Aunque su naturaleza insoluble permite su uso como pigmentos, también pueden emplearse como colorantes si se someten a un tratamiento químico que los haga solubles (Correoso Campillo, 2023).

2.6.3. Azul de Metileno (MB)

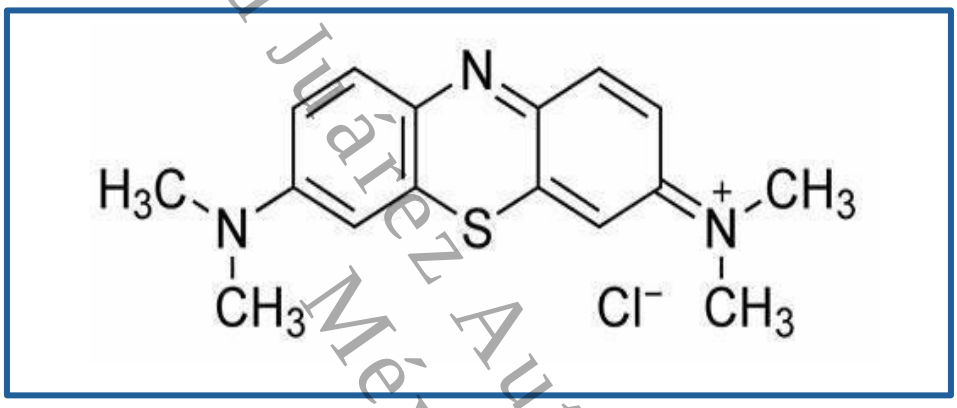
Entre las grandes cantidades de colorantes existentes, el Azul de Metileno (MB), también llamado como Cloruro de tetrametiltionina o Cloruro de fenazationio es un compuesto heterocíclico con formula química $C_{16}H_{18}N_3SCl$ (figura 8), este colorante es frecuentemente utilizado en tintes para cabello, industria farmacéutica, por textiles y plásticos. También se utiliza en la aplicación de color en papel, algodones, lanas y pieles de animales. Este colorante posee características fototóxicas, debido a que produce oxígeno en estado activo, por estas razones es considerado como un carcinógeno exógeno por oxidación del ADN. La presencia de MB en el agua en concentraciones que superan los

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

niveles en concentraciones que superan los niveles permitidos representa un riesgo significativo, afectando no solo los ecosistemas acuáticos, sino que también puede tener consecuencias adversas para la salud humana. Entre los efectos negativos en las personas se incluyen presión arterial alta, irritación en la piel (como enrojecimiento y picor), así como irritación en la garganta, boca y estómago. Además, la exposición al MB puede provocar síntomas como náuseas, dolor de cabeza y fiebre, entre otros (De et al., 2022; Salazar et al., 2022).

Figura 8

Formula química del colorante Azul de Metileno



2.7. Métodos de caracterización

Conocer las propiedades tanto físicas como químicas de los nanomateriales a menudo suele ser un desafío analítico, el cual se enfrenta debido al tamaño tan pequeño de estos materiales ya que las dimensiones pueden oscilar entre 1-100 nm estos materiales cuentan con una gran diversidad de propiedades. La caracterización adecuada y confiable es primordial para garantizar que los materiales obtenidos cumplen con la seguridad y calidad que se esperaba, para ello técnicas como DRX, RS y DRS cumplen con los requerimientos necesarios para llevar a cabo una caracterización adecuada (Quevedo et al., 2021).

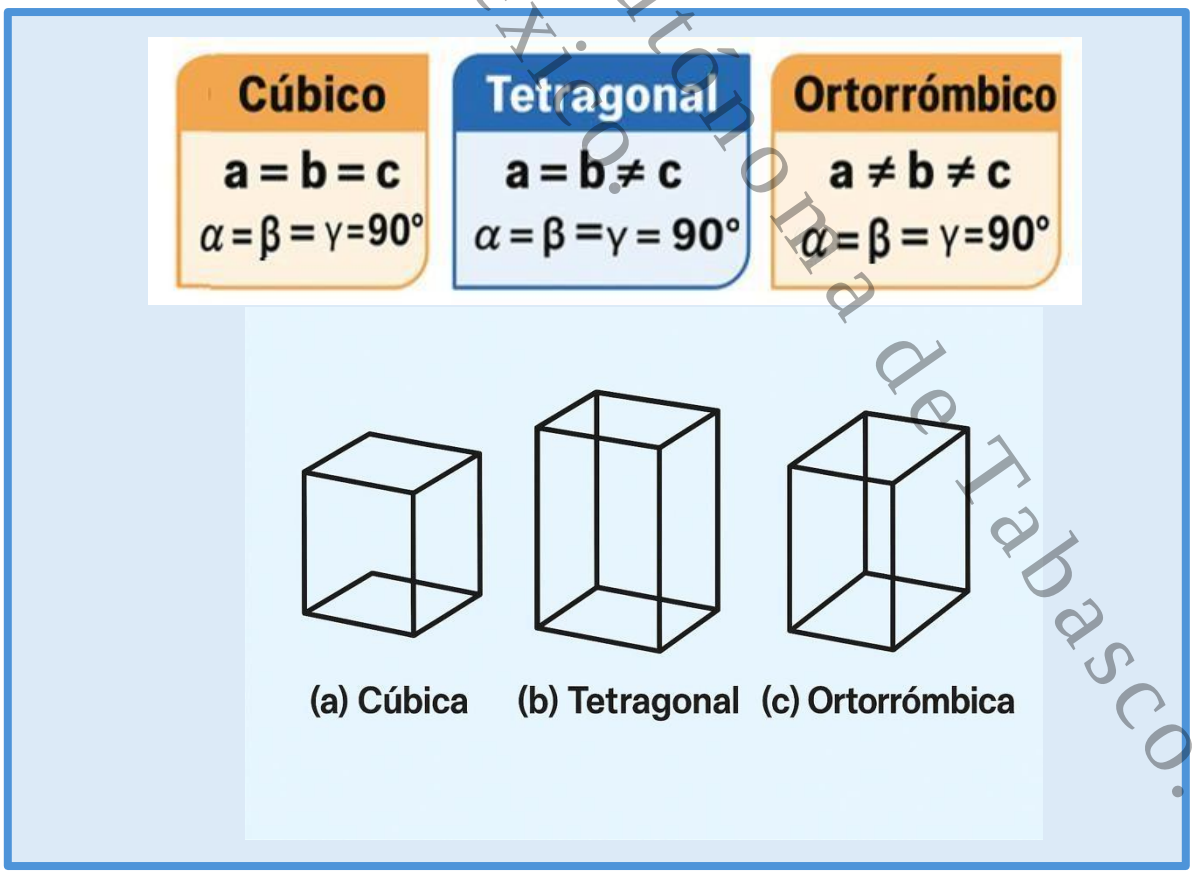
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

2.7.1. Difracción de Rayos X (DRX)

DRX es una técnica analítica ampliamente utilizada para estudiar la estructura de los materiales cristalinos, se considera como una de las técnicas de caracterización más importantes en la actualidad, esta técnica es analítica no destructiva, permite determinar varios aspectos importantes, como la geometría y dimensiones de la celda unitaria, distribución atómica y proporciones en las mezclas, estas características permiten estudiar la composición y la naturaleza de los materiales de unión. Específicamente proporciona información acerca de las propiedades estructurales, composición de fase y orientación preferencial, además proporciona una idea aproximada del tamaño de la partícula, lo que permite determinar que compuestos están presentes en una muestra, DRX identifica las fases cristalinas que pueden estar presentes en un material como pudieran ser cúbica, tetragonal, ortorrómbico, etc. (figura 9) (James Newell, 2009; Khan et al., 2019).

Figura 9

Fases comunes que se pueden formar en un material: a) cúbica, b) tetragonal y c) ortorrómbica



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

La técnica DRX se basa en la Ley de Bragg, que relaciona el ángulo de incidencia de los rayos X con la distancia entre planos atómicos en el cristal y la longitud de onda de los rayos X.

Al entrar en contacto el haz de rayo X con la muestra, se puede obtener interferencia constructiva y destructiva (figura 10 y 11), para obtener un patrón de difracción es necesario que el tipo de interferencia de la onda sea constructiva, ya que considerando la ley de Bragg con interferencia destructiva no es posible obtener un patrón de difracción.

La ecuación de Bragg se expresa como:

$$\mathbf{N\lambda = 2}\boldsymbol{d}\ \mathbf{sin\theta} \qquad \textbf{(Ecuación 3)}$$

Donde:

n es un número entero que representa el orden de la difracción

λ es la longitud de onda de los rayos X

d es la distancia entre planos atómicos

θ es el ángulo de incidencia.

La ecuación de Bragg indica que la difracción constructiva ocurre cuando la diferencia de camino entre ondas dispersas de planos atómicos adyacentes es un múltiplo de la longitud de onda de los rayos X (Ceja Martha E, 2010; Velandia C, 2018).

Figura 10

Interferencia constructiva

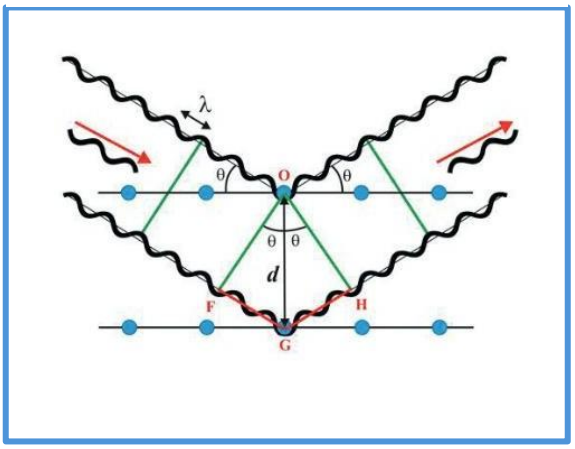
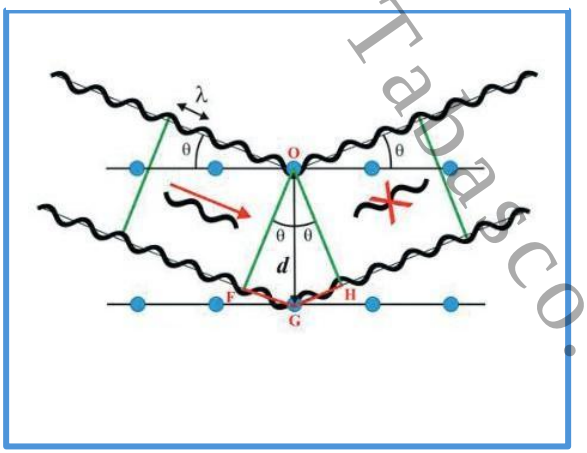


Figura 11

Interferencia destructiva



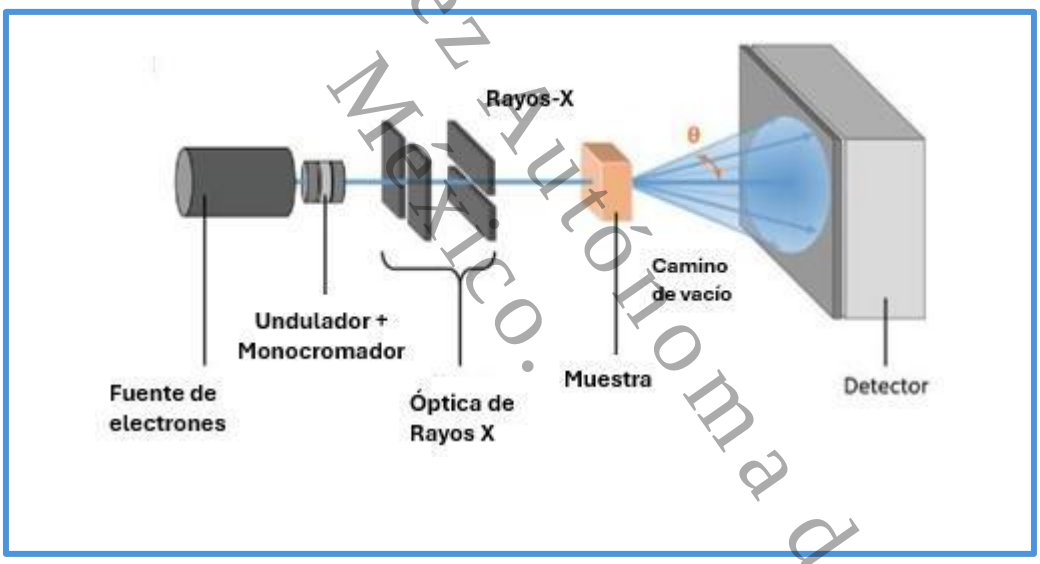
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

El equipo que se muestra en la siguiente imagen (figura 12) tiene varios componentes importantes.

El proceso comienza en la fuente de electrones, que genera un haz de rayos X. Luego, este haz pasa por un conjunto de lentes y filtros que forman parte de la óptica de rayos X, los cuales ayudan a dirigir y mejorar la calidad del haz. También se incluye un monocromador, que selecciona una sola longitud de onda para obtener resultados más precisos. Después, los rayos X llegan a la muestra donde se produce la difracción. Algunos equipos avanzados, como este, utilizan un camino de vacío para que el haz no pierda intensidad antes de llegar al detector, que es el encargado de captar la señal y generar los difractogramas.

Figura 12

Técnica de caracterización por DRX



2.7.3. Espectroscopia ultravioleta-visible UV-VIS (DRS)

Entre las técnicas de caracterización más utilizadas destaca la espectroscopia ultravioleta-visible (DRS) por ser esta técnica fundamental en la caracterización de nanopartículas sintetizadas, se distingue por ser un método sencillo, versátil, preciso, rápido y accesible en términos de costo, con ayuda de este método se puede obtener una amplia

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

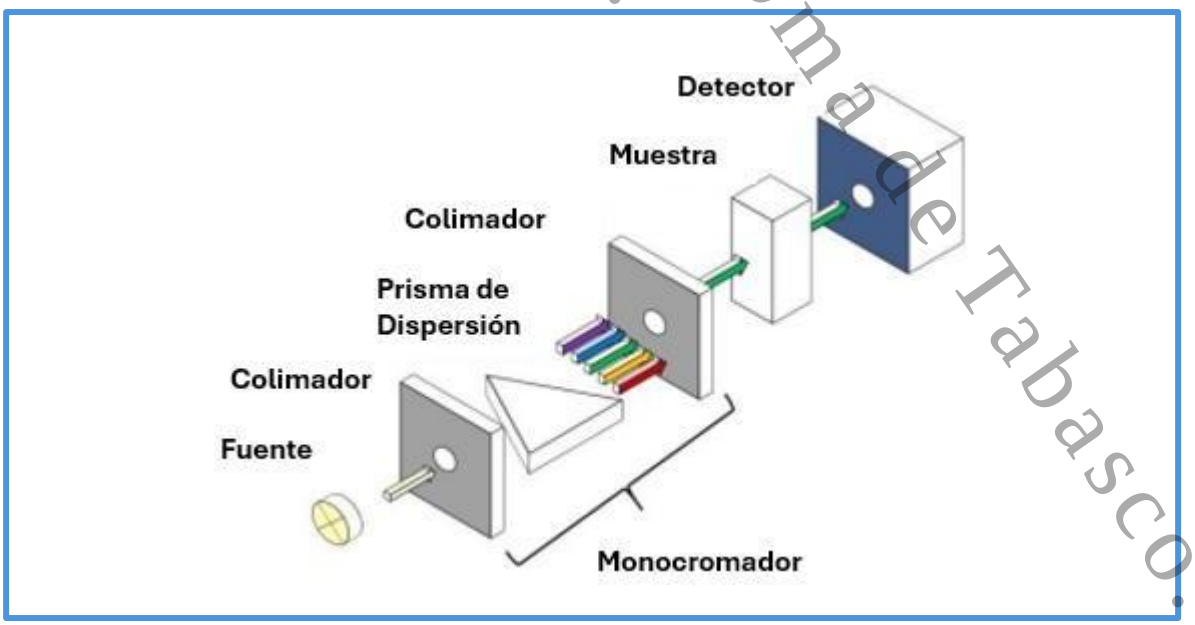
cantidad de datos experimentales entre ellos, la banda prohibida óptica, la energía de Urbach, el índice de refracción y la conductividad óptica (Singh, Gade, Verma, et al., 2024).

Se considera a la DRS como un método de análisis que se desarrolla por la absorción de radiación ultravioleta y/o visible por las moléculas de un material, generalmente esta técnica opera en un rango de 200 a 800 nm, gracias a esto se puede obtener información precisa sobre los niveles de energía, tanto atómicos como moleculares, de la muestra analizada. Se basa principalmente en la representación de la variación de la absorbancia respecto a la longitud de onda en función de la longitud de onda (Singh, Gade, Verma, et al., 2024; UNAM, 2022).

Para obtener un espectro UV-Vis se utiliza el espectrofotómetro (figura 13). Este equipo cuenta con una fuente de radiación ultravioleta y visible que emplea lámparas de deuterio, wolframio y/o xenón. Además, se tiene un monocromador compuesto por un colimador de entrada, un elemento dispersante y un colimador de salida, cuya función es seleccionar la longitud de onda que incidirá sobre la muestra. Finalmente, dispone de uno o varios detectores encargados de registrar la intensidad de la radiación que atraviesa la muestra, de esta forma genera el espectro de absorción o transmisión, según sea necesario (Cubas et al., 2018).

Figura 13

Espectrofotómetro, dispositivo utilizado en la técnica de caracterización UV-Vis



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Aun cuando la espectroscopia UV-Vis se mantiene en un intervalo estrecho del espectro electromagnético, proporciona información que es altamente necesaria y de vital importancia por lo cual se considera la espectroscopia más utilizada de manera global.

Para obtener este valor necesario de Eg a partir de datos de reflectancia, se emplea el modelo de Kubelka-Munk, el cual permite transformar los valores de reflectancia difusa en una función proporcional a la absorbancia del material.

La función de Kubelka-Munk se expresa como:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \qquad \textbf{(Ecuación 4)}$$

donde:

R es la reflectancia difusa (adimensional)

F(R) es la función de absorción equivalente.

Posteriormente, se aplica la ecuación de Tauc, que relaciona la absorbancia con la energía del fotón incidente para estimar el valor de Eg óptico. Esta relación se da por:

$$(\mathbf{F(R)} * \mathbf{hv})^n = A(hv - Eg) \qquad \textbf{(Ecuación 5)}$$

Donde:

hv es la energía del fotón (en electronvoltios, eV),

n depende del tipo de transición electrónica:

- **n**=2 para transiciones directas permitidas (como en ZnO),
- **n**=1/2 para transiciones indirectas permitidas (como en algunos óxidos de vanadio).

A es una constante,

Eg es la energía de banda prohibida.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Para convertir la longitud de onda a energía de fotón, se utiliza:

$$hv = \frac{1239.84}{\lambda} \qquad \textbf{(Ecuación 6)}$$

Donde:

λ es la longitud de onda en nanómetros (nm)

hv se obtiene en electronvoltios (eV).

El valor de Eg se determina gráficamente extrapolando la porción lineal de la curva del gráfico de $(F(R)\cdot hv)^n$ vs hv hasta que intercepte el eje de energía. Este punto de intersección representa la energía mínima necesaria para que los electrones salten de la banda de valencia a la banda de conducción (Jubu et al., 2022).

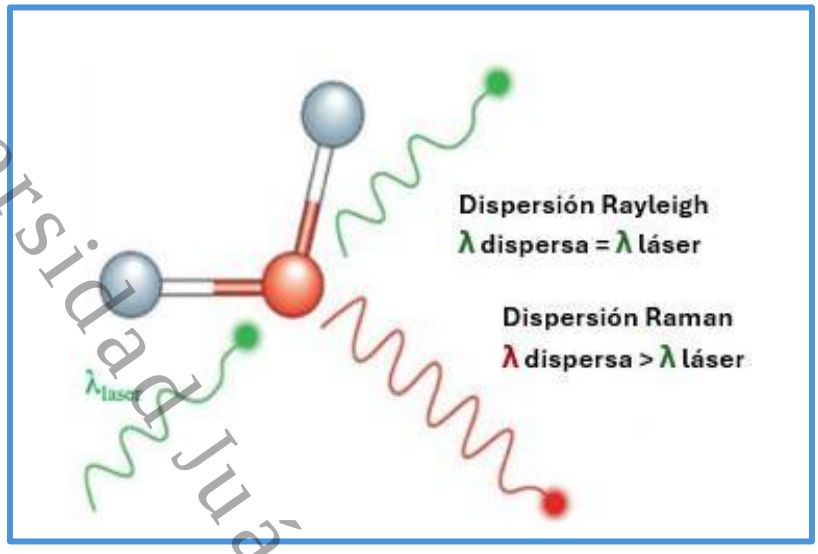
2.7.4. Espectroscopia Raman (RS)

El método de análisis llamado Espectroscopia Raman (RS) es una técnica vibracional, que permite medir movimientos moleculares, es recurrentemente utilizado en diferentes áreas de estudio, tales como la industria alimenticia, la farmacéutica, la biología, la química, las ciencias ambientales y la arqueología, con el fin de la caracterización de materiales, es un método que no suele ser invasivo ni destructivo, este estudio se basa en la interacción entre radiación electromagnética y las moléculas del material analizado, provocando cambios en la energía de los fotones dispersos. Este análisis suele utilizarse para obtener características muy importantes en un material, por ejemplo: las propiedades ópticas, suele mostrar la intensidad y la longitud de onda de la luz dispersa (figura 14), durante este proceso sucede una interacción de la radiación con las vibraciones de cada uno de los enlaces químicos. Este espectro es conocido por estar compuesto de picos que suelen detectar, distinguir y cuantificar información sobre átomos y moléculas, tales como pueden ser: identificar las fases cristalinas, detectar posibles defectos estructurales (impurezas) y analizar el grado de acoplamiento entre dos materiales semiconductores (Joshi et al., 2012; Mendo Pérez et al., 2022; Valentin Clavero, 2015).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 14

Dispersión Rayleigh y dispersión Raman



Este método parte del principio de la interacción entre radiación electromagnética que generalmente suele ser un láser con las moléculas del material analizado, de esta manera se provoca una dispersión inelástica de fotones. A diferencia de la dispersión Rayleigh (elástica), en la dispersión Raman, la energía del fotón incidente cambia al interactuar con los modos vibracionales del material, lo cual se refleja en un desplazamiento en la frecuencia de la luz dispersada.

Este desplazamiento de frecuencia se expresa como:

$$\Delta v = v0 - vs \qquad \textbf{(Ecuación 7)}$$

Donde:

v0 es la frecuencia de la luz incidente,

vs es la frecuencia de la luz dispersada,

Δv es el desplazamiento Raman, que está relacionado directamente con los modos vibracionales de la muestra (Keresztury, 2006).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 3. Procedimiento experimental

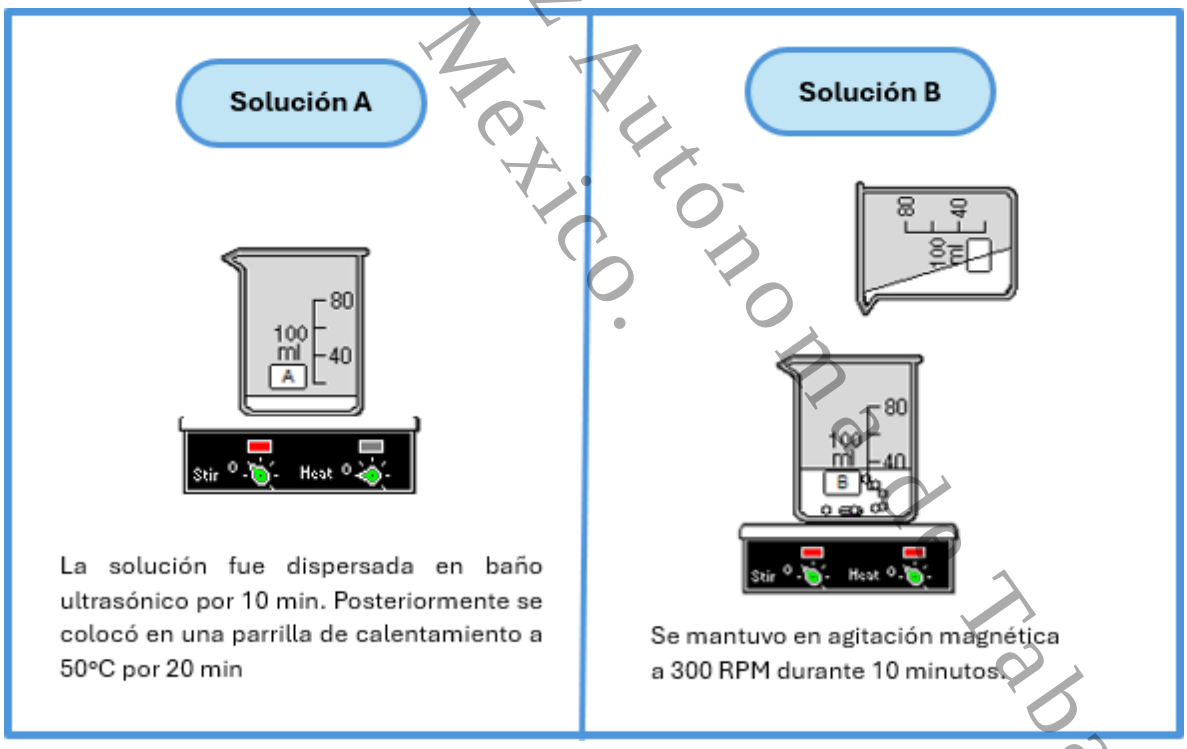
3.1. Procedimiento para la síntesis de ZnO mediante el método sol-gel

La metodología utilizada para llevar a cabo la síntesis de ZnO se realizó de acuerdo con metodologías encontradas en la literatura (Torres-Hernández et al., 2015).

Se inicio preparando una solución como se muestra a continuación (ver figura 15), se utilizó un vaso de precipitados de 100 ml, el cual fue etiquetado como A para identificar. En el vaso se agregaron 10 ml de etanol (C_2H_5OH), y 0.1172 g de hidróxido de sodio (NaOH) con el fin de disolver. Seguidamente se preparó otra solución la cual se etiqueto como B esta contenía 35.825 ml de etanol (C_2H_5OH) y 0.925 ml de la solución A.

Figura 15

Disolución del precursor NaOH en etanol mediante baño ultrasónico y agitación magnética

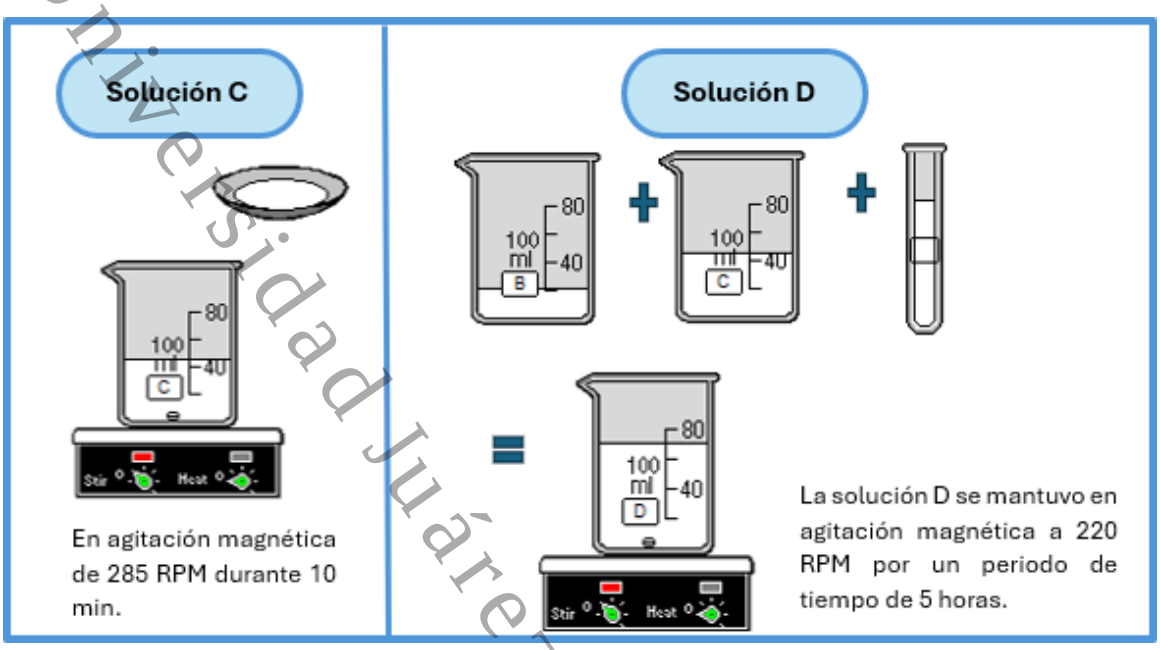


Posterior a ello, la solución C resultó de disolver 0.3393 g de acetato de zinc ($Zn(COOCH)_2*2H_2O$) en 45 ml de etanol (C_2H_5OH), mientras que la solución D consistió en unir la solución B con la solución C y 0.145 ml de agua de desionizada (figura 16).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 16

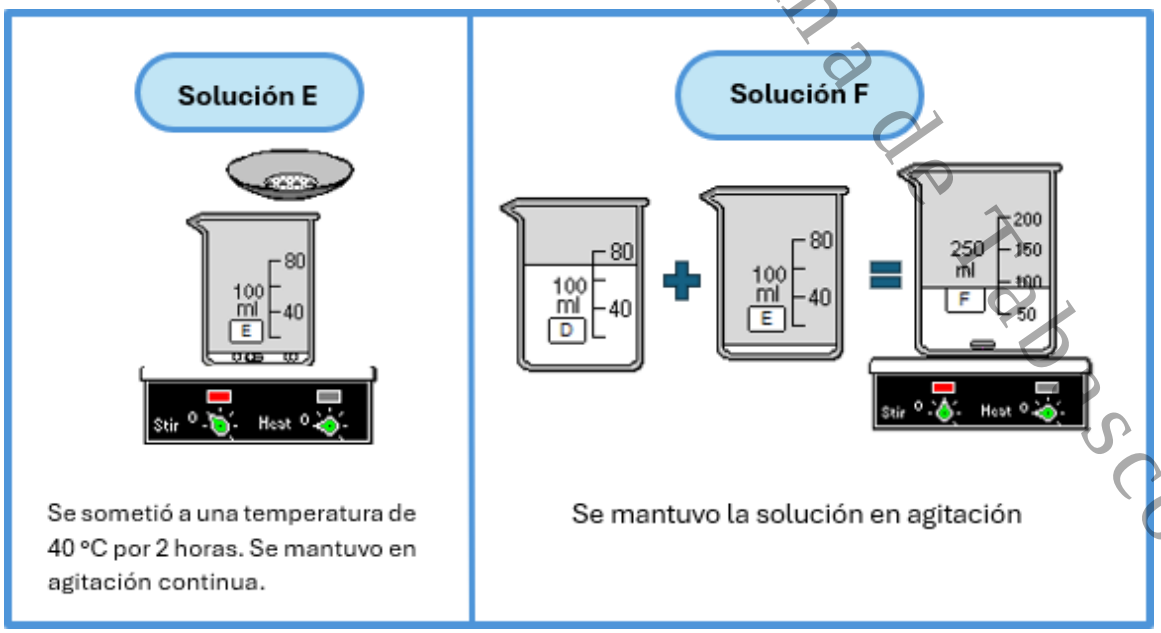
Preparación de las soluciones C y D



Para la solución E se requirió de 1.6011 g de acetato de zinc (Zn (COOCH)2*2H_2O) y 3.3 ml de agua desionizada. La solución F resultó de unir las soluciones E con la solución D (ver figura 17).

Figura 17

Control de temperatura y agitación constante durante la síntesis

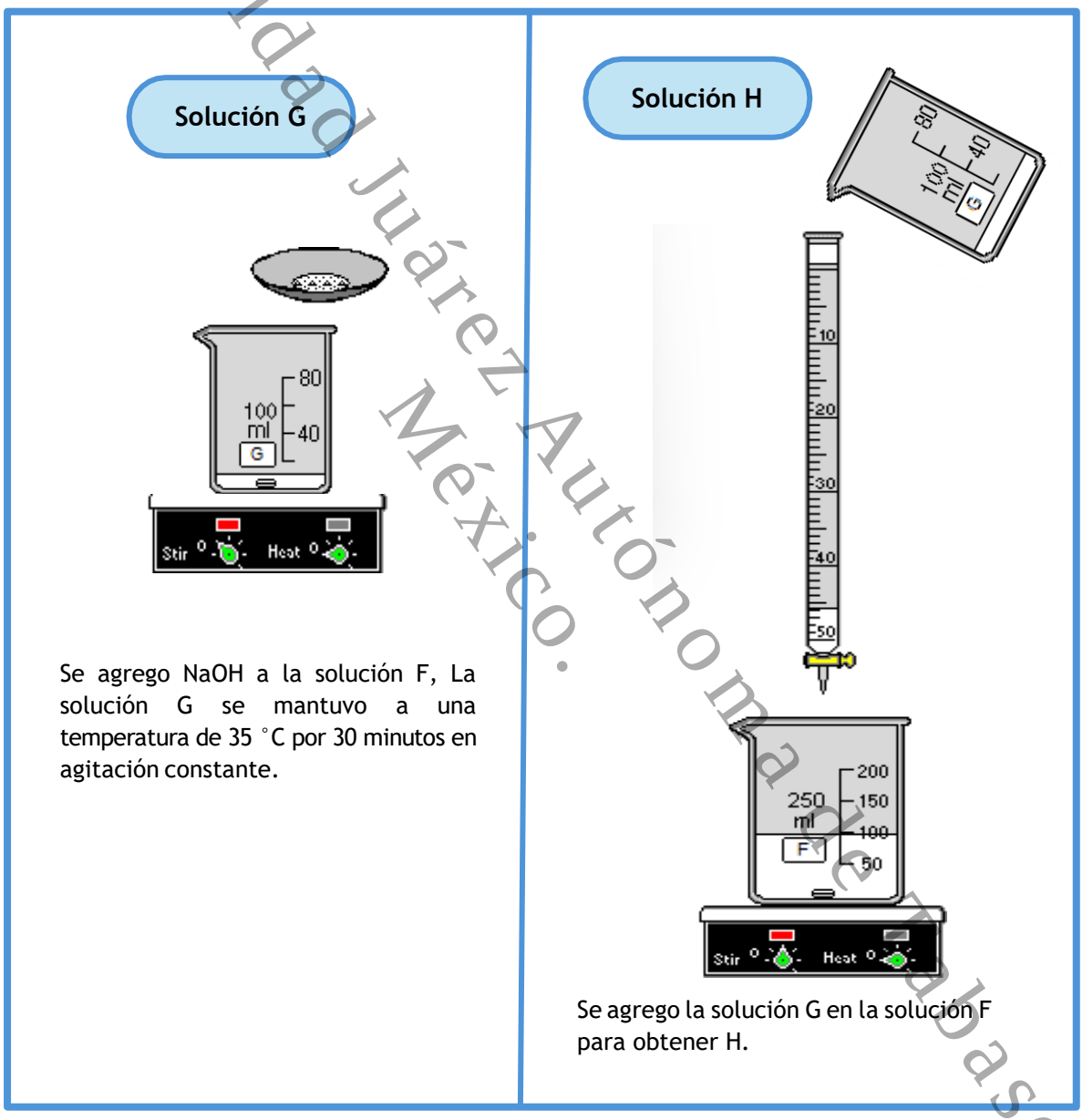


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Se preparará una solución G disolviendo 0.5214 g de hidróxido de sodio (NaOH) en 3.5 ml de agua desionizada, Posterior a ello, la solución H resultó de agregar por goteo lento aproximadamente 1 hora, la solución G en las soluciones F (ver figura 18).

Figura 18

Goteo lento de la solución G en F, manteniendo el control de temperatura y agitación.

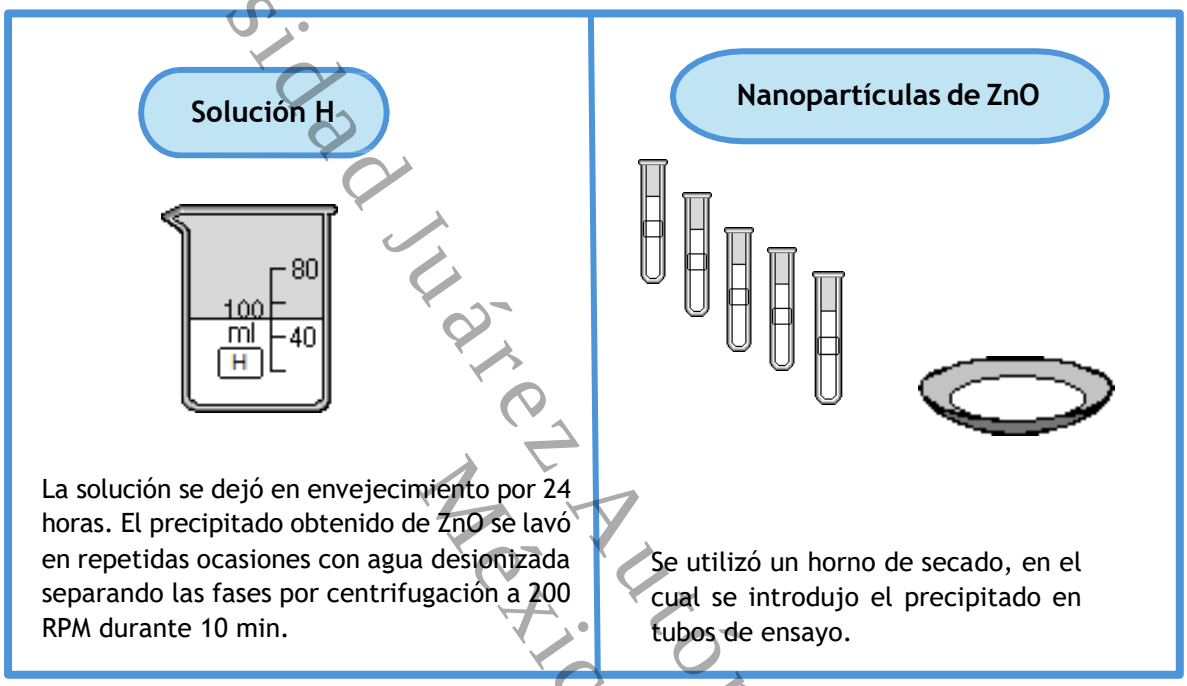


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Concluido este proceso, la solución se dejó en reposo durante 24 horas. Transcurrido el tiempo de envejecimiento, finalmente su secado fue a 110 °C durante 12 horas obteniendo así nanopartículas de ZnO, como se muestra a continuación (figura 19).

Figura 19

Solución en envejecimiento por 24 horas, secado del material en horno



3.2. Procedimiento para la síntesis de $BiVO_4$ mediante el método sol-gel

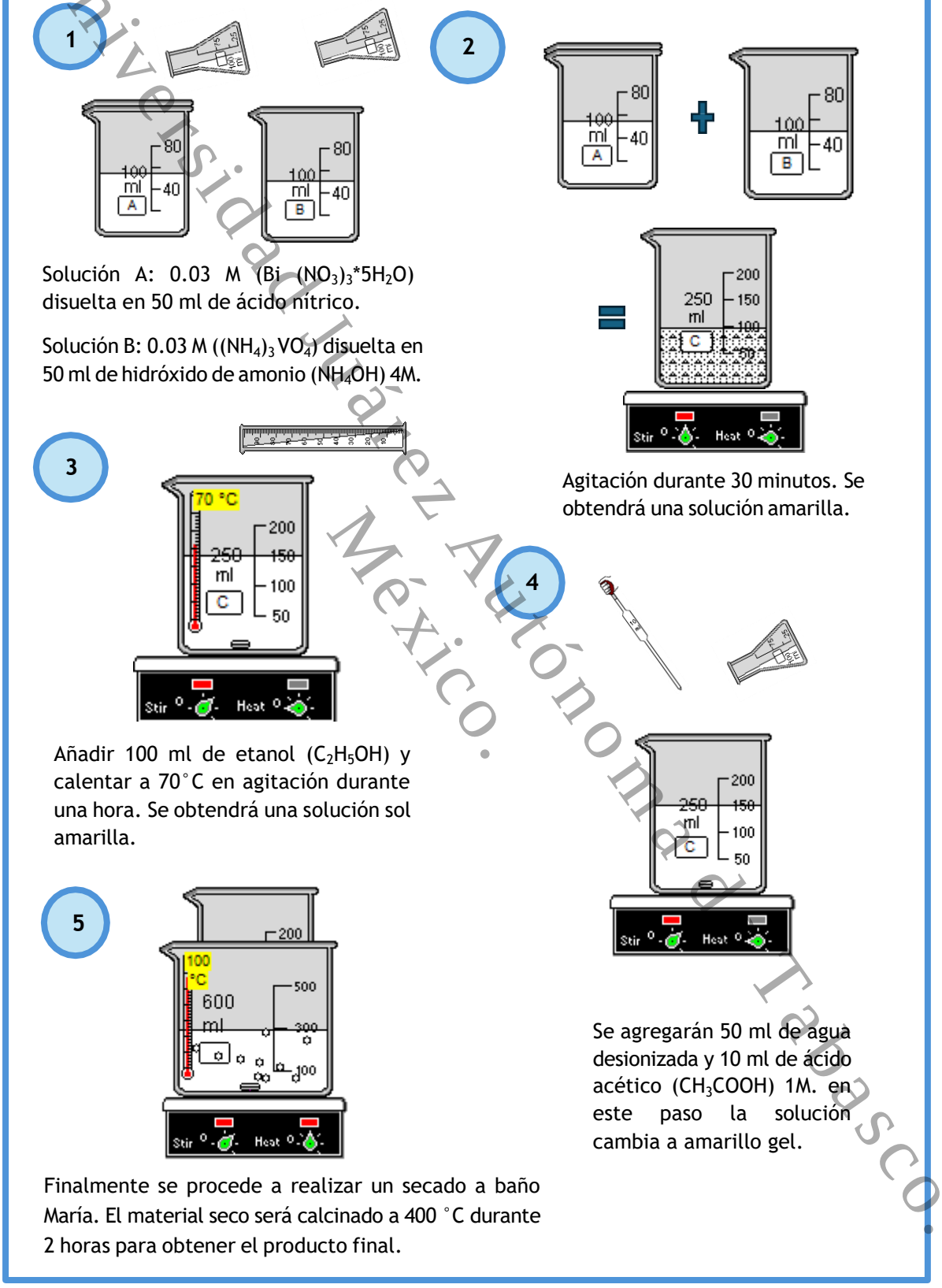
El proceso de síntesis de $BiVO_4$ se representa en el siguiente esquema (figura 20), se propone de acuerdo con la presentada por (Deebasree et al., 2018).

Se utilizarán nitrato de bismuto ($Bi(NO_3)_3*5H_2O$) y vanadato de amonio ($(NH_4)_3VO_4$) como precursores de partida con una relación molar 1:1. Se etiquetaron las soluciones como A y B para facilitar la identificación durante el procedimiento.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 20

Representación del procedimiento experimental para la obtención de $BiVO_4$



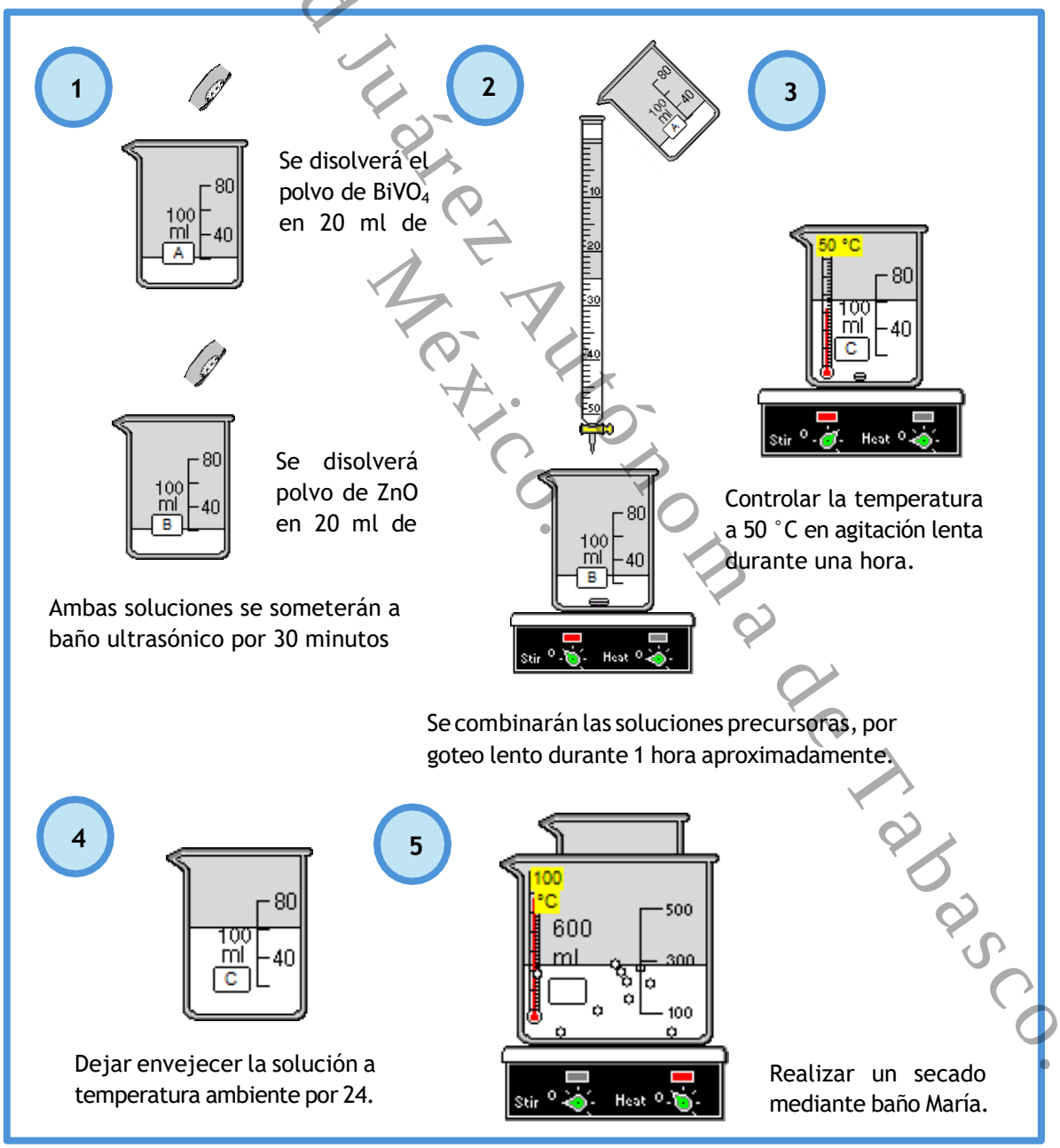
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

3.3. Procedimiento para la obtención del material compuesto $ZnO/BiVO_4$ mediante el método sol-gel

Se utilizó una combinación de las metodologías previamente mencionadas para llevar a cabo el acoplamiento de los materiales como se muestra en la figura 21. En primer lugar, se sintetizaron los materiales por separado siguiendo dichos métodos, lo que permitió optimizar las condiciones de cada proceso antes de proceder con la combinación final (Deebasree et al., 2018).

Figura 21

Etapas del proceso de acoplamiento del $ZnO/BiVO_4$ mediante el método sol-gel



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

3.4. Procedimiento para la evaluación de la actividad fotocatalítica

El procedimiento experimental para las pruebas fotocatalíticas que sirvieron como base para conocer el nivel de degradación de MB con los fotocatalizadores ZnO, $BiVO_4$ Y ZnO/$BiVO_4$ previamente sintetizados, se llevó a cabo en un periodo de 240 min.

Inicialmente se preparó una muestra contaminada de agua con MB a una concentración de 10 PPM (figura 22). la cual se dejó en agitación en un periodo de 24 horas con la finalidad de conseguir una disolución total en la muestra.

Figura 22

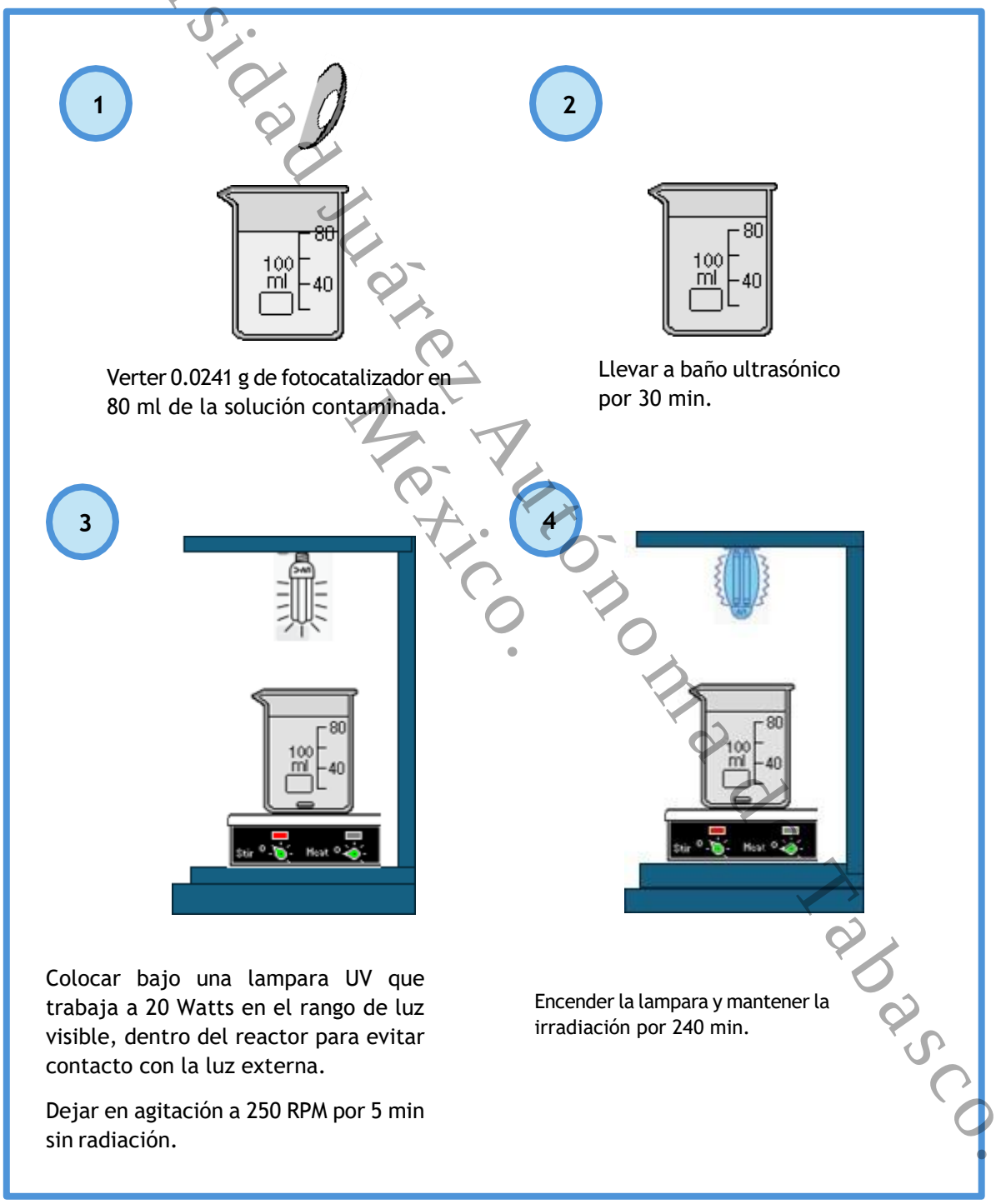
Solución para la muestra contaminada con MB

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Una vez obtenida la solución contaminada se procedió a realizar las pruebas fotocatalíticas. El procedimiento realizado se ilustra a continuación (figura 23) fue aplicado a cada una de las concentraciones sintetizadas.

Figura 23

Ruta del proceso para realizar las pruebas fotocatalíticas



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

La muestra se dejó en agitación continua durante todo el experimento, se tomaron alícuotas cada 30 min, y se mantuvieron cubiertas de luz externa, una vez obtenidas todas las muestras se realizó centrifugado por 20 min a 2000 RPM, finalmente se procede a realizar las pruebas de degradación con el espectrofotómetro, con el cual se midió la absorción para determinar la cantidad de MB degradado durante el experimento (González A, 2020; J. Garza Arévalo, 2015).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 4. Resultados experimentales y discusiones

La obtención de resultados en una parte clave en el desarrollo de un trabajo de investigación, a continuación, se presentan los principales hallazgos durante el desarrollo experimental, se inicia a partir de la síntesis y caracterización de los materiales fotocatalíticos, de igual manera se presentan los resultados de las pruebas fotocatalíticas realizadas. Se proporcionan datos experimentales, gráficas y micrografías que se obtuvieron al hacer análisis mediante técnicas de caracterización, dichas técnicas se utilizaron con el objetivo de evaluar tanto la eficiencia y las propiedades de cada uno de los materiales sintetizados durante el desarrollo del proyecto.

4.1. Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX)

DRX es una técnica que suele utilizarse para obtener características estructurales de materiales cristalinos, esta técnica nos da resultados para poder determinar en qué fase se encuentra el material obtenido (Ceja Martha E, 2010) . Durante este estudio se utilizó para confirmar la formación y estructura cristalina de los materiales sintetizados mediante el método sol-gel, y la fase obtenida. Con el análisis DRX se obtuvieron los difractogramas que muestran datos que corresponden a cada uno de los materiales deseados y posteriormente fueron comparados con los patrones de referencia ya establecidos en cartas cristalográficas.

4.1.1. Análisis de Difracción de Rayos X (DRX) del ZnO

La Figura 24 muestra el patrón de difracción de rayos X obtenido para el ZnO. Se observan picos de difracción bien definidos en valores de 2θ aproximadamente en 31.8°, 34.4°, 36.3°, 47.5°, 56.6°, 62.9°, 66.4°, 68.0° y 69.2°, los cuales corresponden a los planos cristalográficos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (200) y (201), respectivamente (Singh Saini et al., 2023).

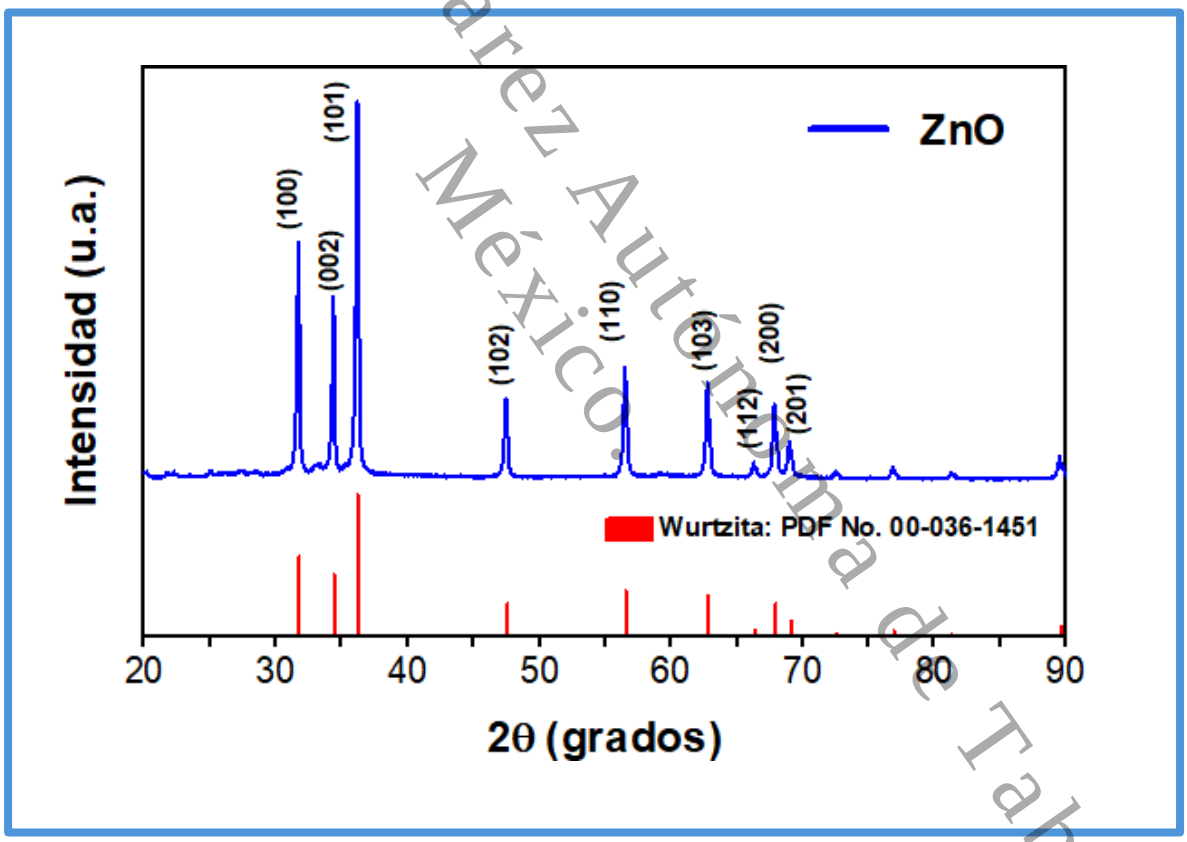
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Estos valores coinciden con el archivo de referencia PDF No. 00-036-1451, confirmando que la estructura cristalina del ZnO sintetizado es de tipo wurtzita. La presencia de estos picos indica una alta cristalinidad del material, lo cual es un aspecto deseable para muchas aplicaciones, especialmente en fotocatálisis (Singh Saini et al., 2023).

Además, la ausencia de picos adicionales sugiere que no hay presencia significativa de impurezas o fases secundarias en la muestra, lo que indica una síntesis exitosa del ZnO puro. La intensidad del pico (101) sugiere que el crecimiento preferencial de los cristales ocurre en esta dirección, lo que puede influir en sus propiedades fisicoquímicas.

Figura 24

Difractograma de rayos X de nanopartículas de ZnO en su fase Wurtzita



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

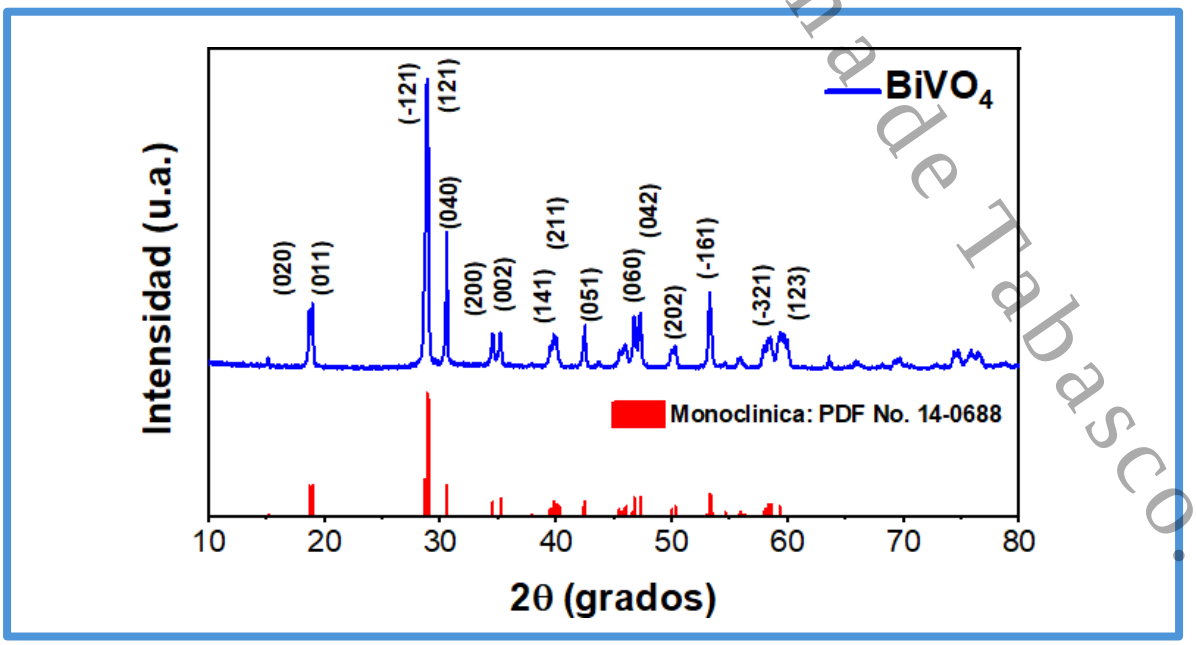
4.1.2. Análisis de Difracción de Rayos X (DRX) del $BiVO_4$

La Figura 25 presenta el patrón de difracción de rayos X correspondiente al $BiVO_4$ sintetizado. Se observan múltiples picos bien definidos, localizados en valores de 2θ aproximadamente a 14.5°, 18.7°, 28.9°, 30.5°, 32.5°, 34.5°, 35.2°, 38.6°, 42.5°, 46.6°, 47.5°, 50.3°, 53.4°, 58.3°, entre otros. Estos reflejan la presencia de distintos planos cristalográficos, como (020), (011), (121), (040), (002), (141), (211), (051), (060), (202), (042), (-161), (-321) y (123), los cuales son característicos de la fase monoclínica scheelita del $BiVO_4$ (Song et al., 2021). La identificación de los planos y su comparación con la base de datos JCPDS 14-0688 confirman que el material obtenido corresponde a la fase monoclínica de $BiVO_4$, la cual es la más activa fotocatalíticamente, en comparación con su fase tetragonal (Song et al., 2021). El pico más intenso ubicado alrededor de 28.9° corresponde al plano (121), indicando un crecimiento preferencial en esa dirección. La nitidez y simetría de los picos sugieren una buena cristalinidad del material, lo cual es fundamental para un buen desempeño en aplicaciones como fotocatálisis, sensores o dispositivos optoelectrónicos.

Además, la coincidencia entre los picos experimentales (negro) y las posiciones estándar (rojo) muestra que no se detectan impurezas ni fases secundarias, lo que indica una síntesis efectiva y selectiva del $BiVO_4$ monofásico.

Figura 25

Difractograma de rayos X de nanopartículas de $BiVO_4$ en su fase monocíclica scheelita



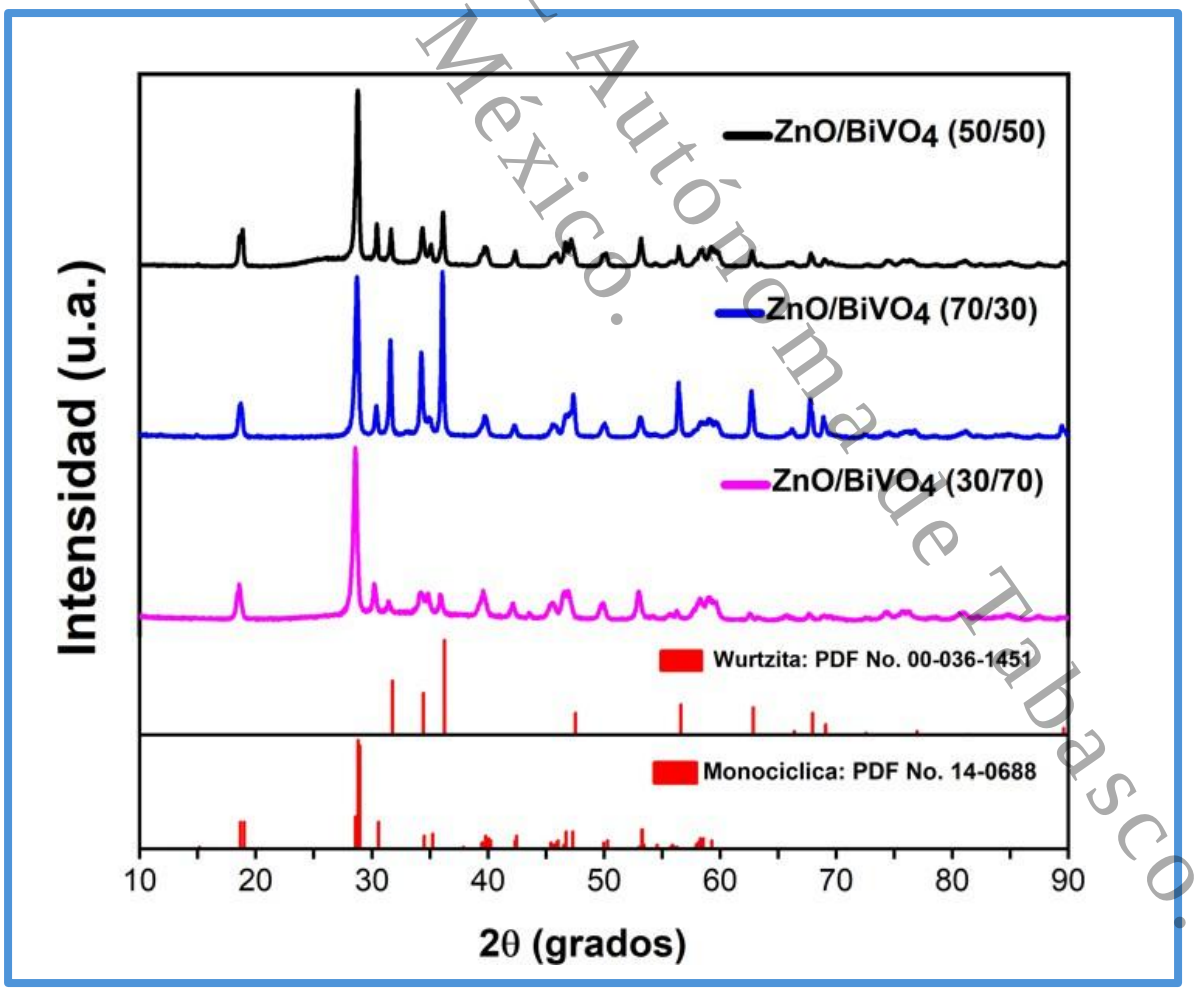
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

4.1.3. Análisis DRX del acoplamiento $ZnO/BiVO_4$ mediante el método sol-gel

Al realizar el análisis de DRX los resultados muestran los siguientes patrones que se obtuvieron de diferentes proporciones del acoplamiento de ZnO Y $BiVO_4$, para lo cual se determinó utilizar tres muestras con distintitas relaciones de ambos materiales. La figura 26 exhibe con una línea negra una relación 50:50, la línea azul muestra la relación 70:30, mientras la línea magenta representa la relación 30:70. De igual manera se incluyen los patrones cristalográficos de referencia en la parte inferior de la gráfica Wurtzita (ZnO), PDF No. 00-038-1451, Monoclínica ($BiVO_4$), PDF No. 14-0688, los cuales están representados con líneas rojas (Singh Saini et al., 2023; Song et al., 2021).

Figura 26

Representación gráfica del acoplamiento $ZnO/BiVO_4$ a diversas proporciones



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Se pueden observar los picos característicos en valores de 2θ entre aproximadamente 31° y 36°, se puede determinar que estos indican la presencia de ZnO en la fase hexagonal Wurtzita, de la misma forma al observar se pueden encontrar picos característicos en la región de 28° a 60°, típicos de la fase monoclínica en el $BiVO_4$. Los difractogramas realizados reflejan la presencia de ambas fases en las muestras utilizadas con diferentes relaciones, por lo que se puede distinguir que las intensidades de cada una de las fases varían en la muestra dependiendo de la cantidad exacta del material utilizado, siendo así, se identifican correctamente las fases, demostrando que la variación en las proporciones influye significativamente en la intensidad relativa de los picos, debido a que indica la cantidad más abundante de cada fase.

4.2. Caracterización por Espectroscopia Raman (RS)

Se realizó un análisis de espectroscopia Raman con la finalidad de evaluar la estructura cristalina y las posibles interacciones entre ZnO y $BiVO_4$, el análisis fue realizado tanto para las muestras de los materiales independientes como para las muestras con diferentes proporciones de cada material (50:50, 70:30 y 30:70) (ver figura 27), con esta técnica se pudo identificar los modos vibracionales característicos de cada uno de los compuestos. Este tipo de caracterización es de suma importancia para esta investigación ya que permite confirmar la coexistencia de ambas fases, además de ello se puede detectar cualquier desplazamiento o cambio en la intensidad de los picos.

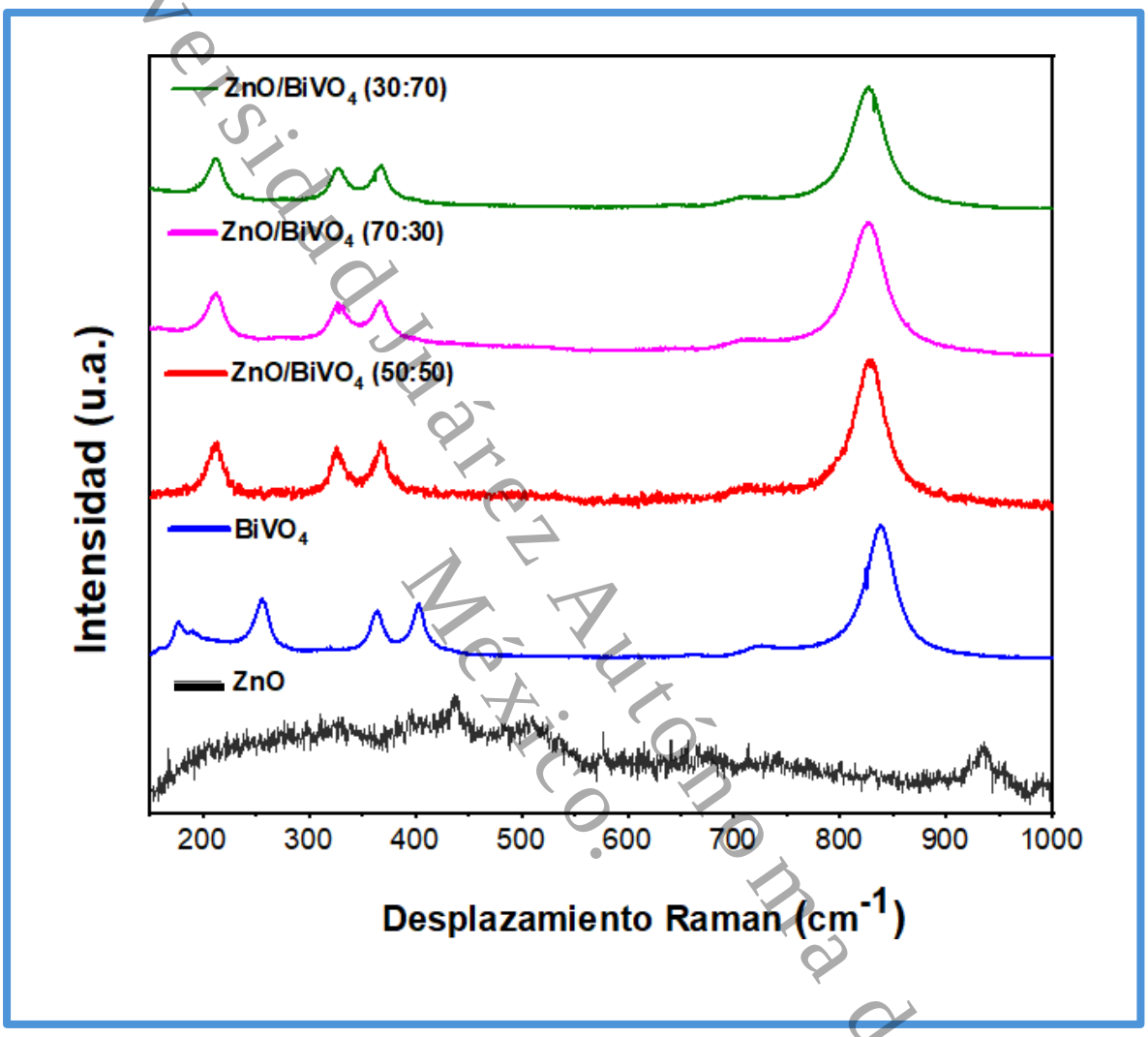
La figura 27 muestra los resultados obtenidos una vez realizado el análisis por espectroscopia Raman en la cual podemos observar que los picos característicos de los materiales coinciden con los reportados en la literatura.

El eje X indica el desplazamiento Raman (cm^{-1}) en este eje se muestran los modos vibracionales del material, mientras que el eje Y representa la intensidad en unidades arbitrarias (u.a.) lo que indica que tan fuerte se detecta esa vibración.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Figura 27

Caracterización por espectroscopia Raman de los fotocatalizadores ZnO, $BiVO_4$ y de ZnO/$BiVO_4$ a diferentes proporciones



En la curva del ZnO (negra) tenemos un espectro ruidoso y con baja intensidad, esto puede atribuirse a una baja cristalinidad y a un tamaño nanométrico lo cual suele ser normal en ZnO, también es posible tener fluorescencia lo cual enmascara los picos Raman, sin embargo, podemos observar los picos más intensos y característicos de este material como lo son ~380, ~410, ~473 y ~574 (Guo et al., 2009).

Por el contrario, la curva de $BiVO_4$ (azul) muestra picos bien definidos el más definido se observa entre 825 y 830 cm^{-1} el cual suele ser típico del modo simétrico V-O, otros picos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

que se muestran están entre 300 y 400 cm^{-1} lo cual confirma la presencia del $BiVO_4$ lo cual indica que el material cuenta con una buena cristalinidad y alta pureza (Thalluri et al., 2013).

Ahora bien, en el acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ (50:50) (roja), se observa una mezcla de señales, se puede observar el pico más fuerte del $BiVO_4$ y varios picos pequeños que podrían venir del ZnO, se pueden observar picos entre 200 y 500 lo cual puede deberse a una interacción entre ambas fases.

A su vez, en el acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ (70:30) (magenta), se observa que esta más influenciado por el ZnO, aun cuando esos picos no son muy claros por la baja señal del ZnO, podemos ver claramente que el pico principal de $BiVO_4$ disminuye un poco. Asimismo, el acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ (30:70) del $BiVO_4$ puro debido a la presencia de una cantidad mayor de este material, en ambos se siguen viendo algunos picos intermedios, lo cual sugiere una interacción estructural.

4.3. Caracterización mediante espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa (DRS)

Se llevó a cabo la caracterización de los fotocatalizadores mediante espectroscopía UV-Vis la cual se utilizó para determinar el valor de la banda prohibida (bandgap, Eg) de cada uno de estos materiales y con ello se logró medir la capacidad del material para absorber la luz en el rango UV y visible, de esta forma se determina cuanto del espectro solar se puede aprovechar para el análisis. La absorción óptica se midió en un rango que va de 200 a 800 nm, para determinar el valor de Eg se realizó mediante el método Kubelka-Munk modificado el cual se basa en la ecuación 2.

Se graficaron los valores previamente obtenidos mediante el estudio de DRS, con los cuales se obtuvieron las curvas de absorción óptica (figuras 28-30) obtenidas de cada una de las muestras estudiadas, con cada una de estas curvas se realizó un ajuste lineal en la región de la transición óptica con la finalidad de obtener el valor de Eg de cada material, para este ajuste se utilizó la extrapolación de la porción lineal de la curva. Para realizar un análisis gráfico de esta banda prohibida, fue necesario utilizar el espectro UV-Vis registrado en modo de reflectancia y pasarlo a una magnitud F (R) utilizando el método anteriormente mencionado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Sin embargo, debido a que esta ecuación se usa para determinar la absorbancia aparente sin tener en cuenta los efectos de dispersión. Se utiliza el método modificado el cual se ajusta a la forma de la ecuación para mejorar la precisión en el cálculo del Eg, de esta forma en lugar de trabajar directamente con F (R), se aplica una transformación grafica lineal. Se utiliza la extrapolación lineal para determinar Eg de forma más exacta.

La siguiente ecuación (ecuación 8) es una simplificación basada en el ajuste lineal y la relación inversa entre la longitud de onda (λ) y la energía del fotón (hv).

$$\boldsymbol{Eg\ (eV)} = \frac{\boldsymbol{1239.84\ (m)}}{\boldsymbol{b}} \qquad \textbf{(Ecuación 8)}$$

donde:

m es la pendiente obtenida a partir del ajuste lineal de la gráfica.

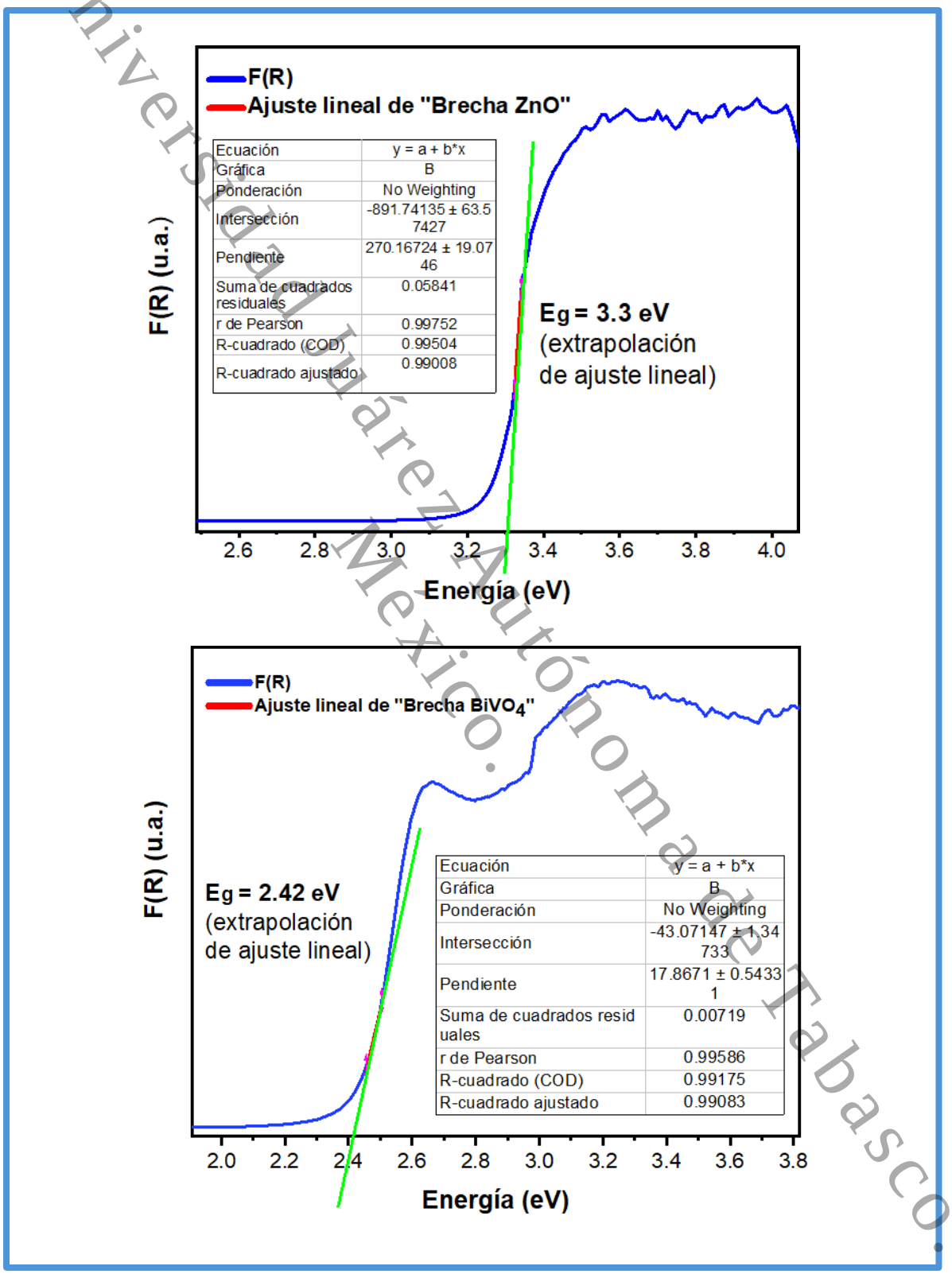
b es la ordenada al origen obtenida del mismo ajuste lineal.

Los valores de m y b fueron determinados a partir de los datos experimentales obtenidos tras realizar el análisis gráfico en el software Origin Pro-2021 (Jubu et al., 2022).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 28

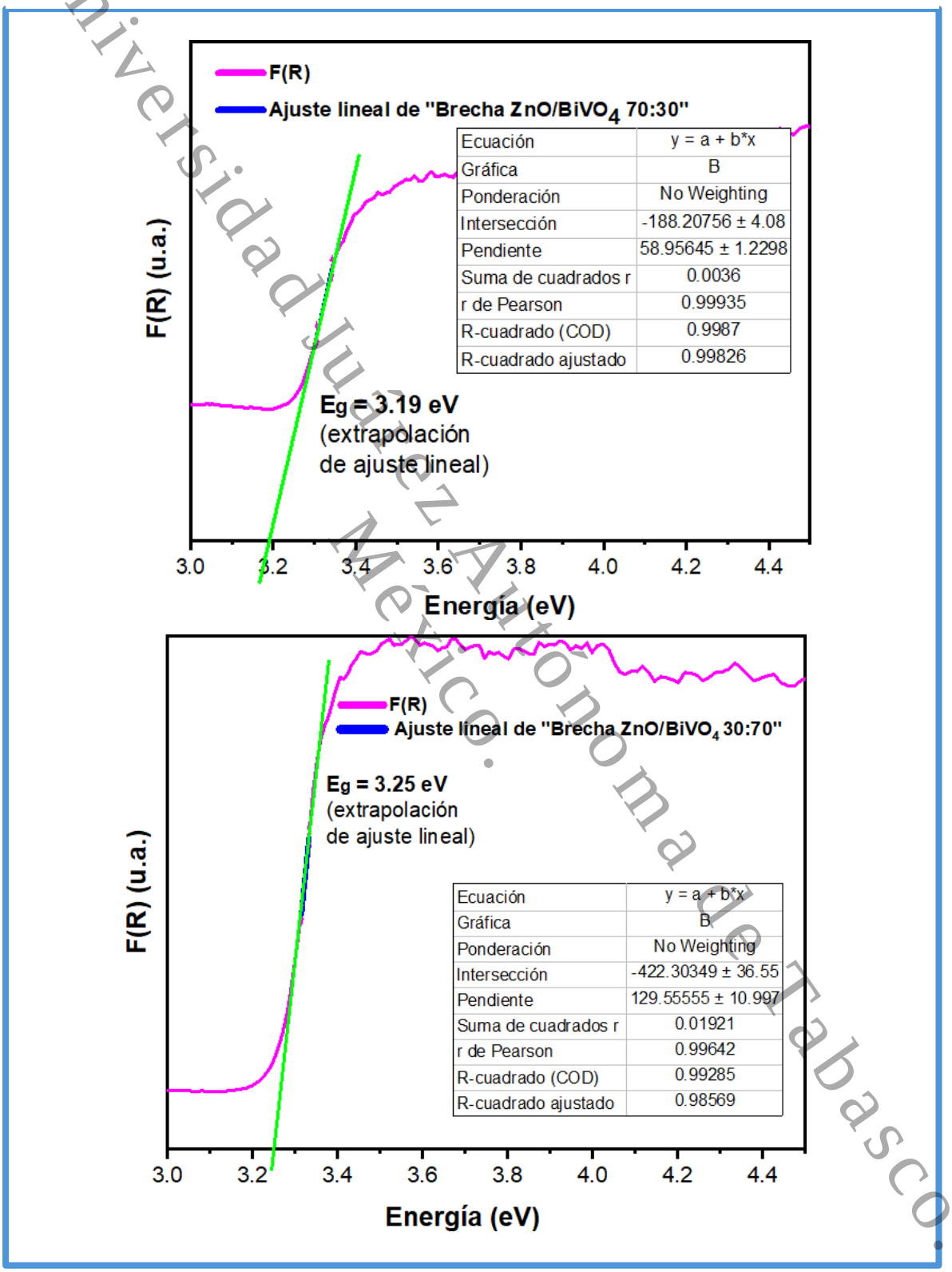
Ajuste lineal para las curvas de ZnO y $BiVO_4$



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 29

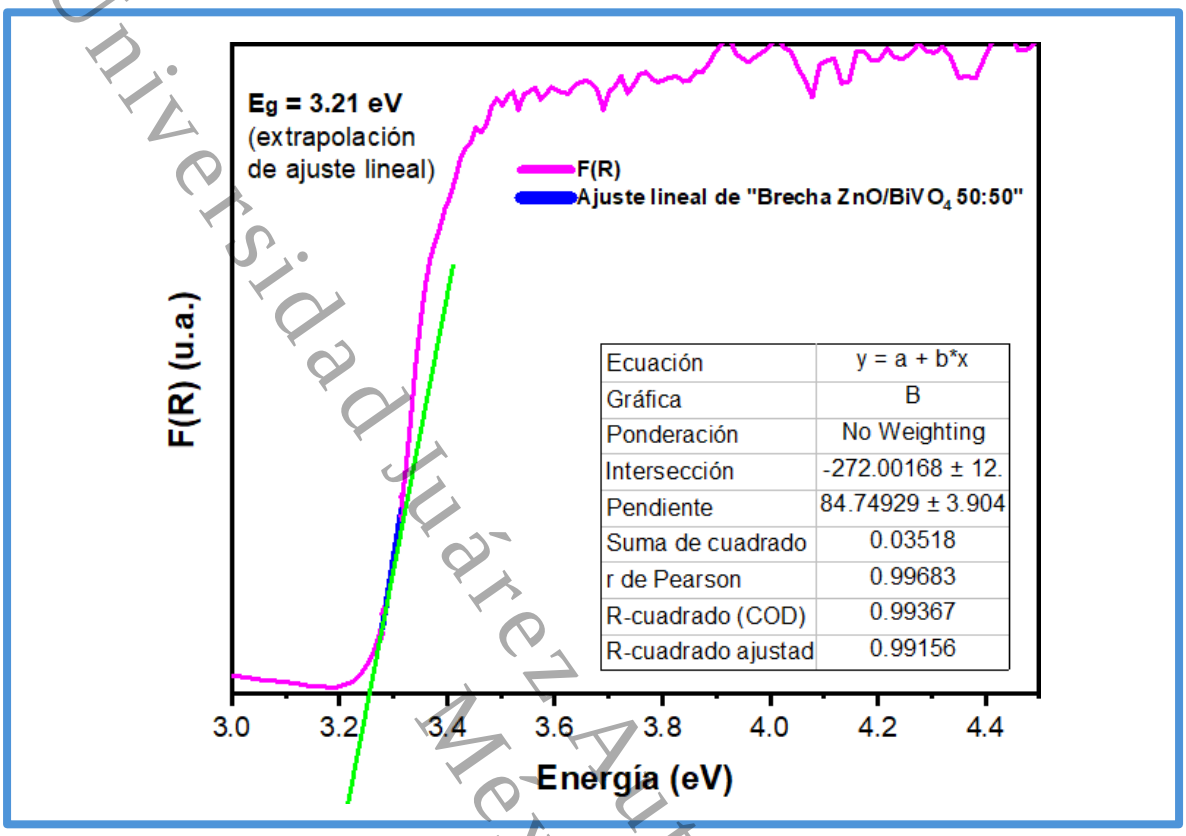
Ajuste lineal para las curvas de $ZnO/BiVO_4$ a (70:30 y 30:70)



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 30

Ajuste lineal para la curva de $ZnO/BiVO_4$ (50:50)



Al generar las gráficas en Origin pro-2021, se obtuvieron valores de Intersección y pendiente los cuales fueron utilizados para calcular valores exactos de Eg con ayuda de la ecuación 8, los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. *Valores calculados de la banda prohibida para los fotocatalizadores*

Muestra	Ordenada al origen (b)	Pendiente (m)	Eg (eV) Calculado	Eg (eV) Teórico
ZnO	270.16724	-891.74135	3.30	3.2 - 3.3
$BiVO_4$	1.78E+01	-4.31E+01	2.42	2.4 – 2.5
ZnO-$BiVO_4$-50-50	8.47E+01	-2.72E+02	3.26	N/A
ZnO-$BiVO_4$-70-30	5.70E+01	-1.88E+02	3.19	N/A
ZnO-$BiVO_4$-30-70	1.30E+02	-4.22E+02	3.25	N/A

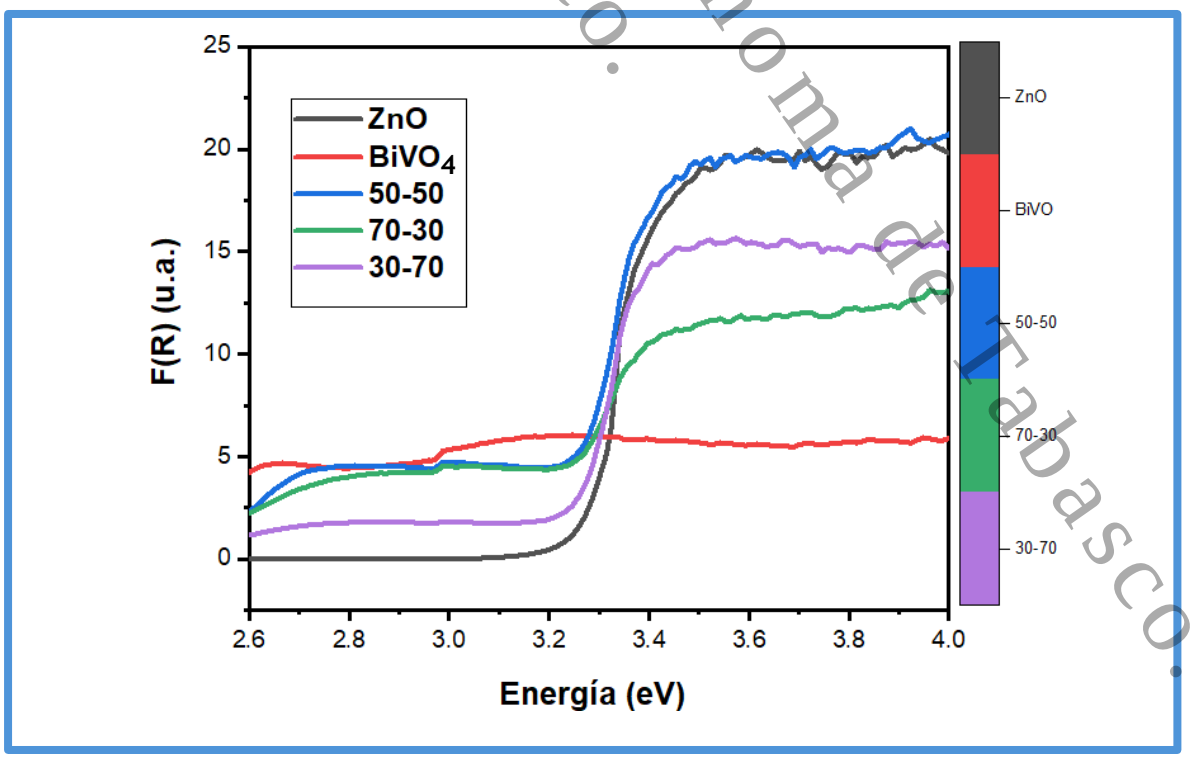
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Una vez obtenidos los valores correspondientes para Eg de cada una de las muestras analizadas se puede determinar que se obtuvieron resultados consistentes de acuerdo con la literatura, la cual reporta para el ZnO un rango típico que va entre 3.2- 3.3 eV (Devraj Kumar et al., 2016), por lo que el valor obtenido de 3.3 si corresponde. Por su parte el $BiVO_4$ que reporta tener un valor en un rango menor que varía entre 2.4 – 2.5 eV (Thalluri et al., 2013), nos mostró un valor de 2.42 el cual se observa que es el valor adecuado de acuerdo con la literatura. Mientras tanto podemos observar que las muestras propuestas varían el valor de Eg entre estos dos rangos lo cual es sumamente esperado, ya que se encuentran dentro del rango de márgenes razonables en comparación con los datos proporcionados, esto indica una adecuada reproducibilidad del método empleado.

Se realizo la siguiente grafica (figura 31) que representa la relación entre la energía (eV) y la F (R) para cada uno de los fotocatalizadores sintetizados durante la presente investigación, al analizar dicha grafica se puede apreciar que los fotocatalizadores a diferentes relaciones exhiben variaciones significativas en la F (R) a medida que se modifica la energía. Al hacer una comparación con las curvas, se destaca que el ZnO proporciona un rendimiento superior en comparación con el $BiVO_4$ el cual presenta una respuesta más limitada.

Figura 31

Espectros de reflectancia difusa en función de la energía (eV) para diferentes muestras



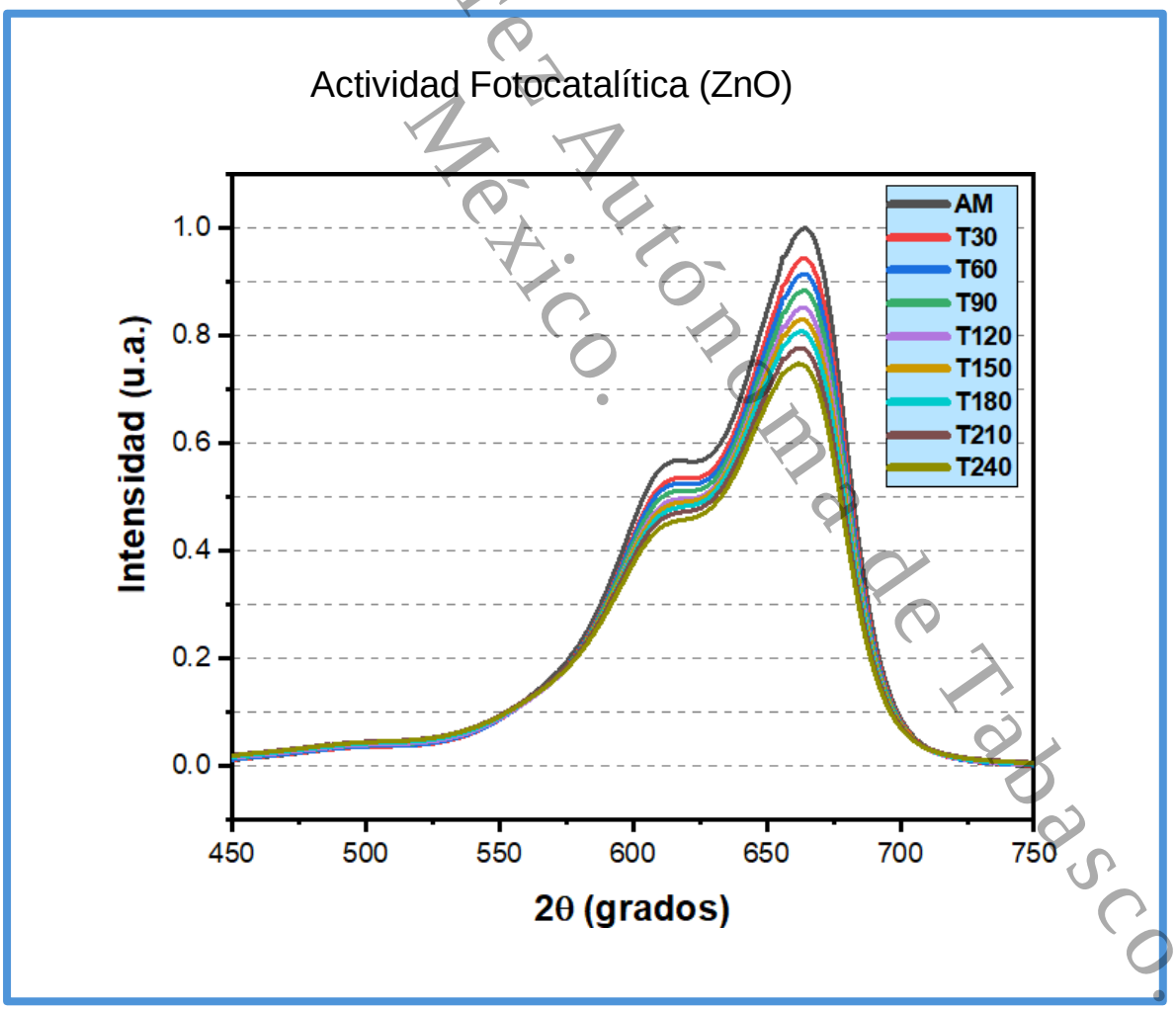
Universidad Juárez Autónoma de México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

4.4. Evaluación de la actividad fotocatalítica

Se llevaron a cabo pruebas fotocatalíticas correspondientes a cada uno de los materiales sintetizados para la investigación, mediante las cuales se obtuvieron los espectros mostrados en las figuras 32 a 34. Se aprecia que para todos los casos existe una variación en la intensidad conforme avanza el tiempo de irradiación UV, lo que indica que los materiales degradan exitosamente, puesto que se nota el deterioro del MB conforme transcurre el tiempo.

Figura 32

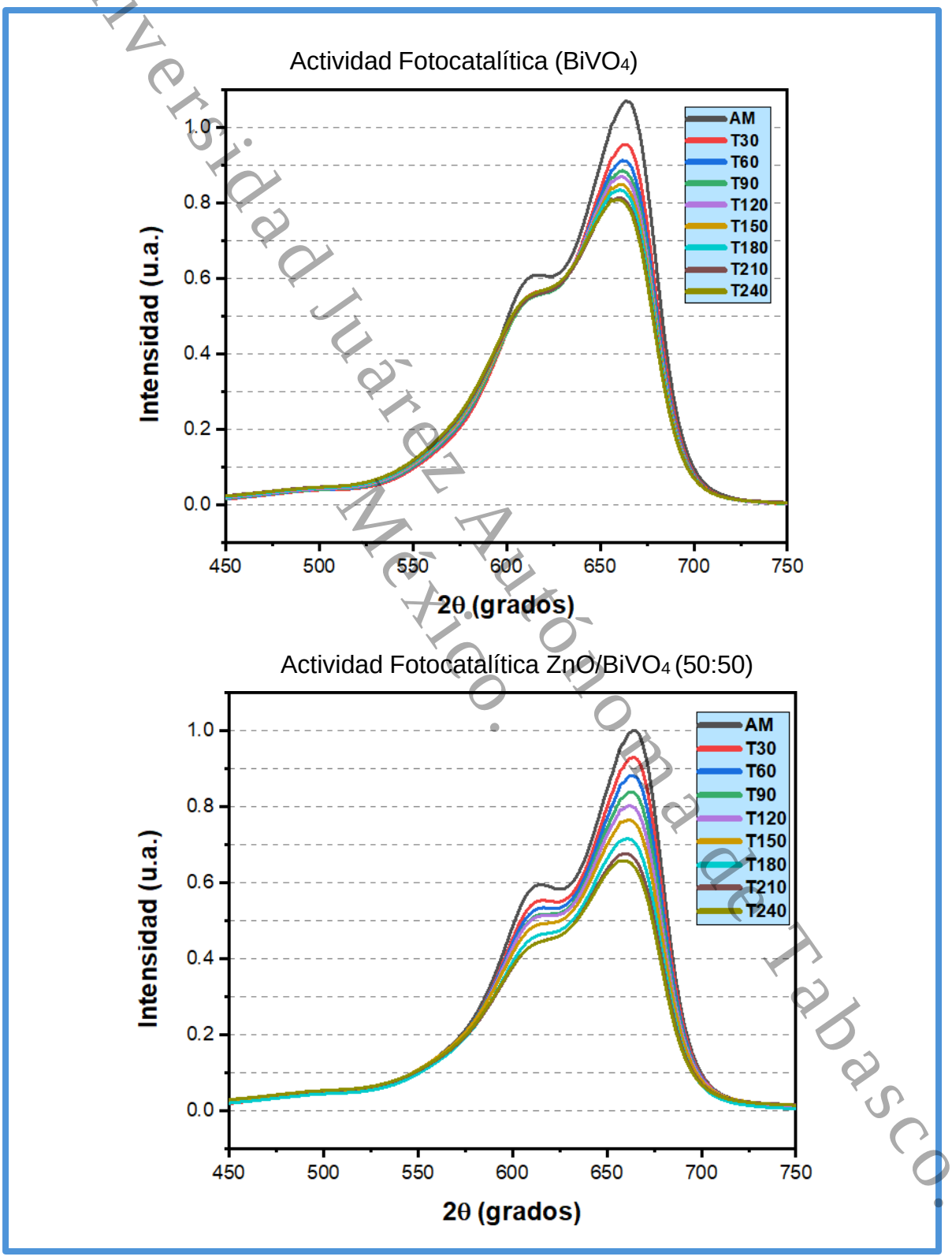
Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador ZnO



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 33

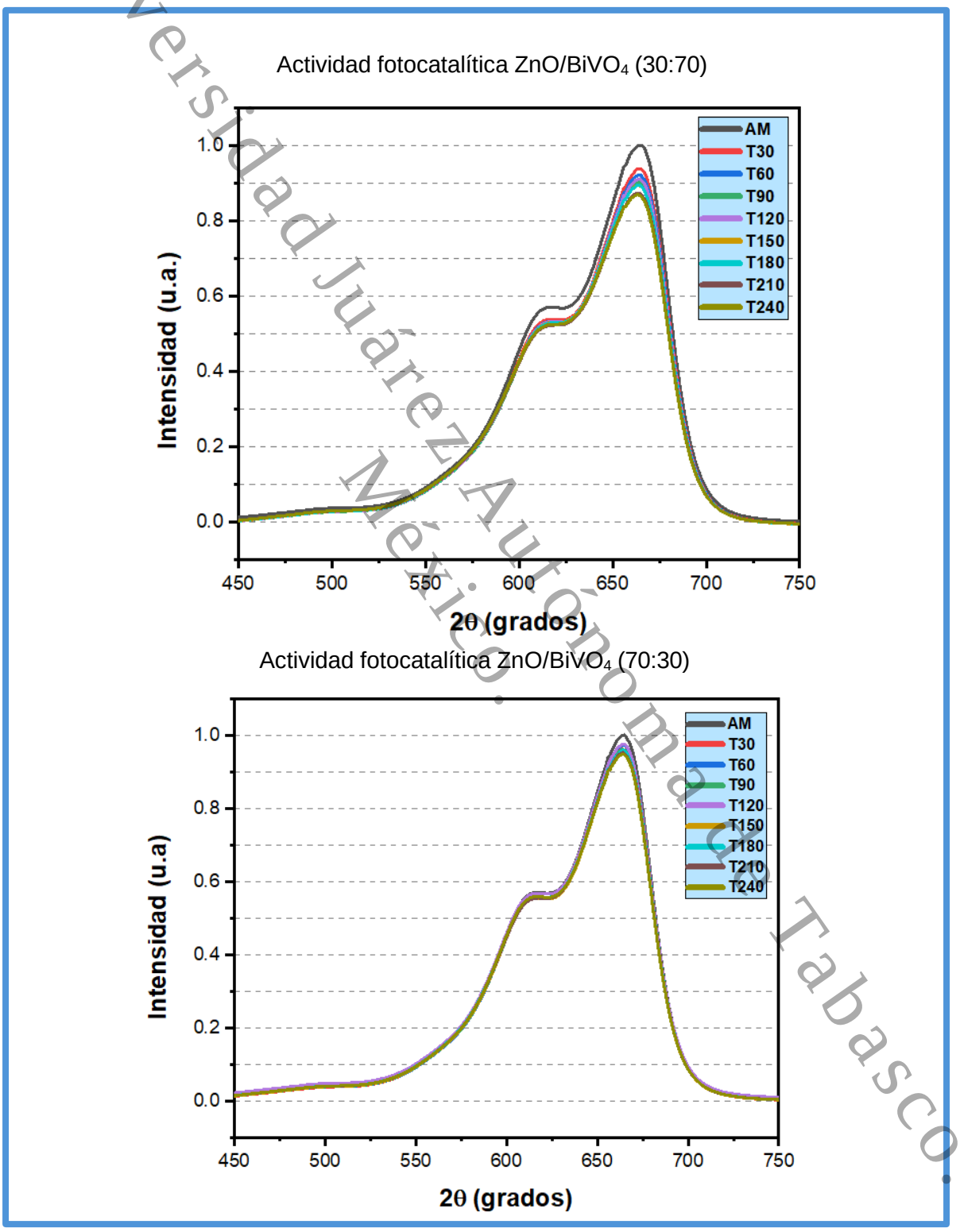
Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador $BiVO_4$ y $ZnO/BiVO_4$



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Figura 34

Espectro de degradación del Azul de Metileno con el fotocatalizador $ZnO/BiVO_4$ (30:70) y (70:30)

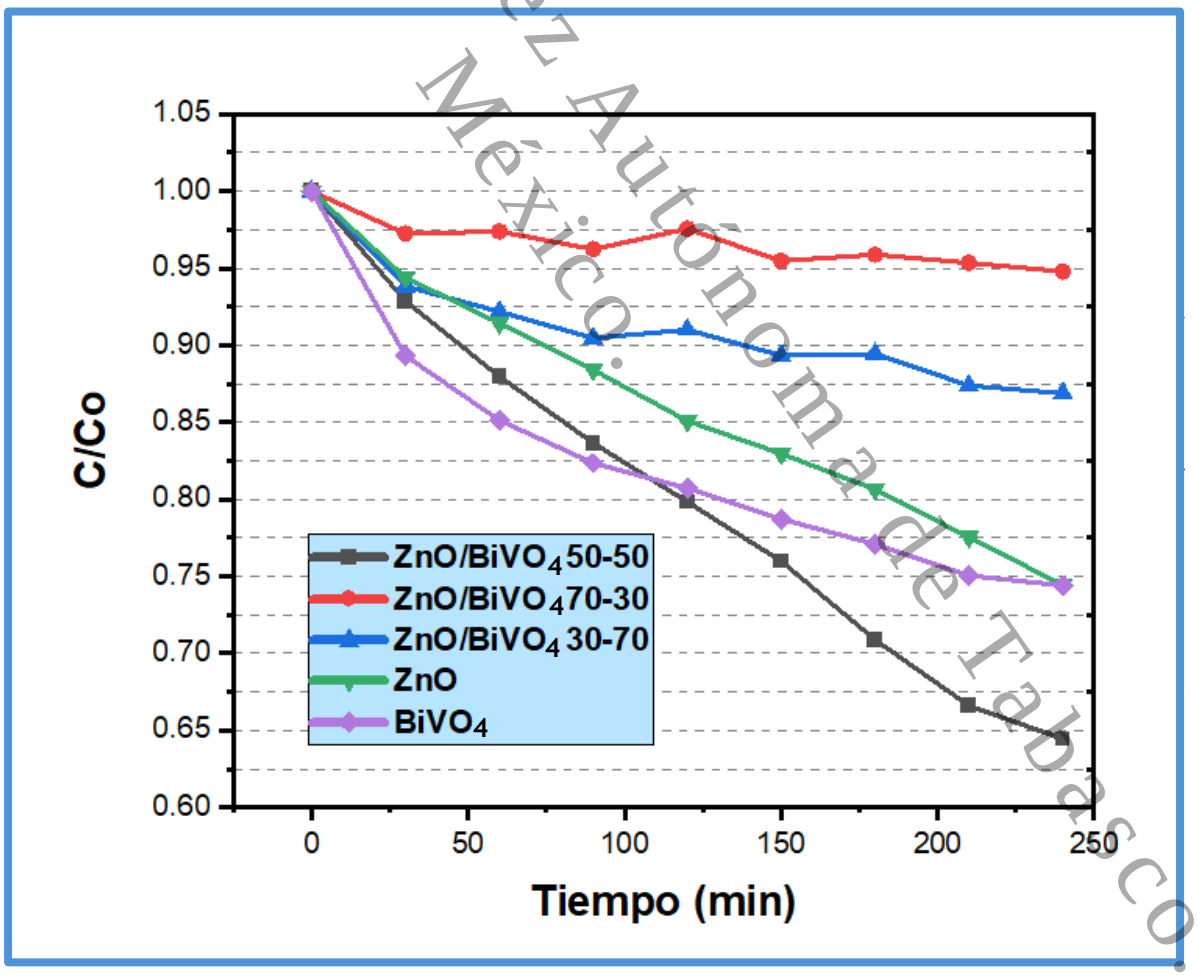


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Posteriormente se presenta un análisis detallado del efecto de degradación, la figura 35 se muestra el grafico correspondiente a la fotodegradación del MB bajo la acción de los siguientes fotocatalizadores ZnO, $BiVO_4$, y el acoplamiento de ambos materiales ZnO/$BiVO_4$ a diferentes proporciones las cuales se mencionaron anteriormente. En el eje de las X se puede observar la duración del experimento de degradación para el cual se inició en un tiempo cero tomando como referencia el MB sin material fotocatalítico y se concluyó en un periodo de 240 min, por su parte el eje de las Y representa la relación entre la concentración (C) de MB en un tiempo determinado con la concentración inicial (Co), donde los valores altos cercanos a uno sugieren poca o nula la degradación del contaminante, por su parte valores bajos de aproximadamente 0.6 o menores representan una favorable degradación. Cada una de las curvas representa un fotocatalizador.

Figura 35

Efectos de degradación del Azul de Metileno con los diferentes fotocatalizadores

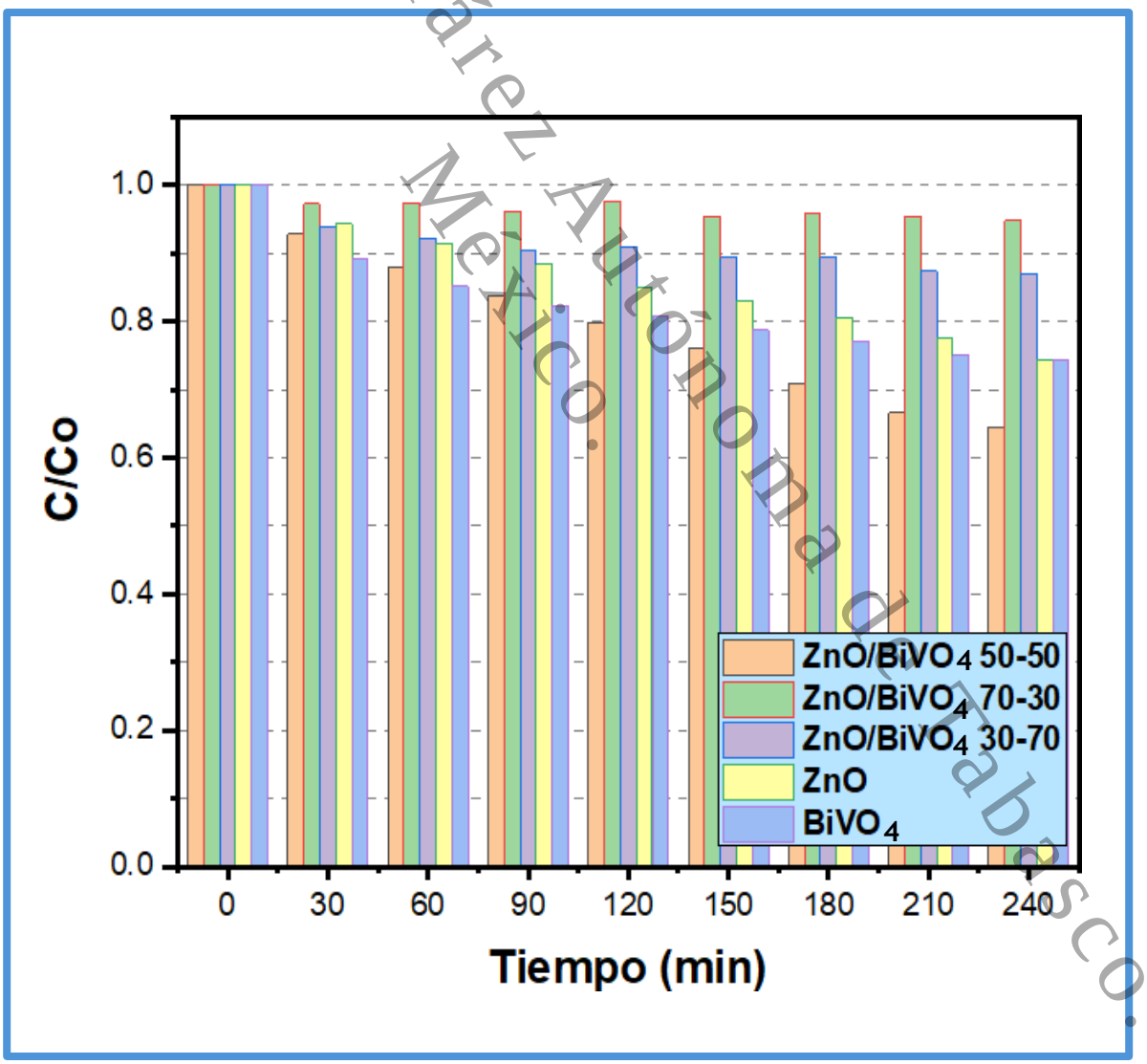


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales para evaluar la degradación del MB a escala de laboratorio. Durante estos ensayos, se varió la concentración de los materiales ZnO, $BiVO_4$ y su acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ en proporciones de (50:50, 70:30 y 30:70). Los resultados obtenidos se registraron a partir de mediciones realizadas con un espectrofotómetro, los cuales se presentan en la siguiente gráfica (figura 36) en ella se puede observar el efecto de degradación con respecto al tiempo para cada uno de los materiales.

Figura 36

Datos experimentales obtenidos de concentración (C) con respecto al tiempo (t) para cada una de las muestras con los diferentes fotocatalizadores



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Una vez obtenidos los datos, se procedió a realizar los cálculos necesarios para obtener el porcentaje de degradación de cada uno de los materiales, para lo cual se aplicó la siguiente formula:

$$\%\ \boldsymbol{Degradación} = \frac{\boldsymbol{Co} - \boldsymbol{Ct}}{\boldsymbol{Co}} * \mathbf{100} \qquad \textbf{(Ecuación 9)}$$

Donde:

$\mathbf{C_0}$ es la concentración inicial,

$\mathbf{C_t}$ es la concentración en el tiempo t (Antonio Ramón et al., 2013)

Al realizar los cálculos para cada uno de los fotocatalizadores se obtuvieron los siguientes valores de efecto de degradación.

Tabla 2. *Valores numéricos obtenidos para el efecto de degradación para cada uno de los materiales*

Material	Ef. Degradación (%)	Curva en la gráfica
ZnO	**25.5687**	Verde
$BiVO_4$	**25.5978**	Morada
ZnO-$BiVO_4$ (50-50)	**35.5499**	Negra
ZnO-$BiVO_4$ (70/30)	**5.21341**	Roja
ZnO-$BiVO_4$ (30/70)	**13.1138**	Azul

Con base en los resultados obtenidos se puede observar que el acoplamiento de ZnO/$BiVO_4$, en combinaciones equitativas (50:50) muestra un incremento significativo en la eficiencia de degradación con un 35.5499 %, esto puede deberse al efecto sinérgico entre ambos materiales. Por lo que este aumento en la eficiencia se atribuye a una mejor separación de cargas electrón-hueco y a una mayor absorción de luz visible debido a una

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

heterounión entre ZnO y $BiVO_4$. Por lo que se puede confirmar que esta heterounión favorece la transferencia de electrones y mejora el rendimiento fotocatalítico, superando de esta forma la degradación de los materiales individuales, se tiene que el ZnO puede degradar un 25.56 % por sí solo, mientras que el $BiVO_4$ degrada un 25.5978 %, presentando ambos materiales una actividad fotocatalítica moderada cuando se utilizan por separado.

Por otra parte, podemos observar que los acoplamientos de los materiales en proporciones desbalanceadas (30:70 y 70:30) no nos generan buenos resultados esto puede deberse a que un exceso de uno de los componentes rompe el equilibrio necesario para mantener una transferencia eficiente de cargas, afectando negativamente la actividad fotocatalítica (Sevik et al., 2020).

De esta forma se cumple lo planteado en la hipótesis de esta investigación, pues el acoplamiento entre ZnO y $BiVO_4$ ha demostrado ser efectivo para mejorar la eficiencia de degradación del contaminante Azul de Metileno.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Capítulo 5. Conclusiones y propuestas

5.1. Conclusiones generales

- Se logró realizar la síntesis adecuada de cada uno de los materiales propuestos (ZnO, $BiVO_4$ y ZnO/$BiVO_4$) mediante el método sol-gel, lo cual se confirmó con el análisis de DRX.
- En los difractogramas se observaron la presencia de los materiales esperados, confirmando que se obtuvieron las fases requeridas: para el ZnO sintetizado se obtuvo una estructura cristalina de tipo Wurtzita, para el $BiVO_4$, se identificaron los planos correspondientes a la fase monoclínica y para el acoplamiento ZnO/$BiVO_4$ se observa la presencia de una combinación de las anteriores.
- Los compositos exhiben intensidades de los picos dependiendo de las proporciones utilizadas para cada preparación.
- Mediante Espectroscopia de reflectancia difusa UV-Vis (DRS) se determinó el valor de la banda prohibida de cada una de las muestras sintetizadas, valor que permite medir la capacidad del material para absorber la luz en el rango visible y UV, midiendo la absorción óptica en un rango de 200 a 800 nm.
- Los valores de banda prohibida calculados son consistentes con la literatura: un rango típico que va entre 3.2- 3.3 eV para el ZnO, mientras que para el $BiVO_4$ se reporta un rango entre 2.4 – 2.5 eV. Por su parte las proporciones propuestas muestran una variación entre los rangos reportados para estos dos materiales lo cual es esperado e indica una excelente reproducibilidad de los materiales con el método empleado.
- En la Espectroscopia Raman (Rs), se logró observar modos vibracionales para el ZnO y el $BiVO_4$, El ZnO presentó una baja intensidad lo que se atribuye a una baja cristalinidad, y posibles efectos de fluorescencia. En contraste la muestra de $BiVO_4$ tiene un espectro bien definido, lo que confirma su buena cristalinidad y pureza. Los acoplamientos muestran una superposición de señales, evidenciando interacciones entre las fases.
- Las pruebas fotocatalíticas mostraron eficiencias frente al MB de aproximadamente 25 % para ZnO y $BiVO_4$. En lo que respecta a los acoplamientos ZnO/$BiVO_4$, la

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

proporción 50:50 mostró un claro aumento en la eficiencia de degradación con un 35,54 % frente al contaminante analizado, aumentando la degradación en un 10 % en comparación con los materiales individuales. A pesar de lo anterior, las proporciones 70:30 y 30:70 mostraron una disminución en este efecto con un porcentaje de 5.21% y 13.11% respectivamente, sustentando la idea de que estas relaciones no son favorables para generar buenos resultados debido a que se rompe el equilibrio debido al exceso de uno de los componentes por lo que no permite una transferencia de cargas eficientemente.

- Podemos decir que se cumple lo planteado en la hipótesis de esta investigación, ya que se demostró que el acoplamiento entre ZnO y $BiVO_4$ ha demostrado ser efectivo para mejorar la eficiencia de degradación del contaminante Azul de Metileno.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

- Para futuras investigaciones se plantean algunas recomendaciones que sugieren mejoras en el efecto de degradación, se sugiere incorporar a la síntesis del ZnO un tiempo de calcinación con el objetivo de mejorar su cristalinidad y con ello promover un porcentaje de degradación más alto, estudios han demostrado que la calcinación en el ZnO mejora notablemente sus características fotocatalíticas porque altera su tamaño, propiedades superficiales, forma y comportamiento óptimo (Saidani et al., 2025).
- De igual forma se plantea explorar otros métodos de síntesis y hacer una comparación con los resultados obtenidos durante este estudio, los métodos de síntesis pueden influir directamente en las propiedades morfológicas y estructurales del material obtenido, lo cual puede tener un efecto significativo en su eficiencia en el tratamiento de contaminantes (Wagh et al., 2023).
- Estudiar la reutilización de los fotocatalizadores sugiere una forma de evaluar su viabilidad económica y operativa en aplicaciones reales. Existen diversos estudios que demuestran que aun cuando se reutilizan por diez ciclos consecutivo los fotocatalizadores como el ZnO siguen siendo tan efectivos como en el primero. Por su parte este comportamiento indica una excelente estabilidad estructural, esto es crucial en procesos de tratamientos de aguas a gran escala porque permite

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México

optimizar recursos y anticiparse a un comportamiento a largo plazo del fotocatalizador (Ani et al., 2024)

- Además, realizar una serie de caracterizaciones más amplia ayudaría de forma considerable a comprender el comportamiento estructural, morfológico y electrónico de los materiales. Por lo tanto, se sugiere complementar con técnicas de análisis como microscopia electrónica de barrido (SEM), y de transición (TEM) las cuales permiten tener una clara visión de la morfología y tamaño de las partículas. De manera semejante el análisis mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (IES) podría proporcionar valiosa información acerca de la transferencia de cargas y la eficiencia en la separación de pares de electrón-hueco (Moscow C Jothivenkatachalam, 2016; Wu et al., 2019).
- Las presentes sugerencias evidencian el amplio campo de estudio que aún se puede explorar para esta investigación, destacando la importancia de continuar mejorando los materiales fotocatalíticos, de esta forma se destaca la importancia de este trabajo, por enfocarse en la recuperación de un recurso que es de vital importancia para la vida de cualquier ser vivo como lo es el agua. Los resultados obtenidos permiten proyectar una continuación prometedora de esta investigación, con la expectativa de lograr una mayor eficiencia en la degradación de contaminantes de una forma económica, sostenible y amigable con el medio ambiente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Referencias

Ani, I. J., Akpan, U. G., Olutoye, M. A., Hameed, B. H., C Egbosiuba, T. C. (2024). Adsorption-photocatalysis synergy of reusable mesoporous TiO2–ZnO for photocatalytic degradation of doxycycline antibiotic. *Heliyon*, *10*(9). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30531

Antonio Ramón, J., David Amaya, J., C Manrique Losada, L. (2013). *Photocatalytic degradation of congo red in a parabolic solar collector and titanium dioxide in suspensión*.

Apella, C., Pizarro, R., Blesa, M. A., Código, E., C Argen, A. (2007). *La contaminación biológica del agua y la desinfección solar*.

Askeland, D. R., C Wright, W. J. (2016). The Science and Engineering of Materials 7th Edition. *Cengage Learning 20 Channel Center Street Boston, MA 02210 USA, ISBN: S78-1-305-07c7c-1*, 180–200.

Aznate, L. A., Onix, T., Cerro, J., Angel, B., C Benitez, O. (2013). *Degradación por fotocatálisis homogénea (foto-fenton) de effuentes líquidos contaminados con residuos de fenol*.

Belousov, A. S. (2024). *Theoretical Foundations of Photocatalysis*. 61–95. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46764-6_3

Belpaire, C., Reyns, T., Geeraerts, C., C Van Loco, J. (2015). Toxic textile dyes accumulate in wild European eel Anguilla anguilla. *Chemosphere*, *138*, 784–791. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.08.007

Bhabal, S. R., C Shimpi, N. G. (2024). *Photocatalysis: Mechanism, Classification and Basic Principles*. 25–46. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66260-7_2

Brinker, C. J., C Scherer, G. W. (2013). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, 1–908. https://doi.org/10.1016/C2009-0-22386-5

C. Ferrer Roca. (2007). Tema 3: Semiconductores 3.1 Semiconductores intrínsecos y dopados. *Universitat de València*, https://www.uv.es/~navasqui/Tecnologia/Tema3.pdf.

Casillas G. O. (2020). *Fotocatalizadores de TiO2 dopados con H y N para remoción de Acesulfamo-K acuoso*.

Ceja Martha E, C. G. G. (2010). Vista de Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. In UNAM (Ed.), *Mundo Nano* (2nd ed., Vol. 3).

Chang, J. Sen, Strunk, J., Chong, M. N., Poh, P. E., C Ocon, J. D. (2020). Multi-dimensional zinc oxide (ZnO) nanoarchitectures as efficient photocatalysts: What is the fundamental factor that determines photoactivity in ZnO *Journal of Hazardous Materials*, *381*, 120958. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.120958

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Correoso Campillo, S. (2023). *Eliminación del colorante azul de metileno de disoluciones acuosas mediante adsorción en adsorbentes compuestos basados en zeolitas*. http://hdl.handle.net/10317/12690

Cubas, J. M., Guadalupe, R., Pimentel, C., Enrique, I., Merlín, M., San, E., C Martínez, M. (2018). La espectroscopia UV-Vis en la evaluación de la viabilidad de células de cáncer de mama I. *J. Phys. Educ*, *12*(2).

De, E., Degradación, L. A., De, D. A., Zno, H. , Tio, /, C Biodegradación Con, Y. (2022). *Evaluación de la degradación del azul de metileno mediante fotocatálisis heterogénea (ZnO/TiO2) y biodegradación con consorcios bacterianos*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.12371/16467

Debalke, A. G., Abebe, B., C Ananda Murthy, H. C. (2024). *Synthesis Techniques for Novel Nanomaterials*. 77–98. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74730-4_5

Deebasree, J. P., Maheskumar, V., C Vidhya, B. (2018a). Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO4 prepared by sol gel method assisted by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, *45*, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.002

Deebasree, J. P., Maheskumar, V., C Vidhya, B. (2018b). Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO4 prepared by sol gel method assisted by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, *45*, 123–132. https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.02.002

Deebasree, J. P., Maheskumar, V., C Vidhya, B. (2018c). Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO4 prepared by sol gel method assisted by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, *45*, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.002

Devraj Kumar, D., Nair, P. B., B, J. V, C Thomas, P. V. (2016). Structural and Optical Properties of Zinc Oxide Nanorads Prepared by Aqueous Solution Route. *Journal of the American Institute of Chemists*, *8S*.

Dippong, T., Török, I., Tănăselia, C., C Resz, M. A. (2025). Impact of water and sediment pollution in Valea Viseu river, Romania. *Process Safety and Environmental Protection*, *1S5*, 106796. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2025.106796

dos Santos, A. B., Cervantes, F. J., C van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*, *S8*(12), 2369–2385. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.11.013

du Plessis, A. (2022). Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions. *One Earth*, *5*(2), 129–131. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005

Elena Armijo Miranda -Nathalia Vanini Basegio Castellani -Brinidilda Dolores Cofrade Romero -Teresa Ramos Carreño, R. (2012). *Contaminantes Químicos del Agua: Contaminación Antropogénica*.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Forgacs, E., Cserháti, T., C Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, *30*(7), 953–971. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2004.02.001

Garcés Giraldo, C., Fernando, L., Franco, M., Alejandro, E., Arango, S., C Julián, J. (2004). *La fotocatálisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013

García Pérez, U. M. (2011). *Síntesis de m-$BiVO_4$ por los métodos de combustión, co-precipitación e hidrotermal en presencia de agentes estructurantes y evaluación de sus propiedades fotocatalíticas*.

García Pérez, U. M., Sepúlveda-Guzmán, S., Martínez-De La Cruz, A., C Ortiz Méndez, U. (2011). Photocatalytic activity of BiVO4 nanospheres obtained by solution combustion synthesis using sodium carboxymethylcellulose. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, *335*(1–2), 169–175. https://doi.org/10.1016/J.MOLCATA.2010.11.030

González A, E. L. H. M. H. J. (2020). *Evaluación de la eficiencia fotocatalítica de nanopartículas de TiO_2, TiO_2-Au y TiO_2-Ag frente a dos colorantes reactivos*. https://zaloamati.azc.uam.mx/items/53a005ea-9bb0-45da-9ca8-1836b8da7d3d

Guo, S., Du, Z., C Dai, S. (2009). Analysis of Raman modes in Mn-doped ZnO nanocrystals. In *Physica Status Solidi (B) Basic Research* (Vol. 246, Issue 10, pp. 2329–2332). https://doi.org/10.1002/pssb.200945192

Hanh, N. H., Thi Minh Nguyet, Q., Van Chinh, T., Duong, L. D., Xuan Tien, T., Van Duy, L., C Hoa, N. D. (2024a). Enhanced photocatalytic efficiency of porous ZnO coral-like nanoplates for organic dye degradation. *RSC Advances*, *14*(21), 14672–14679. https://doi.org/10.1039/d4ra01345j

Hanh, N. H., Thi Minh Nguyet, Q., Van Chinh, T., Duong, L. D., Xuan Tien, T., Van Duy, L., C Hoa, N. D. (2024b). Enhanced photocatalytic efficiency of porous ZnO coral-like nanoplates for organic dye degradation. *RSC Advances*, *14*(21), 14672–14679. https://doi.org/10.1039/D4RA01345J

Hu, F., Luo, W., Hu, Y., Dai, H., C Peng, X. (2019). Insight into the kinetics and mechanism of visible-light photocatalytic degradation of dyes onto the P doped mesoporous graphitic carbon nitride. *Journal of Alloys and Compounds*, *7S4*, 594–605. https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.04.235

Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos , Ing. E. A. L. C. 2. (2020). Semiconductores. Conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.

Ismael, M. (2022). Structure, properties, and characterization of mullite-type materials Bi2M4O9 and their applications in photocatalysis: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(6), 108640. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108640

Universidad Autónoma de Tabasco. México

J.1. Garza-Arévalo, (2015, May 14). *Vista de Evaluación de la Actividad Fotocatalítica del ZnO en la Degradación de Metil y Propil Parabeno*. https://quimicahoy.uanl.mx/index.php/r/article/view/223/189

James Newell. (2009). *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*.

James Newell. (2011). *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*.

Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, *c8*(1), 167–182. https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032

José Mercedes García Vicente. (2021). *Sintesis de semiconductores de zno, ceo$_2$ y zno/ceo2 mediante el método sol-gel y sol-gel asistido por icroondas para su aplicación como fotocatalizadores en la degradación de colorantes.*

Joshi, J., Sanchez-Cortes, S., Joshi, N. V., Aguado, E., C Garcia-Cozar, F. J. (2012). Raman spectroscopic study of transfected HEK293T cells. *Inmunología*, *31*(4), 115–118. https://doi.org/10.1016/J.INMUNO.2012.08.004

Jubu, P. R., Obaseki, O. S., Nathan-Abutu, A., Yam, F. K., Yusof, Y., C Ochang, M. B. (2022). Dispensability of the conventional Tauc's plot for accurate bandgap determination from UV–vis optical diffuse reflectance data. *Results in Optics*, *S*. https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100273

Kamble, G. S., Natarajan, T. S., Patil, S. S., Thomas, M., Chougale, R. K., Sanadi, P. D., Siddharth, U. S., C Ling, Y. C. (2023). $BiVO_4$ As a Sustainable and Emerging Photocatalyst: Synthesis Methodologies, Engineering Properties, and Its Volatile Organic Compounds Degradation Efficiency. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/NANO13091528

Keresztury, G. (2006). *Raman Spectroscopy: Theory*. https://doi.org/10.1002/9780470027325.s0109

Khan, I., Saeed, K., C Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 908–931. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2017.05.011

Khanh Huyen, N. T., Pham, T. D., Dieu Cam, N. T., Van Quan, P., Van Noi, N., Hanh, N. T., Thanh Tung, M. H., C Dao, V. D. (2021). Fabrication of titanium doped BiVO4 as a novel visible light driven photocatalyst for degradation of residual tetracycline pollutant. *Ceramics International*, *47*(24), 34253–34259. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.08.335

Kubiak, A., Jaruga, M., Lusina, A., Nazim, T., Sobańska, K., Pietrzyk, P., C Cegłowski, M. (2025). Real-world application of molecularly imprinted TiO_2-graphite photocatalysts: Efficient pharmaceutical removal under energy-optimized LED system. *Journal of Water Process Engineering*, *cS*, 106894. https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.106894

Laurence M. Peter. (2016). *Photoelectrochemistry: From Basic Principles to Photocatalysis*.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Leyre Marzo y Rebeca Martinez-Haya. (2018). *Vista de Breve introducción a la fotocatálisis homogénea: modos de activación y aplicaciones sintéticas | Anales de Química de la RSEQ*. https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1099/1606

Li, S., Ma, H., Ouyang, P., Li, Y., Duan, Y., Zhou, Y., Ong, W.-J., C Dong, F. (2024). Advanced microwave synthesis strategies for innovative photocatalyst design. *Green Energy & Environment*. https://doi.org/10.1016/J.GEE.2024.11.005

Lin, L., Yang, H., C Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246

López E. Sánches V. (2019). Efecto del pH sobre las propiedades morfológicas, texturales y ópticas de nano partículas de ZnO obtenidas por microondas para la degradación de colorantes sintéticos. *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.

López Guemez, A. del R., Cordero García, A., Cervantes López, J. L., Pérez Vidal, H., C Díaz Flores, L. L. (2024). Evaluation of the photocatalytic activity of ZnO nanorods and nanoflowers grown from seed layers deposited by spin coating. *Boletin de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, *c3*(1), 72–84. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2023.06.003

Luo, H., Wang, P., Wang, Q., Lyu, X., Zhang, E., Yang, X., Han, G., C Zang, L. (2024). Pollution sources and risk assessment of potentially toxic elements in soils of multiple land use types in the arid zone of Northwest China based on Monte Carlo simulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *27S*, 116479. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2024.116479

Ly, J. U. (2021). *Summary Progress Update 2021: SDG c-water and sanitation for all*.

Ma, S., Li, X., Kong, J., Yu, X., C Bai, X. (2024). Light-triggered bactericidal semiconductor nanomaterials: classification, modification and antibacterial strategies. *Applied Materials Today*, *3S*, 102279. https://doi.org/10.1016/J.APMT.2024.102279

Mai, L., Xu, L., C Chen, W. (2023). Synthesis of Vanadium-Based Nanomaterials. *Vanadium-Based Nanomaterials for Electrochemical Energy Storage*, 49–86. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44796-9_3

Marder, M. P. . (2010). *Condensed matter physics*. Wiley.

Martínez Rojas, V. C., Matejova, L., López Milla, A., C F. Cruz, G. J. (2015). Obtención de partículas de tio2 por sol-gel, asistido con ultrasonido para aplicaciones fotocatalíticas. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, *81*(3). https://doi.org/10.37761/rsqp.v81i3.17

Mendo Pérez, E. O., Martínez Juárez, J., Álvaro, J., Hernández De La Luz Co-Director, D., Gabriel, D., C Díaz, J. (2022). *Estudio de la impurificación de óxido de zinc monocristalino dopado con antimonio y ffúor*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.12371/18129

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Moscow, S., C Jothivenkatachalam, K. (2016). Facile microwave assisted synthesis of floral-shaped $BiVO_4$ nano particles for their photocatalytic and photoelectrochemical performances. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *27*(2), 1433–1443. https://doi.org/10.1007/S10854-015-3908-0

Naknonhan, S., Amnuaypanich, S., Randorn, C., Tanthanuch, W., C Amnuaypanich, S. (2025). Pivotal role of CaCO3 in Ca/ZnO photocatalyst for promoting the degradation of trichlorophenol. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(2), 115501. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115501

Nidheesh, P. V., Zhou, M., C Oturan, M. A. (2018). An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, *1S7*, 210–227. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.195

Obaid Qamar, M., Balu, K., C Ahn, Y. H. (2024a). BiVO4-Driven photocatalytic degradation of pharmaceutical in Slurry Bubble Column Reactor: Influencing factors and toxicological profiling. *Chemical Engineering Journal*, *4Sc*, 153526. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.153526

Obaid Qamar, M., Balu, K., C Ahn, Y. H. (2024b). $BiVO_4$-Driven photocatalytic degradation of pharmaceutical in Slurry Bubble Column Reactor: Influencing factors and toxicological profiling. *Chemical Engineering Journal*, *4Sc*, 153526. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.153526

Ogugbue, C. J., C Sawidis, T. (2011). Bioremediation and Detoxification of Synthetic Wastewater Containing Triarylmethane Dyes by Aeromonas hydrophila Isolated from Industrial Effluent . *Biotechnology Research International*, *2011*, 1–11. https://doi.org/10.4061/2011/967925

Pérez Jiménez, L. (2020). *Síntesis y evaluación antibacterial del nanocomposito de ag/tio2/zno obtenido mediante sol gel*.

Quevedo, A. C., Guggenheim, E., Briffa, S. M., Adams, J., Lofts, S., Kwak, M., Lee, T. G., Johnston, C., Wagner, S., Holbrook, T. R., Hachenberger, Y. U., Tentschert, J., Davidson, N., C Valsami-Jones, E. (2021). UV-Vis Spectroscopic Characterization of Nanomaterials in Aqueous Media. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, *17c*, e61764. https://doi.org/10.3791/61764

R. López Ahumada. (2002). Principios básicos de semiconductores. *Universidad de Huelva*. https://www.uhu.es/rafael.lopezahumada/descargas/Tema1_introtec.pdf.

Rasheed, H. M., Aroosh, K., Meng, D., Ruan, X., Akhter, M., C Cui, X. (2025). A review on modified ZnO to address environmental challenges through photocatalysis: Photodegradation of organic pollutants. *Materials Today Energy*, *48*, 101774. https://doi.org/10.1016/J.MTENER.2024.101774

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., C Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Bioresource Technology, *77*(3), 247–255. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8

Rocha Juan, L. E. (2020). *Semiconductores. Conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.*

Saidani, A., Boudraa, R., Fendi, K., Benouadah, L., Benabbas, A., Djermoune, A., Salvestrini, S., Bollinger, J. C., Alayyaf, A. A., C Mouni, L. (2025). Effect of Calcination Temperature on the Photocatalytic Activity of Precipitated ZnO Nanoparticles for the Degradation of Rhodamine B Under Different Light Sources. *Water (Switzerland)*, *17*(1). https://doi.org/10.3390/w17010032

Salazar, M., Puebla, V., C Septiembre, P. (2022). *Análisis teórico de la nanopartícula (TiO2)20 como posible removente del contaminante azul de metileno*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.12371/18401

Samadi, M., Zirak, M., Naseri, A., Kheirabadi, M., Ebrahimi, M., C Moshfegh, A. Z. (2019a). Design and tailoring of one-dimensional ZnO nanomaterials for photocatalytic degradation of organic dyes: a review. *Research on Chemical Intermediates*, *45*(4), 2197–2254. https://doi.org/10.1007/s11164-018-03729-5

Samadi, M., Zirak, M., Naseri, A., Kheirabadi, M., Ebrahimi, M., C Moshfegh, A. Z. (2019b). Design and tailoring of one-dimensional ZnO nanomaterials for photocatalytic degradation of organic dyes: a review. *Research on Chemical Intermediates*, *45*(4), 2197–2254. https://doi.org/10.1007/S11164-018-03729-5

Sayra L, O. J. M. barrera A. A. G. J. A. G. M. (2010, January). *Decoloración fotocatalítica homogénea y heterogénea de un colorante azoico, empleando como catalizador dióxido de titanio dopado con hierro soportado sobre sílice (Fe/TiO2/SiO2)*.

Schneider, Jenny. B. Detlef. Y. Jinhua. L. P. Gianluca. D. D. D. (2016). *Fotocatálisis: fundamentos y perspectivas* (J. Schneider, D. Bahnemann, J. Ye, G. Li Puma, C D. D. Dionysiou, Eds.). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/9781782622338

Semiconductores: qué son, materiales y tipos | Repsol. (n.d.). Retrieved February 20, 2025, from https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/semiconductores/index.cshtml?utm_source=chatgpt.com

Sevik, A., Coskun, B., C Soylu, M. (2020). The effect of molar ratio on the photo-generated charge activity of ZnO–CdO composites. *The European Physical Journal Plus 2020 135:1*, *135*(1), 1–16. https://doi.org/10.1140/EPJP/S13360-020-00129-W

Singh, S., Gade, J., Dakeshwar V., Berdimurodov E., C Jain, B. (2024). Exploring ZnO nanoparticles: UV–visible analysis and different size estimation methods. *Optical Materials*, *152*, 115422. https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2024.115422

Singh, S., Gade, J. V., Verma, D. K., Elyor, B., C Jain, B. (2024). Exploring ZnO nanoparticles: UV-visible analysis and different size estimation methods. *Optical Materials*, *152*, 115422. https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2024.115422

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Singh Saini, G., Kumari, M., Magdaline Eljeeva Emerald, F., C Singh Saini, G. (2023). International Journal of Statistics and Applied Mathematics 2023; SP-8(3): 630-634 Investigating structural changes of ZnO nanoparticles using powder X-ray diffraction over 6 months. *Maths*, *8*(3), 630–634.

Smith, V. H., Tilman, G. D., C Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, *100*(1–3), 179–196. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3

Song, H., Sun, J., Shen, T., Deng, L., C Wang, X. (2021). Insights into the mechanism of the bi/bivo4 composites for improved photocatalytic activity. *Catalysts*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/catal11040489

Sun, Y., Wu, Y., Cai, D., Zou, D., C Li, Y. (2025). Enhanced adsorption-photocatalysis synergy by S-scheme In-MOG/carbon doped ZnO for rapid chlortetracycline removal: Exploring synergistic mechanisms, environmental implications and continuous flow applications. *Separation and Purification Technology*, *354*, 129394. https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2024.129394

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., C Sutton, D. J. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environment. In *PubMed* (Vol. 52, pp. 133–164). https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Thalluri, S. R. M., Martinez-Suarez, C., Virga, A., Russo, N., C Saracco, G. (2013). Insights from Crystal Size and Band Gap on the Catalytic Activity of Monoclinic BiVO4. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 305–309. https://doi.org/10.7763/ijcea.2013.v4.315

Torres-Hernández, J. R., Ramírez-Morales, E., Rojas-Blanco, L., Pantoja-Enriquez, J., Oskam, G., Paraguay-Delgado, F., Escobar-Morales, B., Acosta-Alejandro, M., Díaz-Flores, L. L., C Pérez-Hernández, G. (2015). Structural, optical and photocatalytic properties of ZnO nanoparticles modified with Cu. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.009

UNAM. (2022). *Espectroscopía de UV-Visible | Enlace UNAM*. https://enlace.unam.mx/espectroscopia-de-uv-visible/?utm_source=chatgpt.com

Valentin Clavero, V. S. et, al. (2015). Posible uso de espectroscopia Raman como herramienta de análisis en la producción y control de calidad de Bacanora. *Universidad de Ciencias Aplicadas Offenburg, Badstr. 24, 77c52, Offenburg, Alemania.*, *Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo*.

Van Duy, L., Hanh, N. H., Son, D. N., Hung, P. T., Hung, C. M., Van Duy, N., Hoa, N. D., Van Hieu, N., C Ke, F. (2019). Facile Hydrothermal Synthesis of Two-Dimensional Porous ZnO Nanosheets for Highly Sensitive Ethanol Sensor. *Journal of Nanomaterials*, *201S*. https://doi.org/10.1155/2019/4867909

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Velandia C, H. M. (2018). Difracción de rayos X: un mundo de aplicaciones por descubrir. *Ingeciencia*, *2*(2), 67–75. https://revistas.ucentral.edu.co/index.php/Ingeciencia/article/view/2685

Wagh, S. S., Kadam, V. S., Jagtap, C. V., Salunkhe, D. B., Patil, R. S., Pathan, H. M., C Patole, S. P. (2023). Comparative Studies on Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity of Ag Doped ZnO Nanoparticles. *ACS Omega*, *8*(8), 7779–7790. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07499

Wang, W., Fan, M., Zhang, Z., Wu, L., Liu, Y., Cao, Y., C Peng, W. (2025). In-situ nanofication of Cu-doped BiVO4 on montmorillonite nanosheets with enhanced photocatalytic efficiency for phenolic degradation. *Separation and Purification Technology*, *3c1*, 131341. https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2024.131341

Wu, Z., Chen, X., Liu, X., Yang, X., C Yang, Y. (2019). A Ternary Magnetic Recyclable ZnO/Fe3O4/g-C3N4 Composite Photocatalyst for Efficient Photodegradation of Monoazo Dye. *Nanoscale Research Letters*, *14*. https://doi.org/10.1186/S11671-019-2974-2

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

ANEXO

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis	OBTENCIÓN DE MATERIALES DE ZnO/$BiVO_4$ POR MÉTODO SOL-GEL PARA LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE AZUL DE METILENO
Autora	Ana Lilia Crisanto Benítez
ORCID	0009-0005-5647-0030
Resumen de la Tesis:	La creciente presencia de contaminantes orgánicos en cuerpos de agua, especialmente colorantes como el Azul de Metileno (MB), representa una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud humana. En este contexto, la presente investigación se enfoca en la síntesis de materiales compuestos de óxido de zinc (ZnO) y vanadato de bismuto ($BiVO_4$) mediante el método sol-gel, con el propósito de evaluar su eficiencia en la degradación fotocatalítica de MB. Se llevaron a cabo tres síntesis principales: ZnO, $BiVO_4$ y sus combinaciones en diferentes proporciones (30:70, 50:50 y 70:30). Los materiales obtenidos fueron caracterizados mediante Difracción de Rayos X (DRX), espectroscopía Raman (RS) y espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa (DRS), confirmando su estructura cristalina y propiedades ópticas. Posteriormente, se evaluó la actividad fotocatalítica de cada material bajo irradiación visible durante 240 minutos. Los resultados demostraron que los fotocatalizadores compuestos ZnO/$BiVO_4$ presentan una mayor eficiencia en la degradación de MB en comparación con los materiales individuales, siendo la proporción 50:50 la más efectiva. Esta mejora se atribuye a la sinergia entre ambos semiconductores, que favorece la separación de pares electrón-hueco y una mayor absorción de luz visible. Este estudio aporta una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas, proponiendo el uso

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

	de materiales semiconductores accesibles, no tóxicos y eficientes bajo condiciones ambientales, aprovechando la energía solar como fuente renovable en el proceso de descontaminación.
Palabras clave	• Fotocatálisis heterogénea • síntesis de $ZnO/BiVO_4$ • Método sol-gel • Azul de metileno • Tratamiento de aguas residuales.
Referencias	

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México