



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



ESTUDIO DEL COMPOSITO CdS-TiO₂/ZEOLITA PARA PROCESOS FOTOCATALÍTICOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. HUGO ARMANDO DE LA CRUZ HERNÁNDEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES

EN CODIRECCIÓN:

DRA. MARCELA DEL CARMEN ARELLANO CORTAZA



DIRECCIÓN

CUNDUACÁN, TABASCO; MARZO 2026

Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Cunduacán, Tabasco, el día 27 del mes de Marzo del año 2026, el que suscribe C. Hugo Armando de la Cruz Hernández alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 232D19002 adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y titulada: "Estudio del compósito CdS-TiO₂/Zeolita para procesos fotocatalíticos" dirigido por el Dr. Erik Ramírez Morales.

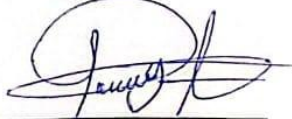
DECLARO QUE:

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

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

Villahermosa, Tabasco a 27 de marzo de 2026.

Autoriza



Hugo Armando de la Cruz Hernández



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/361/2026
FECHA: 19 de marzo de 2026
ASUNTO: Autorización
de examen

ING. HUGO ARMANDO DE LA CRUZ HERNÁNDEZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En respuesta a su solicitud de autorización del examen de grado, bajo la modalidad de Tesis denominado: **"Estudio del composito CdS-TiO₂/zeolita para procesos fotocatalíticos"**, por este medio me permito comunicarle que la solicitud es aceptada por lo que deberá proseguir con los trámites respectivos.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE



DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA

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



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2026
año de
Margarita
Maza

JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 13 de Marzo de 2026.

MEM/AP-DAIA/69/2026


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

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"Estudio del composito CdS-TiO₂/zeolita para procesos fotocatalíticos"

Desarrollado por la Ing: **HUGO ARMANDO DE LA CRUZ HERNÁNDEZ**, de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.


COMITÉ SINODAL


DRA. ANGÉLICA SILVESTRE LÓPEZ RODRÍGUEZ
PRESIDENTE


DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
SECRETARIO


DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
VOCAL 1


DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
VOCAL 2

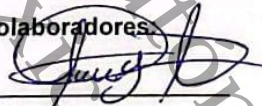

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
VOCAL 3

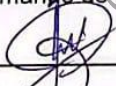
Carta de Cesión de Derechos


Villahermosa, Tabasco a 27 de marzo de 2026

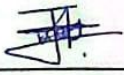
Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como autor en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "Estudio del compuesto CdS-TiO₂/Zeolita para procesos fotocatalíticos".

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

Colaboradores


Ing. Hugo Armando de la Cruz Hernández

Dr. Erik Ramírez Morales

Dra. Marcela del Carmen Arellano Cortaza**Testigos**

MCI. José Mercedez García

Vicente



MCGI. Francisco Jvier Domínguez

de los Santos

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía en cada paso; por darme fortaleza en los momentos más difíciles y sabiduría para continuar cuando el camino parecía incierto. Gracias por cada oportunidad y por darme la capacidad de superar los obstáculos que se presentaron en este proceso.

A las personas que realmente confiaron en mí y me brindaron su apoyo sincero durante esta etapa, especialmente a aquellos familiares que estuvieron presentes con palabras de aliento y respaldo en momentos clave. Su confianza fue un impulso importante para seguir adelante.

Y, de manera especial, a mí mismo, por la perseverancia, el sacrificio y la determinación que hicieron posible culminar este proyecto. Este logro es el resultado del esfuerzo constante, de la disciplina y del compromiso asumido desde el inicio, incluso cuando las circunstancias no fueron sencillas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Agradecimientos

La culminación de esta tesis es el resultado de una etapa de esfuerzo, aprendizaje y perseverancia, en la que muchas personas han sido fundamentales.

- ❖ A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), mi máxima casa de estudios, por permitirme el uso de los laboratorios del Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT), donde se desarrolló gran parte de este trabajo.
- ❖ A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada, cuya confianza y apoyo hicieron posible la realización de este proyecto.
- ❖ Al Dr. Erik Ramírez Morales, por su orientación, exigencia académica y compromiso con la calidad del trabajo científico. Su experiencia fue clave para el desarrollo de este proyecto; agradezco profundamente sus consejos, su confianza en mí y el impulso constante para superarme, aun en los momentos más desafiantes.
- ❖ A la Dra. Marcela del Carmen Arellano Cortaza, por su valioso acompañamiento como codirectora, por su disposición constante, sus observaciones precisas y su apoyo significativo en la elaboración y mejora de esta investigación. Su guía y dedicación fueron determinantes para fortalecer la calidad académica de este trabajo.
- ❖ A la Dra. Lizeth Rojas Blanco, por su labor como revisora y por sus observaciones académicas, que contribuyeron al rigor y la mejora de este documento.
- ❖ A mi amigo José Mercedes, por su presencia a lo largo de este proceso, por su cariño, confianza y respaldo incondicional.
- ❖ A los docentes del posgrado, por compartir con generosidad sus conocimientos y por sembrar en mí una visión crítica, científica y profesional que orientó cada etapa de esta investigación.

- ❖ Al Mtro. Diego y al Mtro. Víctor, por su disposición para orientarme siempre que lo necesité. Sus enseñanzas, comentarios y tiempo fueron determinantes para consolidar ideas, corregir rumbos y fortalecer la calidad de este trabajo.
- ❖ A mis compañeros de laboratorio, por el compañerismo, la colaboración y las valiosas experiencias compartidas en el día a día. Su apoyo técnico y humano hizo más llevadero el camino y enriqueció el proceso de investigación.
- ❖ Al Mtro. Emilio, Mtro. Francisco y Mtro. Francisco Javier por su amistad sincera y su acompañamiento constante.
- ❖ A la Ing. Karely Cristal, por su amistad, su aliento y su apoyo en momentos decisivos.
- ❖ Al Dr. Juan Carlos y Mtro Ricardo, por su amistad, sus consejos y las oportunas palabras de ánimo que me acompañaron en momentos clave.
- ❖ Finalmente, gracias a todas las personas que, con un gesto, un consejo o una palabra de aliento, aportaron a la realización de esta meta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de figuras	12
Índice de tablas	14
Resumen	16
Abstract	17
Capítulo 1. Introducción.....	18
1.1 Planteamiento del problema	18
1.2 Justificación	20
1.3 Hipótesis	22
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Estructura de la tesis	22
Capítulo 2. Marco Teórico	23
2.1 Antecedentes.....	23
2.2 Semiconductores	25
2.3 Generalidades del TiO ₂	27
2.4 Generalidades del CdS.....	29
2.5 Impurificación de los semiconductores	30
2.6 Materiales porosos	31
2.6.1 Zeolitas naturales.....	33
2.6.2 Zeolitas sintéticas.....	34
2.7 Proceso Sol Gel.....	35
2.8 Fotocatálisis.....	37
2.9 Técnicas de caracterización	38

	10
2.9.1 Difracción de Rayos X (DRX).....	38
2.9.2 Espectroscopía UV-Vis	41
2.9.3 Espectroscopía Raman	42
2.9.4 Fisisorción de nitrógeno	43
2.9.4.1 Clasificación de isothermas según IUPAC	43
2.9.5 Espectroscopía de fotoluminiscencia	45
Capítulo 3. Desarrollo experimental	47
3.1 Metodología.....	47
3.1.1 Síntesis del dióxido de titanio (TiO ₂)	47
3.1.2 Síntesis de sulfuro de cadmio (CdS).....	48
3.1.3 Síntesis de CdS-TiO ₂	50
3.1.4 Síntesis de CdS-TiO ₂ /Zeolitas.....	50
3.2 Condiciones de operación de las técnicas de caracterización.....	51
3.2.1 Difracción de rayos X (DRX).....	51
3.2.2 Espectroscopía UV-Visible (UV-Vis).....	52
3.2.3 Espectroscopía Raman.....	52
3.2.4 Fisisorción de nitrógeno (N ₂).....	52
3.2.5 Espectroscopía de Fotoluminiscencia (PL)	52
3.3 Fotocatálisis (evaluación del desempeño fotocatalítico).....	53
4.1 Difracción de rayos X (DRX).....	54
4.1.1 Dióxido de titanio soportado en zeolita natural (TiO ₂ /CLI1.5).....	54
4.1.2 Dióxido de titanio soportado en zeolita sintética tipo A (TiO ₂ /NaA1.5).....	55
4.1.3 Sulfuro de cadmio (CdS).....	56
4.1.4 Compósito TiO ₂ -CdS soportado en zeolita natural (TiO ₂ -CdS/CLI).....	57
4.1.5 Compósito TiO ₂ -CdS soportado en zeolita sintética tipo A (TiO ₂ -CdS/NaA).....	59

4.2 Espectros UV-Vis y banda prohibida.	63
4.2.1 Espectros de absorbancia UV-Vis de TiO ₂ , CdS, CLI, NaA y TiO ₂ -zeolita....	63
4.2.2 Estimación de la banda prohibida de TiO ₂ , CdS y TiO ₂ - zeolita.....	64
4.2.3 Espectros UV-Vis de los compósitos TiO ₂ -CdS con soportes zeolíticos (CLI, NaA).....	65
4.2.4 Estimación de la banda prohibida de los compósitos TiO ₂ -CdS/zeolita (CLI y NaA).....	66
4.3 Espectroscopía Raman	68
4.3.1 TiO ₂ , CdS y compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolita.....	68
4.4 Fisisorción de nitrógeno (N ₂)	70
4.4.1 Isotermas de adsorción-desorción de N ₂ de los compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas CLI y NaA.....	70
4.5 Fotoluminiscencia (PL)	74
4.5.1 Espectros de TiO ₂ , CdS y compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas CLI y NaA.....	74
4.6 Fotocatálisis.....	76
4.6.1 Degradación del azul de metileno bajo radiación UV para TiO ₂ y compósitos TiO ₂ /zeolitas.....	76
4.6.2 Degradación del azul de metileno bajo simulador solar para compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas (CLI y NaA).....	80
4.6.3 Efecto de degradación del azul de metileno	82
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	85
Referencias citadas	87
Anexos.....	106

Índice de figuras

Figura 1 Esquemas de separación de las bandas de energía de los materiales conductores, semiconductores y aislantes.....	27
Figura 2 Estructura cristalina del dióxido de titanio: (a) fase anatasa, (b) fase rutilo y c) brookita	28
Figura 3 Estructura del sulfuro de cadmio (CdS). (a) blenda cúbica de zinc (b) wurtzita hexagonal.....	30
Figura 4 <i>Distribución representativa del tamaño de poro en materiales microporosos, mesoporosos y macroporosos.</i>	32
Figura 5 Configuración experimental del difractómetro de rayos X.	39
Figura 6 Interferencia constructiva entre ondas dispersadas por planos cristalinos.....	40
Figura 7 Estructura básica de los espectrofotómetros.....	41
Figura 8 Clasificación de isothermas de adsorción según la IUPAC.....	43
Figura 9 Clasificación de lazos de histéresis según la IUPAC.	44
Figura 10 Proceso de obtención del dióxido de titanio (TiO ₂).....	48
Figura 11 Representación gráfica de la obtención del sulfuro de cadmio (CdS)	49
Figura 12 <i>Esquema del montaje experimental y secuencia de muestreo en las pruebas fotocatalíticas.</i>	53
Figura 13 Difractogramas de rayos X del TiO ₂ , la zeolita natural (CLI) y el compuesto TiO ₂ -CLI1.5.	55
Figura 14 Difractogramas de rayos X del TiO ₂ , la zeolita sintética (NaA) y el compuesto TiO ₂ -NaA1.5.....	56
Figura 15 Difractograma de rayos X del sulfuro de cadmio (CdS).	57
Figura 16 Difractogramas de rayos X de los compósitos TiO ₂ -CdS/CLI con diferentes proporciones de zeolita natural (a) y su ampliación en el rango $2\theta = 20^\circ - 40^\circ$ (b).	59
Figura 17 Difractogramas de rayos X de los compósitos TiO ₂ -CdS/NaA con diferentes proporciones de zeolita sintética.	60
Figura 18. a) Análisis W-H de las partículas de TiO ₂ utilizando el modelo UDM. Ajuste lineal de los datos, la tensión se extrae de la pendiente y el tamaño de cristalito se obtiene empleando la intersección con el eje de las ordenadas. b) Tamaño de cristal y c) parámetros de red de la estructura tetragonal de la fase anatasa.	61

Figura 19 Espectros de absorbancia UV-Vis de TiO ₂ , CdS, zeolitas (CLI y NaA) y sus compósitos TiO ₂ /zeolita.....	64
Figura 20 Determinación de la energía de banda prohibida (E _g) de TiO ₂ , CdS y los compósitos TiO ₂ /zeolita.....	65
Figura 21 Espectros de absorbancia UV-Vis de los compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA).	66
Figura 22 Determinación de la energía de banda prohibida (E _g) de los compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA) mediante el método de Kubelka–Munk.	67
Figura 23 Espectros Raman de TiO ₂ , CdS, zeolitas (CLI y NaA) y compósitos TiO ₂ -CdS/zeolita, mostrando el intervalo completo y la ampliación en el rango 100-400 cm ⁻¹	70
Figura 24 <i>Isotermas de adsorción-desorción de N₂ de los compósitos TiO₂-CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA): (a) TiO₂-CdS/CLI0.5, (b) TiO₂-CdS/NaA0.5, (c) TiO₂-CdS/NaA1.5, 23 (d) TiO₂-CdS/CLI1.5 y 23 (e) TiO₂.</i>	73
Figura 25 Espectros de fotoluminiscencia (PL) de los compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA), comparados con el TiO ₂ y el CdS puros.	75
Figura 26 Espectros de absorción registrados durante la degradación del azul de metileno (MB).....	77
Figura 27 Degradación del azul de metileno bajo radiación UV para CdS–TiO ₂ y compósitos TiO ₂ -CdS/zeolitas.....	79
Figura 28 Espectros de absorción registrados durante la degradación del azul de metileno (MB) empleando los compósitos TiO ₂ -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA) bajo irradiación solar simulada	81
Figura 29 <i>Eficiencia de degradación del azul de metileno bajo radiación UV y luz simulada (SIM) para los compósitos TiO₂, TiO₂/zeolitas y TiO₂-CdS/zeolitas.</i>	83

Índice de tablas

Tabla 1 Reactivos usados durante la síntesis de TiO ₂	47
Tabla 2 Reactivos de sulfuro de cadmio (CdS).....	48
Tabla 3 Lista de las etiquetas utilizadas para la identificación de las muestras sintetizadas.	51
Tabla 4. Parámetros estructurales estimados por DRX de las partículas de TiO ₂ sintetizadas con diferentes porcentajes de zeolitas, natural y sintética.....	63
Tabla 5 Propiedades texturales por fisisorción de N ₂ a 77 K. Área específica por BET, volumen de poro y tamaño de poro.....	74

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



**ESTUDIO DEL COMPÓSITO CdS-TiO₂/ZEOLITA
PARA PROCESOS FOTOCATALÍTICOS**

Resumen

En este trabajo se desarrolló un estudio sobre la síntesis y evaluación fotocatalítica de compósitos CdS-TiO₂/zeolita, empleando zeolitas naturales (clinoptilolita) y sintética (NaA) como soportes estructurales. Los materiales fueron obtenidos mediante la técnica sol-gel, con el objetivo de favorecer la dispersión de las fases semiconductoras y mejorar la respuesta a la radiación visible. La caracterización estructural por Difracción de Rayos X (DRX) confirmó la formación de la fase anatasa del TiO₂ y la fase cúbica blenda de zinc del CdS, evidenciando una distribución homogénea sobre la superficie porosa de las zeolitas.

Las pruebas fotocatalíticas se realizaron utilizando azul de metileno (10 ppm) como contaminante modelo bajo irradiación de un simulador solar, con un tiempo total de reacción de 240 min. Los resultados mostraron que el acoplamiento del CdS con TiO₂ y su incorporación en la matriz zeolítica incrementaron la eficiencia de degradación en comparación con los sistemas individuales. En particular, el compuesto TiO₂-CdS/CL1.5-SIM presentó la mayor actividad fotocatalítica, lo que se atribuye al efecto sinérgico entre las fases semiconductoras y la elevada área superficial de la zeolita natural. Estos hallazgos confirman el potencial del sistema híbrido CdS-TiO₂/zeolita como material sostenible para la remoción de contaminantes orgánicos en medios acuosos.

Palabras claves

Fotocatálisis, TiO₂, CdS, zeolita, azul de metileno.

Abstract

The synthesis and photocatalytic evaluation of CdS–TiO₂/zeolite composites were conducted using natural clinoptilolite and synthetic NaA zeolites as structural supports. The sol-gel technique facilitated homogeneous dispersion of the semiconductor phases and improved visible-light response. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of the anatase phase of TiO₂ and the cubic zinc blende phase of CdS, indicating uniform distribution across the porous zeolite surface.

Photocatalytic activity was evaluated using methylene blue (10 ppm) as a model contaminant under solar simulator irradiation for 240 minutes. The results indicated that coupling CdS with TiO₂ and incorporating the composite into the zeolitic matrix significantly enhanced degradation efficiency compared to individual systems. The TiO₂-CdS/CLI1.5-SIM composite demonstrated the highest photocatalytic performance, which is attributed to the synergistic interaction between the semiconductors and the high surface area of the natural zeolite. These results underscore the potential of the CdS–TiO₂/zeolite hybrid system as a sustainable material for the removal of organic pollutants from aqueous environments.

Keywords:

Photocatalysis, TiO₂, CdS, zeolite, methylene blue.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años, el incremento de la población y el desarrollo industrial han ocasionado una creciente generación de residuos que afectan la calidad de los ecosistemas acuáticos. Diversos estudios reportan que gran parte de estos contaminantes terminan depositados en ríos, lagunas y estuarios, provocando la reducción de la calidad y disponibilidad del agua dulce (Afreen et al., 2020; Raizada et al., 2019). Este problema ha sido ampliamente señalado en investigaciones recientes, donde se destaca que los efluentes industriales contienen colorantes y compuestos orgánicos persistentes difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales (Uyen et al., 2025; Vu et al., 2025).

Los colorantes sintéticos, particularmente aquellos utilizados en las industrias textil y farmacéutica, son altamente estables y resistentes a la biodegradación. Su presencia en el agua impide la penetración de la luz solar, afectando procesos como la fotosíntesis y contribuyendo a la toxicidad del medio acuático. Estudios como los de Alex Mbachu et al. (2023) y Munguti & Dejene (2020), han evidenciado que estos contaminantes presentan alta persistencia química y representan un desafío ambiental de gran magnitud.

Ante esta situación, la fotocatalisis heterogénea se ha consolidado como una tecnología verde prometedora para la remoción de contaminantes orgánicos. Este proceso se basa en el uso de materiales semiconductores que, al ser irradiados por luz ultravioleta o visible, generan pares electrón-hueco capaces de inducir reacciones de oxidación-reducción que degradan los contaminantes hasta compuestos menos tóxicos. El dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los fotocatalizadores más estudiados, como se muestra en el trabajo de Munien et al. (2025) donde se destaca su estabilidad, bajo costo y fuerte capacidad oxidante, aunque su uso se limita principalmente a la región ultravioleta debido a su banda prohibida de aproximadamente 3.2 eV.

Por su parte, el sulfuro de cadmio (CdS) presenta una banda prohibida más reducida (~2.4 eV), lo que le permite aprovechar mejor la radiación visible. Sin embargo, este material sufre de fotocorrosión cuando es expuesto a irradiaciones prolongadas. Investigaciones como la de Gomathi Thanga Keerthana & Murugakoothan (2019) han demostrado que la combinación de ambos semiconductores mejora la eficiencia fotocatalítica gracias a una mejor separación de cargas y un aprovechamiento más amplio del espectro solar.

A pesar de estos avances, aún persisten limitaciones relacionadas con la agregación de partículas y la dificultad de recuperación de los catalizadores en suspensión. Por ello, el uso de soportes porosos como las zeolitas se ha convertido en una estrategia eficaz para mejorar la dispersión, estabilidad y reutilización de los fotocatalizadores. Trabajos recientes como el de Armaković & Armaković (2025) reportan que las zeolitas naturales y sintéticas proporcionan un entorno favorable para la adsorción de moléculas contaminantes, incrementando la interacción entre el contaminante y las partículas activas del catalizador.

En este contexto, el presente estudio se orienta al desarrollo de compósitos CdS-TiO₂ soportados en zeolitas naturales (clinoptilolita) y sintéticas (NaA), sintetizados mediante la técnica sol-gel, con el propósito de evaluar su desempeño en la degradación de contaminantes orgánicos bajo luz solar simulada y ultravioleta. Esta investigación busca aportar al desarrollo de fotocatalizadores híbridos más estables, sostenibles y eficientes, que contribuyan a mitigar la contaminación del agua y al avance de tecnologías limpias para la protección ambiental.

1.2 Justificación

La contaminación del agua representa una problemática ambiental y de salud de gran relevancia, ya que sus efectos trascienden generaciones y pone en riesgo las reservas ecológicas y los ecosistemas acuáticos. Frente a esta situación, la recuperación y el tratamiento eficiente del agua son de vital importancia para garantizar su disponibilidad y calidad. Los métodos convencionales, como la filtración y la sedimentación, permiten la separación de materiales en suspensión, pero no logran la degradación completa de los contaminantes orgánicos persistentes.

De igual forma, los tratamientos biológicos dependen de condiciones específicas de temperatura, pH y aireación, lo que limita su eficacia ante aguas residuales con alta carga de materia orgánica (Kumari & Kumar, 2023).

Entre los contaminantes orgánicos más preocupantes en el agua se encuentran los colorantes sintéticos, los cuales son ampliamente utilizados en la industria textil, de papel, pinturas e impresión. La descarga de estos compuestos en cuerpos de agua puede afectar significativamente los ecosistemas acuáticos, ya que reducen la penetración de la luz solar, interfiriendo con la fotosíntesis y el equilibrio biológico. Además, su elevada solubilidad, resistencia a la degradación química y baja biodegradabilidad los convierte en compuestos de difícil remoción, por ejemplo, el azul de metileno, el naranja de metilo y la rodamina B (Lerici et al., 2018; Zemedede et al., 2022).

Frente a estas limitaciones, los procesos de oxidación avanzada (POA) han surgido como alternativas más sostenibles y eficientes para la eliminación de contaminantes orgánicos. Aunque técnicas como la ozonización y proceso fenton han demostrado cierta efectividad, también presentan limitaciones relacionadas con el alto costo y la incompleta eliminación de residuos orgánicos (M. M. Ali et al., 2021; Raizada et al., 2019).

Dentro de los POAs, la fotocatalisis heterogénea se destaca por su eficiencia en la degradación de contaminantes presentes en medios acuosos. Este proceso consiste en la activación de materiales semiconductores mediante luz, cuya energía debe ser igual o superior a su banda prohibida, generando pares electrón-hueco que permiten reacciones de oxidación y reducción. Materiales como el TiO_2 y el CdS han sido ampliamente utilizados como fotocatalizadores por su capacidad para mineralizar contaminantes, transformándolos en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y productos inorgánicos inocuos. No obstante, su eficiencia puede verse limitada por fenómenos como la rápida recombinación de cargas o la fotocorrosión en medios acuosos. Ante esta problemática, el uso de soportes como zeolitas naturales y sintéticas mejora la estabilidad y eficiencia fotocatalítica al favorecer la dispersión de los catalizadores y facilitar que los contaminantes se acerquen a las zonas activas del material donde ocurre la reacción (Escobar-Alarcón & Solís-Casados, 2020; Zemedede et al., 2022).

Por ello, el presente estudio se enfoca en la síntesis y caracterización del compuesto CdS- TiO_2 soportado en zeolitas mediante la técnica sol-gel, con el objetivo de desarrollar un fotocatalizador eficiente para la degradación de contaminantes orgánicos en agua. La evaluación de su estructura cristalina mediante difracción de rayos X (DRX), así como de sus propiedades ópticas mediante espectroscopía UV-Vis, permitirá comprender el comportamiento del material y su potencial en aplicaciones de remediación ambiental.

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas al tratamiento de aguas residuales, en respuesta a la creciente necesidad de soluciones innovadoras dentro del campo de la ingeniería ambiental y la ciencia de materiales.

1.3 Hipótesis

El compuesto CdS-TiO₂ soportado en zeolita natural y sintética presentará una mayor actividad fotocatalítica y eficiencia en la degradación de colorantes orgánicos, en comparación con los materiales individuales (CdS y TiO₂), gracias a la combinación de sus propiedades estructurales, morfológicas y ópticas, junto con la capacidad de adsorción de la zeolita.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la degradación fotocatalítica del compuesto CdS-TiO₂/Zeolita (natural y sintética) frente a colorantes orgánicos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Sintetizar el compuesto de CdS-TiO₂/Zeolita, por el método de Sol-Gel utilizando dos tipos de zeolita: natural y sintética, para ser utilizados como fotocatalizador.
- Caracterizar el compuesto CdS-TiO₂/Zeolita a través de las técnicas estructurales, morfológicas y ópticas para determinar las propiedades del material fotocatalizador.
- Evaluar la actividad fotocatalítica del compuesto CdS-TiO₂/Zeolita para determinar su funcionalidad frente a colorantes orgánicos.

1.5 Estructura de la tesis

La presente tesis aborda el estudio y evaluación de compósitos CdS-TiO₂ soportados en zeolita (CLI y NaA) sintetizados por sol-gel para la degradación fotocatalítica de contaminantes en agua. El documento se organiza en seis capítulos:

Capítulo 1. Presenta la problemática ambiental, la justificación científica, la hipótesis de trabajo y los objetivos generales y específicos que orientan el estudio.

Capítulo 2. Expone los antecedentes y el marco teórico: fundamentos de fotocatalisis, propiedades de TiO_2 y CdS, compósitos CdS- TiO_2 , y el papel de los soportes zeolíticos; además, se describen los principios de las técnicas de caracterización empleadas.

Capítulo 3. Detalla la metodología experimental: materiales y reactivos, condiciones de síntesis por sol-gel, preparación del compósito CdS- TiO_2 /zeolita, parámetros de las pruebas fotocatalíticas (luz solar simulada y radiación UV) y procedimientos de caracterización.

Capítulo 4. Presenta los resultados y su discusión: análisis estructural y óptico, desempeño fotocatalítico y propuesta de mecanismo respaldada por literatura reciente.

Capítulo 5. Expone las conclusiones y las recomendaciones y perspectivas para trabajos futuros.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

La contaminación de los cuerpos de agua por residuos industriales, domésticos y agrícolas representa uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial. En los últimos años, diversos estudios han demostrado que una gran proporción de los contaminantes vertidos al ambiente se acumula en lagos y ríos, afectando la calidad del agua y la biodiversidad acuática.

De acuerdo con lo descrito por Grifasi et al. (2024) la presencia de compuestos orgánicos persistentes, metales pesados y colorantes sintéticos en los efluentes industriales constituye una amenaza directa para el equilibrio ecológico y la salud humana, debido a su difícil degradación y a su prolongada toxicidad.

Entre los contaminantes más preocupantes se encuentran los colorantes sintéticos, ampliamente utilizados en las industrias textil, farmacéutica y alimentaria. Su alta estabilidad química y resistencia a la biodegradación provocan que los métodos convencionales de tratamiento, como la coagulación o la filtración, sean poco eficaces para su eliminación.

Las investigaciones realizadas por Armaković & Armaković (2025) y Zhang, bin Samsudin, et al. (2022) destacan que estos colorantes reducen la transmisión de luz en el agua, interfiriendo en la fotosíntesis y generando condiciones tóxicas que afectan la vida acuática.

Con el fin de contrarrestar esta problemática, se han explorado tecnologías de tratamiento avanzadas, entre ellas la fotocatalisis heterogénea, considerada un método verde y eficaz para la eliminación de contaminantes orgánicos. Este proceso se basa en la activación de un material semiconductor mediante una fuente de luz, generando especies reactivas capaces de oxidar los contaminantes hasta transformarlos en compuestos inocuos.

El TiO_2 es uno de los fotocatalizadores más utilizados gracias a su estabilidad química, bajo costo y fuerte poder oxidante.

No obstante, su actividad se limita principalmente a la región ultravioleta del espectro solar debido a su amplia banda prohibida (~ 3.2 eV) (Ashfaq et al., 2022; Piedra López et al., 2021).

Por otro lado, el CdS ha mostrado un mejor aprovechamiento de la luz visible debido a su menor energía de banda (~ 2.4 eV). Sin embargo, este material presenta el inconveniente de la fotocorrosión, lo que reduce su estabilidad durante el uso continuo. Diversos autores han analizado y estudiado que la combinación de CdS y TiO_2 en una misma estructura mejora la separación de cargas fotoinducidas, reduce la recombinación electrón-hueco y amplía la respuesta óptica hacia la región visible, incrementando así la eficiencia del proceso fotocatalítico (Mergenbayeva et al., 2024).

A pesar de estos avances, los sistemas compuestos únicamente por semiconductores suelen presentar dificultades en cuanto a su recuperación y reutilización. En este sentido, los soportes porosos, como las zeolitas, se han convertido en una alternativa atractiva para anclar materiales activos y mejorar su desempeño. En múltiples estudios describen que las zeolitas, tanto naturales como sintéticas, poseen una estructura cristalina tridimensional formada por

tetraedros de silicio y aluminio, generando canales y cavidades capaces de intercambiar iones y adsorber moléculas contaminantes (Kordala & Wyszowski, 2024; Velarde et al., 2023).

De igual forma, los trabajos por de Dios et al. (2023) y Huayna et al. (2024) demuestran que el acoplamiento de TiO_2 con zeolitas favorece la dispersión de las nanopartículas, incrementa el área superficial disponible y mejora el contacto entre el contaminante y el catalizador. Dichas características, junto con la estabilidad térmica y química de las zeolitas, permiten obtener materiales más eficientes y reutilizables.

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian el potencial del desarrollo de compósitos semiconductores soportados en zeolita como una alternativa sostenible para la remediación ambiental. Por ello, el presente trabajo se enfoca en el estudio de compósitos CdS- TiO_2 soportados en zeolita natural (clinoptilolita) y sintética (NaA), sintetizados mediante la técnica sol-gel, con el propósito de evaluar su desempeño en la degradación de contaminantes orgánicos bajo luz solar simulada y radiación UV.

2.2 Semiconductores

Los materiales pueden clasificarse en tres categorías principales: conductores, aislantes y semiconductores. Los conductores son materiales que permiten el libre flujo de electrones, lo que facilita el transporte de corriente eléctrica. Por su parte, los aislantes presentan una alta resistencia al paso de la electricidad, debido a la ausencia de electrones libres. Finalmente, los semiconductores se ubican entre estos dos extremos, ya que pueden comportarse como conductores o como aislantes dependiendo de ciertas condiciones, como la temperatura o la radiación. Esta capacidad de controlar el flujo de corriente los hace fundamentales en diversas aplicaciones de la ingeniería de materiales (Hossain et al., 2023).

Cuando un fotón con energía igual o superior a la banda prohibida incide sobre un semiconductor, puede excitar a un electrón desde la banda de valencia (BV) hasta la banda de

conducción (BC). Este fenómeno da lugar a la formación de un par electrón-hueco, donde el electrón se convierte en portador de carga negativa en la banda de conducción y el hueco actúa como carga positiva en la banda de valencia (Terna et al., 2021).

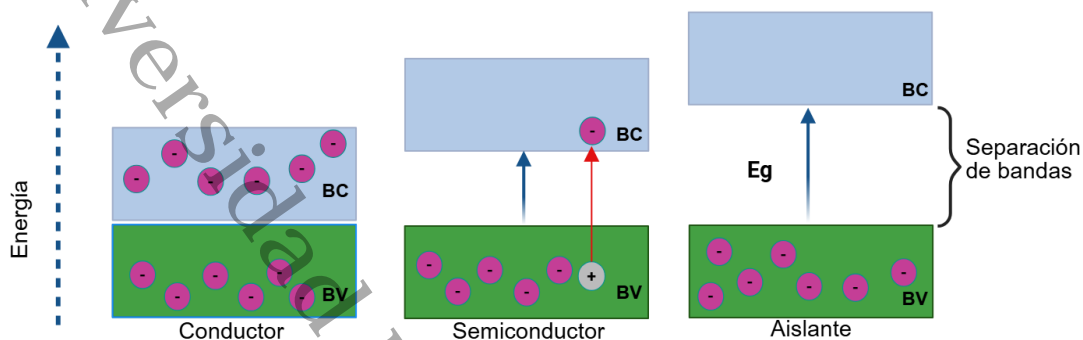
En la Figura 1 se ilustran las diferencias entre los niveles de energía en un conductor, un aislante y un semiconductor. En un material semiconductor, la BV se encuentra llena de electrones a bajas temperaturas, mientras que la BC permanece vacía. Ambas están separadas por una región conocida como banda prohibida (E_g). En los aislantes, esta banda es muy amplia, impidiendo el paso de electrones; en cambio, los conductores presentan bandas de energía superpuestas que facilitan la conducción.

De acuerdo con su composición, los semiconductores pueden clasificarse en dos tipos principales: semiconductores intrínsecos y extrínsecos.: los primeros, son materiales puros, sin dopaje.

Su capacidad para conducir electricidad depende de la energía que absorben del entorno, lo cual permite que algunos electrones pasen de la BV a la BC, generando pares electrón-hueco que permiten el transporte de carga. Los segundos son materiales que han sido dopados con átomos específicos para alterar su comportamiento electrónico.

Figura 1

Esquemas de separación de las bandas de energía de los materiales conductores, semiconductores y aislantes.



Nota. Adaptado de Review on charge carrier transport in inorganic and organic semiconductors (Morab et al., 2023).

2.3 Generalidades del TiO₂

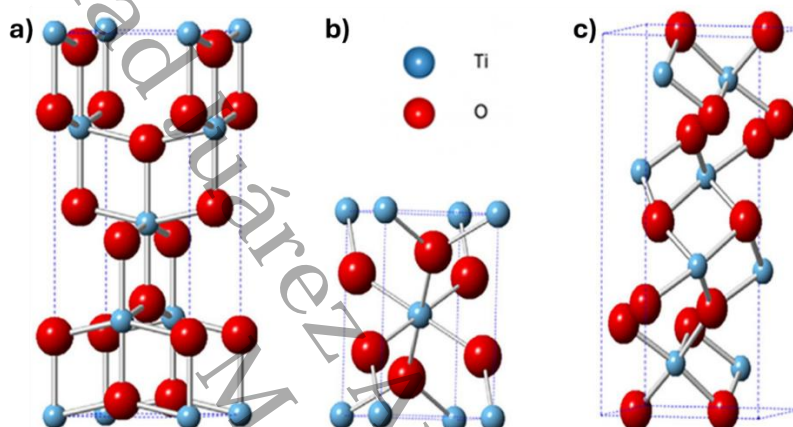
El TiO₂ es un semiconductor de tipo n, con alta estabilidad química y térmica, lo que lo convierte en un material idóneo para aplicaciones ambientales. Además, la incorporación de fases activas o dopantes permite modificar su morfología y propiedades, con el objetivo de mejorar su desempeño fotocatalítico (Ismael, 2020; Madkhali et al., 2023).

El TiO₂ ha ganado atención en las últimas décadas por su versatilidad en reacciones de degradación y desinfección de compuestos orgánicos (Racovita, 2022). Existen tres fases cristalinas principales: anatasa y rutilo (ambas tetragonales), y brookita (ortorrómbica) (Kim et al., 2021). La fase anatasa es la más utilizada por su actividad fotocatalítica superior, atribuida a su banda prohibida de aproximadamente 3.2 eV, que permite la absorción en la región ultravioleta (Muschetta et al., 2024), su borde de absorción está cercano a los 388 nm, mientras que la fase rutilo, con un band gap menor (~3.0 eV), extiende su absorción hacia los 410 nm (Hsu et al., 2024). A temperatura ambiente, el TiO₂ se encuentra comúnmente en forma de anatasa. Sin embargo, al superar los 400 °C, puede transformarse progresivamente en rutilo, especialmente si no se controla la temperatura de calcinación (Pourghorbani dinachali et al., 2022).

Las estructuras cristalinas correspondientes a las fases anatasa y rutilo se muestran en la Figura 2. Las esferas azules representan átomos de titanio (Ti) y las rojas átomos de oxígeno (O). La fase anatasa y rutilo corresponden a estructuras tetragonales, pero con diferencias en la coordinación y disposición atómica, lo que influye en su actividad fotocatalítica.

Figura 2

Estructura cristalina del dióxido de titanio: (a) fase anatasa, (b) fase rutilo y c) brookita



Nota: Imagen adaptada de Review of the sol-gel method in preparing nano TiO₂ for advanced oxidation process (Chang et al., 2023).

Actualmente, existen diversos métodos de síntesis para obtener TiO₂, incluyendo rutas hidrotermales, por microondas, hidrólisis controlada y, particularmente, el método sol-gel. Este último ha sido ampliamente utilizado por su capacidad para producir partículas de alta pureza, con control de tamaño, morfología y área superficial (Escobar-Alarcón & Solís-Casados, 2020).

En el caso de materiales en forma de polvo, el método sol-gel permite dispersar homogéneamente las fases activas, favorecer la formación de la fase anatasa a bajas temperaturas y optimizar parámetros clave como el tamaño de partícula, lo cual es esencial para mejorar la fotocatalisis en medios líquidos contaminados.

La temperatura de calcinación es un parámetro crítico, ya que influye directamente en la cristalización, el tamaño final del cristal, la porosidad y la transición de fase. Una calcinación

inadecuada puede favorecer la formación de rutilo, reduciendo así la actividad fotocatalítica. Por otro lado, el tratamiento térmico también puede afectar la actividad antimicrobiana y la capacidad de degradación de compuestos orgánicos (Pourghorbani dinachali et al., 2022).

TiO₂ ha demostrado excelente desempeño en la degradación de colorantes, antibióticos y contaminantes emergentes en agua, debido a su capacidad para generar radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) y otras especies reactivas de oxígeno que refuerzan el proceso de oxidación (Madkhali et al., 2023). Además, su uso se ha extendido a la producción de hidrógeno mediante reacciones fotocatalíticas, donde destaca por su eficiencia y estabilidad (Anucha et al., 2022).

2.4 Generalidades del CdS

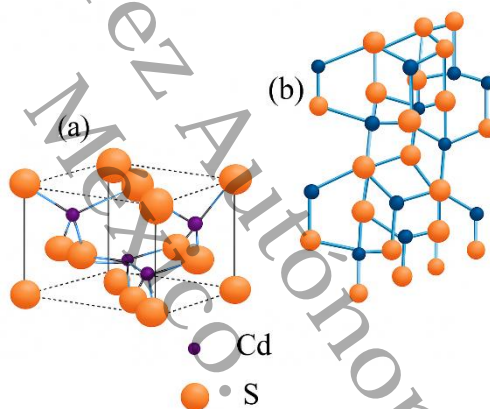
El sulfuro de cadmio es un semiconductor inorgánico tipo n, clasificado dentro del grupo II–VI, que ha recibido amplio interés por su capacidad para absorber luz visible debido a su alta fotosensibilidad y su energía de banda prohibida (~2.42 eV), lo que le permite activarse eficientemente bajo irradiación solar. Estas características lo posicionan como un material de gran interés en aplicaciones como la fotocatálisis, celdas solares, sensores (Dabhane et al., 2021; Iqbal et al., 2019).

Desde el punto de vista ambiental, el CdS ha demostrado ser eficaz en la degradación de contaminantes orgánicos, como colorantes sintéticos y compuestos farmacéuticos. Su alta capacidad de absorción de luz y su eficiencia bajo radiación visible lo convierten en un candidato viable para procesos de remediación en aguas residuales. No obstante, sufre de una rápida recombinación de pares electrón-hueco y es susceptible a la fotocorrosión en ambientes acuosos, es decir, tiende a degradarse cuando se expone a la luz en presencia de agua y oxígeno, debido a la oxidación del propio material. Este fenómeno reduce su estabilidad estructural y limita su vida útil como fotocatalizador (Regmi et al., 2023; Iqbal et al., 2019).

En cuanto a su estructura cristalina, está compuesto por átomos de cadmio (Cd) y azufre (S) organizados en formas geométricas llamadas tetraedros, donde cada átomo de Cd se une a cuatro átomos de S, y viceversa. Dependiendo de cómo se ordenen estos tetraedros, el CdS puede presentarse en dos fases principales: cúbica (blenda de zinc) y hexagonal (wurtzita) como se observa en la Figura 3. La fase cúbica se forma a temperaturas bajas 100 °C, mientras que la fase hexagonal aparece a temperaturas superiores a 300 °C y se considera más estable y activa en procesos fotocatalíticos (Umaru et al., 2023).

Figura 3

Estructura del sulfuro de cadmio (CdS). (a) blenda cúbica de zinc (b) wurtzita hexagonal.



Nota. Adaptada de A review of recent progress in solar fuel (Hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting of cadmium sulfide (CdS) based photocatalyst (Umaru et al., 2023).

2.5 Impurificación de los semiconductores

Para ampliar la respuesta del TiO_2 hacia el espectro visible, se han desarrollado diferentes estrategias de modificación. Una de las más efectivas ha sido el acoplamiento con otros semiconductores como el CdS, cuyo band gap más reducido (~ 2.4 eV) le permite absorber luz visible. Sin embargo, CdS presenta una alta tasa de recombinación electrón-hueco, lo que limita su eficiencia. Al acoplarse con TiO_2 , se combinan de forma complementaria, superando las limitaciones que presentan por separado: el TiO_2 evita que los electrones y huecos se

recombinen fácilmente, y además aporta mayor estabilidad química y estructural al compuesto, lo que ayuda a que no se degrade durante la fotocatalisis, mientras que el CdS extiende la absorción hacia la región visible, optimizando el aprovechamiento de la radiación solar (Anh et al., 2022). Se ha demostrado que la incorporación de estos compuestos sobre soportes porosos como la zeolita favorece la dispersión homogénea de las fases activas y mejora la transferencia de masa durante el proceso fotocatalítico. Esto resulta en una mayor eficiencia en la degradación de contaminantes (Anh et al., 2022).

La combinación del CdS con otros semiconductores basados en óxidos, como el TiO_2 , o su integración en estructuras porosas como la zeolita natural (CLI) o sintética (NaA), ha demostrado incrementar notablemente la eficiencia en la degradación de contaminantes (Qutub et al., 2022; Zemedet et al., 2022). Esto se debe a que estas combinaciones facilitan el movimiento de cargas eléctricas, mejoran la captación de los contaminantes y reducen el desgaste del material bajo la luz (fotocorrosión). Como resultado, se obtienen compósitos más estables y con mayor rendimiento en procesos de fotocatalisis ambiental (Kok Sheng et al., 2023).

2.6 Materiales porosos

Los materiales porosos han sido ampliamente estudiados en diversas disciplinas científicas debido a sus propiedades estructurales únicas y su gran potencial en aplicaciones como la catálisis, la separación y la adsorción. Estos materiales pueden encontrarse en la naturaleza o sintetizarse mediante diversos métodos, y se caracterizan por la presencia de cavidades o canales internos, conocidos como poros, los cuales son espacios vacíos distribuidos entre las partículas que conforman el material (Mosbah et al., 2020).

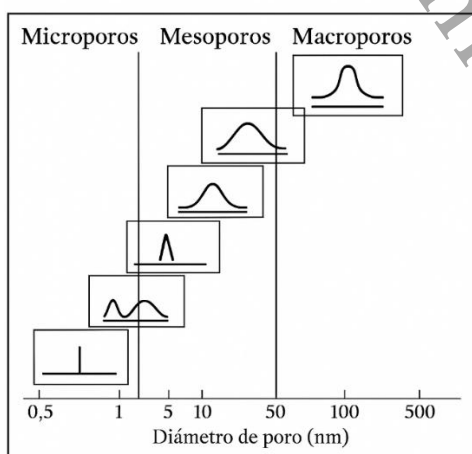
La formación de estos poros puede originarse durante la cristalización del material o mediante tratamientos posteriores a la síntesis, dando lugar a estructuras con poros aislados o interconectados, de diferentes tamaños y geometrías. El diámetro de poro puede variar desde

aproximadamente 0.3 nm hasta 10 μm , lo que les confiere propiedades específicas según su aplicación (Allothman, 2012).

En función del tamaño de sus poros, los materiales porosos se clasifican en tres grandes grupos: microporos (diámetro < 2.0 nm), mesoporos (entre 2.0 y 50.0 nm), y macroporos (> 50.0 nm). Los microporos han mostrado gran eficiencia en procesos de catálisis y adsorción, siendo ampliamente utilizados en aplicaciones de separación selectiva en ingeniería química. Los mesoporos, han sido empleados en procesos de filtración, control de contaminantes y catálisis heterogénea (Allothman, 2012; Mosbah et al., 2020), los macroporos, resultan adecuados para la eliminación de contaminantes de mayor tamaño, como colorantes orgánicos en aguas residuales. Entre los materiales porosos más relevantes se encuentran las zeolitas, cuya estructura cristalina tridimensional las hace altamente efectivas en procesos de adsorción, catálisis y separación molecular (Eskandari-Ghadi & Zhang, 2021; Mosbah et al., 2020), como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Distribución representativa del tamaño de poro en materiales microporosos, mesoporos y macroporos.



Nota: Adaptado de la clasificación de la IUPAC para materiales porosos (Mosbah et al., 2020).

2.6.1 Zeolitas naturales

Las zeolitas naturales son materiales microporosos que se forman de manera natural a partir de la transformación de vidrios volcánicos, cenizas o materiales ricos en sílice y alúmina, cuando estos permanecen durante mucho tiempo en ambientes húmedos y ricos en sales. Este proceso ocurre en zonas geológicas específicas, como depósitos de ceniza volcánica o sedimentos alcalinos, donde la temperatura y presión son moderadas. Bajo estas condiciones, los minerales originales se reorganizan lentamente hasta formar una estructura sólida y estable con poros en su interior (Bawa et al., 2024; Grifasi et al., 2024).

Desde el punto de vista estructural, las zeolitas naturales están formadas por una red muy ordenada de canales microscópicos y cavidades internas, lo que les da una gran superficie de contacto.

Esta característica permite que atrapen o intercambien moléculas pequeñas, lo cual resulta muy útil en procesos como la adsorción de contaminantes, el intercambio iónico y la catálisis heterogénea, en los que las reacciones ocurren sobre la superficie del material (Grifasi et al., 2024).

Actualmente se han identificado más de 80 tipos de zeolitas naturales. Algunas de las más conocidas por su abundancia y utilidad son la clinoptilolita, mordenita, chabasita, analcima, erionita, laumontita, phillipsita y ferrierita, entre otras. Estos minerales suelen encontrarse en formaciones de origen volcánico o en depósitos sedimentarios que han sido alterados por procesos naturales a lo largo del tiempo. Países como Estados Unidos, Grecia, Italia y Bulgaria poseen importantes reservas de estos materiales (Velarde et al., 2023; Zhang et al., 2022). En el caso de México, también se han identificado yacimientos relevantes, especialmente en los estados de Zacatecas, Puebla, Oaxaca, San Luis Potosí y Jalisco.

Entre todas ellas, la clinoptilolita destaca por su capacidad para eliminar metales pesados, metaloides como el arsénico y el plomo, e iones como el amonio presente en aguas

contaminadas. Además, esta zeolita presenta buena estabilidad cuando se expone al calor, y tiene un comportamiento químico equilibrado, lo que la convierte en una excelente opción como soporte de catalizadores o como material activo en tecnologías de remediación ambiental (Grifasi et al., 2024).

Por otra parte, diversas investigaciones han demostrado que las zeolitas naturales también son eficaces en la remoción de colorantes y compuestos orgánicos persistentes en el agua. Incluso pueden utilizarse como soporte de materiales semiconductores como el TiO_2 o el CdS, mejorando su distribución y facilitando que los contaminantes entren en contacto con las superficies activas, lo que favorece su degradación durante procesos fotocatalíticos (Li et al., 2024).

2.6.2 Zeolitas sintéticas

El estudio de las zeolitas se remonta al año 1756, cuando el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt descubrió este tipo de material y lo denominó “zeolita”, palabra derivada del griego zeo (hervir) y lithos (piedra), en alusión al comportamiento observado al calentarlas.

Desde entonces, su estructura y funcionalidad han sido ampliamente estudiadas, dando paso al desarrollo de zeolitas sintéticas con propiedades controladas y específicas (de Farias, 2023).

Las zeolitas sintéticas son materiales cristalinos altamente porosos, con canales y cavidades internas en un rango de entre 0.3 y 1.0 nanómetros. Estas características les otorgan una notable capacidad de adsorción y las hacen adecuadas para aplicaciones como la catálisis, purificación, separación molecular y tratamiento de residuos tóxicos, incluyendo aquellos de origen radioactivo (de Farias, 2023).

A diferencia de las zeolitas naturales, las sintéticas son fabricadas en laboratorio, lo que permite un mayor control sobre su composición, morfología y propiedades texturales. Aunque su

síntesis suele ser más costosa debido a las condiciones controladas y materias primas puras requeridas, diversos estudios han demostrado que el uso de residuos industriales como cenizas volantes, escorias o lodos puede disminuir significativamente los costos de producción, debido a que estos materiales son ricos en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), los cuales son los principales componentes necesarios para formar la estructura de las zeolitas.

Las zeolitas sintéticas más comunes incluyen los tipos A, X, Y y P, las cuales se diferencian por su relación sílice/alúmina, el tamaño de poro y la estructura interna de su red cristalina. Estas propiedades determinan su eficiencia como adsorbentes, catalizadores o materiales capaces de realizar intercambio iónico, especialmente en procesos de separación y remoción de contaminantes acuosos (Khaleque et al., 2020).

Una ventaja importante de las zeolitas sintéticas es su mayor versatilidad, ya que pueden adaptarse a distintas funciones mediante modificaciones estructurales y composicionales. Esto las hace especialmente útiles en el tratamiento de contaminantes tanto en agua como en aire, así como en la retención selectiva de moléculas de interés (de Farias, 2023).

El proceso de síntesis de estas zeolitas puede llevarse a cabo mediante diversos métodos, como la fusión alcalina, o el uso de residuos industriales como fuente de sílice y alúmina. La elección del método depende del tipo de zeolita deseado, el tiempo de reacción, la temperatura y la calidad de las materias primas empleadas, las cuales pueden ser de origen natural o artificial (Khaleque et al., 2020).

2.7 Proceso Sol Gel

El método sol-gel es una técnica de síntesis de materiales que fue descrita por primera vez por Graham en 1863. Esta técnica implica la transición de una solución líquida a un gel, y posteriormente a un material sólido, a través de una serie de etapas que incluyen la preparación del sol, la gelificación y la eliminación del solvente (Innocenzi, 2023).

Durante la preparación del sol, se genera una dispersión coloidal de partículas muy pequeñas en una fase líquida, lo que permite mantenerlas suspendidas de forma homogénea. Conforme avanza el proceso, el sistema pasa a una fase de gelificación, donde el solvente comienza a evaporarse, y se forma una matriz sólida de aspecto viscoso que encapsula e inmoviliza el líquido remanente. Cuando este gel se somete a procesos de secado, da lugar a materiales como los aerogeles o xerogeles, dependiendo. La síntesis por sol-gel puede verse influenciada por diversos parámetros, tales como el pH de la solución, la naturaleza y concentración de los precursores, el tipo de disolvente, el tiempo de reacción y la temperatura (Umaru et al., 2023).

Existen dos tipos de métodos sol-gel: acuosos y no acuosos. En el proceso acuoso, el agua es el disolvente, mientras que en el método no acuoso se utiliza alcohol (Innocenzi, 2023). Por lo cual, los precipitados amorfos se forman comúnmente en soluciones acuosas, lo cual es una desventaja con la ruta no acuosa. Estos factores determinan la estructura final del material y sus propiedades fisicoquímicas (Umaru et al., 2023).

Entre las ventajas del método sol-gel destaca su capacidad para generar materiales con alta pureza, tamaño de partícula nanométrico y porosidad controlada, todo ello a bajas temperaturas de síntesis. Además, permite diseñar materiales con propiedades específicas según su aplicación. Gracias a estas cualidades, ha sido ampliamente empleado en la preparación de materiales fotocatalíticos, sensores, recubrimientos delgados y compuestos híbridos funcionales (Madkhali et al., 2023) (Innocenzi, 2023).

No obstante, también presenta ciertas desventajas, como el tiempo prolongado requerido para completar las etapas de gelificación y secado, además del manejo de solventes orgánicos que pueden ser peligrosos si no se controlan adecuadamente (Umaru et al., 2023) (Owens et al., 2016).

2.8 Fotocatálisis

La fotocatálisis es un proceso en el cual la energía luminosa se transforma en energía química con la ayuda de un fotocatalizador. En este mecanismo, fuentes como la radiación UV, la luz visible o la energía solar pueden activar un material semiconductor, el cual, al absorber energía suficiente, promueve un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción, generando un par electrón-hueco (Chakravorty & Roy, 2024).

Estos pares juegan un papel clave en las reacciones de oxidación y reducción, favoreciendo la transformación de contaminantes en productos menos nocivos. La fotocatálisis se asemeja al proceso natural de la fotosíntesis en las plantas, ya que aprovecha la energía solar para impulsar reacciones químicas (Umaru et al., 2023).

Existen dos tipos principales de reacciones fotocatalíticas: la homogénea y la heterogénea. La fotocatálisis homogénea ocurre cuando el catalizador y los reactivos están en la misma fase, mientras que la fotocatálisis heterogénea, que es la más común en aplicaciones ambientales, utiliza un catalizador sólido y reactivos en fase líquida o gaseosa (Chakravorty & Roy, 2024).

La fotocatálisis heterogénea ha cobrado gran relevancia debido a su viabilidad práctica, ya que permite la separación y reutilización del catalizador, lo cual es especialmente útil en procesos industriales (Wang & Yu, 2023). En este tipo de procesos, semiconductores como el TiO_2 han sido ampliamente utilizados debido a su estabilidad, bajo costo y eficiencia en la generación de especies reactivas de oxígeno.

Entre las aplicaciones más destacadas de la fotocatálisis se encuentran la desinfección del agua y la degradación de contaminantes orgánicos emergentes, posicionándose como una tecnología ambiental limpia, eficaz y prometedora (Muschetta et al., 2024) (Madkhali et al., 2023).

2.9 Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización son fundamentales en la investigación de materiales, ya que permiten analizar en profundidad la estructura, composición y propiedades físicas y químicas de los compuestos obtenidos. Estas herramientas proporcionan información crítica sobre la morfología, la textura superficial, la composición de fases, la orientación cristalina y los parámetros estructurales como el tamaño de cristalito, defectos presentes y nivel de orden interno, lo cual es esencial para comprender el comportamiento funcional de los nanomateriales sintetizados.

En el caso de materiales obtenidos por métodos como el sol-gel, la caracterización permite verificar la efectividad del proceso de síntesis, optimizar condiciones experimentales y seleccionar las muestras con mayor potencial para aplicaciones específicas. Asimismo, contribuye a establecer correlaciones entre la estructura interna del material y su rendimiento, por ejemplo, en procesos catalíticos o de remediación ambiental (Regmi et al., 2023).

2.9.1 Difracción de Rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X (DRX) es una herramienta ampliamente utilizada en la caracterización de materiales debido a su naturaleza no destructiva y su capacidad para proporcionar información estructural detallada. Tiene aplicaciones que abarcan desde el análisis de compuestos en ciencias biológicas hasta su uso en química de materiales.

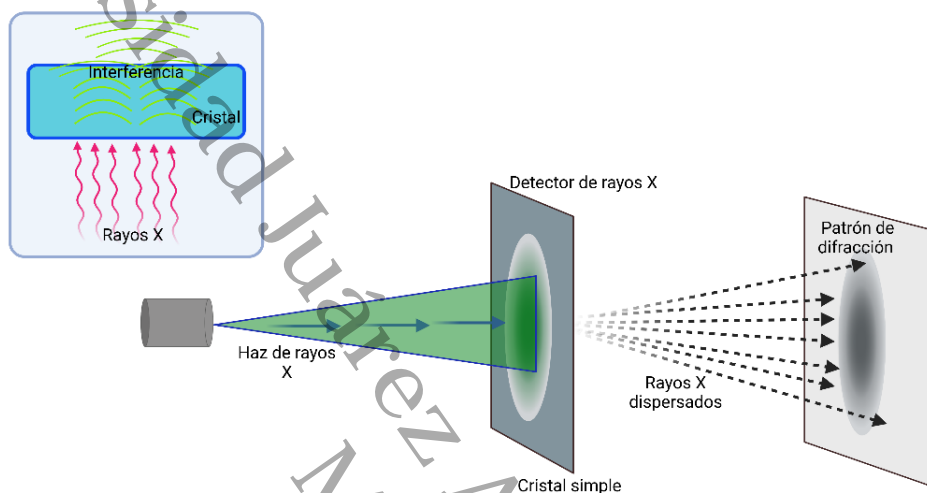
Esta técnica permite identificar fases cristalinas presentes en una muestra, así como analizar defectos en la red cristalina, orientación preferencial, tamaño de grano y otros parámetros estructurales relevantes (Fewster, 2023) (A. Ali et al., 2022).

La DRX se basa en la interacción de un haz de rayos X con la estructura atómica de un material cristalino. Cuando este haz incide sobre el cristal, los rayos se dispersan en direcciones específicas, generando un patrón de difracción característico que puede analizarse para obtener

información sobre la disposición de los átomos en el sólido. La Figura 5 ilustra este principio, mostrando cómo el haz interactúa con el cristal y cómo se genera el patrón de difracción.

Figura 5

Configuración experimental del difractómetro de rayos X.



Nota: Imagen adaptada de Tools and Analysis Methods of Encapsulated LEDs (Davel et al., 2025).

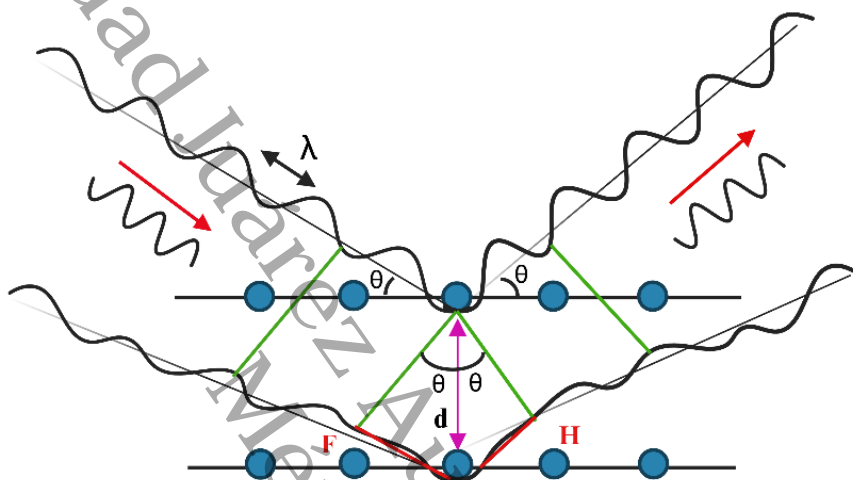
Este fenómeno fue explicado por Bragg, quien identificó que los materiales cristalinos producen patrones específicos de reflexión al interactuar con los rayos X. Dichos patrones se manifiestan en forma de picos de gran intensidad, cuya variación depende tanto de la longitud de onda de los rayos como de la orientación del cristal respecto al haz incidente (Fewster, 2023). Para que ocurra la difracción, debe producirse una interferencia constructiva entre las ondas dispersadas, como se observa en la Figura 6.

En este contexto, es importante destacar que no toda interacción genera difracción: mientras que la reflexión puede producirse a cualquier ángulo, la difracción solo ocurre a determinados ángulos de incidencia, de acuerdo con la Ley de Bragg. Además, los defectos en los cristales pueden influir en el patrón de difracción observado. Estos defectos pueden clasificarse en dos tipos: los relacionados con fenómenos espectroscópicos, como emisión o

fluorescencia, que resultan de la interacción entre la energía del haz y los átomos del cristal; y los derivados de fenómenos ópticos, como refracción o dispersión, donde no hay interacción directa con los átomos, pero sí efectos significativos sobre el comportamiento del haz incidente (Ferney & Hurtado, 2017).

Figura 6

Interferencia constructiva entre ondas dispersadas por planos cristalinos.



Nota: Imagen adaptada de Tools and Analysis Methods of Encapsulated LEDs (Davel et al., 2025).

Por otro lado, un material cristalino se caracteriza por la disposición ordenada de sus átomos en las tres dimensiones. Existen siete sistemas cristalinos fundamentales: cúbico, tetragonal, ortorrómbico, hexagonal, trigonal, monoclinico y triclinico, cada uno con una simetría específica. En ocasiones, estas estructuras pueden identificarse visualmente si el cristal presenta una forma bien definida.

2.9.2 Espectroscopía UV-Vis

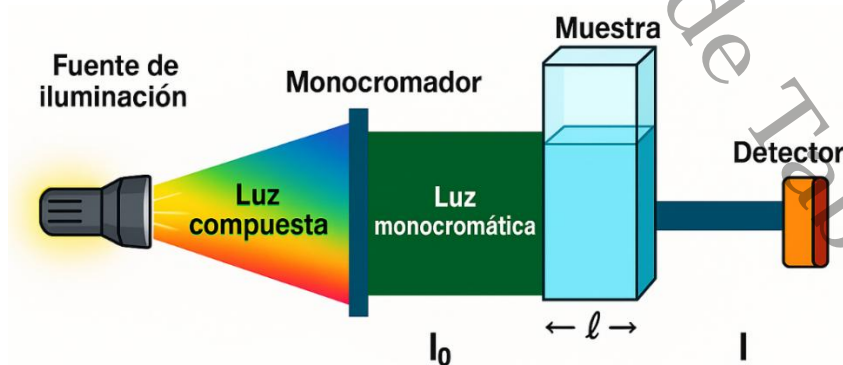
La espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis) es una técnica analítica no destructiva utilizada para obtener información a partir de los espectros de absorbancia de compuestos sólidos o líquidos. Su principio se basa en medir la absorción de radiación electromagnética en las regiones ultravioleta y visible, la cual provoca la excitación de electrones desde su estado fundamental a niveles de mayor energía (Gorji et al., 2024).

El procedimiento consiste en hacer pasar un haz de luz a través de la muestra y cuantificar la cantidad de radiación absorbida.

Este análisis permite determinar parámetros como la concentración de un soluto en solución y características relacionadas con la estructura y composición electrónica de materiales semiconductores. Dependiendo de la longitud de onda utilizada, la medición puede expresarse en términos de transmitancia o absorbancia (Giraldo & Marin, 2025). La estructura básica de los espectrofotómetros está constituida por una fuente de luz, un colimador, un monocromador, un selector de longitud de onda, una cubeta para la solución de muestra, un detector fotoeléctrico y una pantalla digital o medidor, tal como se ilustra en la Figura 7.

Figura 7

Estructura básica de los espectrofotómetros.



Nota: Adaptado de Real-Time UV/VIS Spectroscopy to Observe Photocatalytic Degradation (Woo et al., 2023).

El rango de operación habitual de la técnica es de 200 a 800 nm, aunque algunos equipos permiten extenderlo desde 190 hasta 1100 nm (Gorji et al., 2024; Al-Amiery et al., 2024). Específicamente, la región ultravioleta corresponde a 200-400 nm, mientras que la región visible se ubica en 400-700 nm, como también lo destacan otros estudios aplicados en fotocatalisis.

La finalidad de aplicar UV-Vis en esta investigación es determinar la respuesta óptica de los compósitos y relacionar el band gap obtenido con su eficiencia en la degradación de contaminantes, estableciendo cómo la incorporación de zeolitas y la proporción empleada influyen en la capacidad de absorción de radiación y, por ende, en su desempeño fotocatalítico.

2.9.3 Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una técnica analítica no destructiva empleada para estudiar las vibraciones características de materiales sólidos. Se basa en la dispersión con cambio de energía de la luz láser: cuando un haz incide sobre la muestra, la mayor parte de la luz se dispersa sin cambio, pero una fracción pequeña modifica su energía (Raman).

Esta variación refleja la interacción de la luz con los enlaces químicos del material y genera un espectro que constituye un patrón único de picos, representativo de las vibraciones atómicas propias de cada sustancia (Tsai et al., 2021).

La principal utilidad de esta técnica es la identificación de fases cristalinas y la detección de defectos estructurales como dislocaciones o vacancias. Las dislocaciones son defectos en forma de líneas dentro de la red atómica, mientras que las vacancias son huecos en los que falta un átomo. Estos aspectos influyen en las propiedades electrónicas y ópticas del material, por lo que su estudio es relevante para procesos como la fotocatalisis (Zamudio-Torres et al., 2022).

2.9.4 Fisisorción de nitrógeno

La fisisorción es la adhesión física y reversible de moléculas de gas sobre la superficie y en los poros de un sólido, mediada por fuerzas débiles de Van der Waals. Este proceso no modifica de forma permanente la estructura del material, por lo que se considera una técnica no destructiva y ampliamente utilizada en la caracterización de materiales porosos y catalíticos (Thommes et al., 2015; Osterrieth et al., 2022).

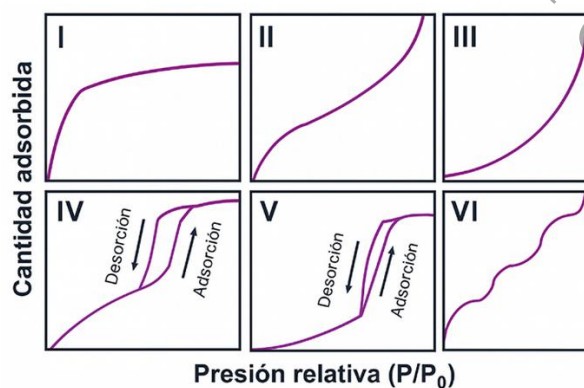
2.9.4.1 Clasificación de isothermas según IUPAC

La IUPAC ha propuesto una clasificación que describe la naturaleza de los sólidos en función de la forma de sus isothermas de adsorción como se observa en la Figura 8.

En general, los microporos corresponden a diámetros menores a 2 nm, los mesoporos abarcan de 2 a 50 nm y los macroporos superan los 50 nm. En este contexto, las isothermas más representativas para materiales fotocatalíticos son: la Tipo I, propia de materiales microporosos; la Tipo II, que corresponde a sólidos no porosos o macroporosos; y la Tipo IV, característica de materiales mesoporosos (Thommes et al., 2015; Bertier et al., 2016).

Figura 8

Clasificación de isothermas de adsorción según la IUPAC.



Nota. Adaptado de About the dominance of mesopores in physisorption in amorphous materials (Strangfeld et al., 2021).

En materiales mesoporosos (2-50 nm), las isothermas de adsorción-desorción muestran con frecuencia una diferencia entre la curva de adsorción (subida) y la curva de desorción (bajada). A este desacuerdo se le denomina histéresis.

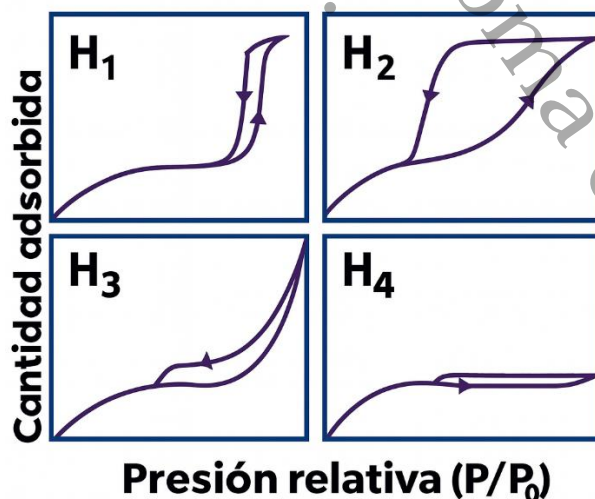
Se origina porque el nitrógeno puede condensarse dentro de los poros durante la adsorción y no salir exactamente por el mismo camino durante la desorción, debido a cuellos estrechos o geometrías complejas.

La IUPAC distingue cuatro formas típicas de histéresis (Figura 9), que permiten inferir el tipo de poro predominante en el material:

- H_1 → Mesoporos uniformes y red abierta (espacio angosto y casi vertical).
- H_2 → Cuellos estrechos, (cavidades amplias con salida angosta).
- H_3 → Poros tipo ranura, (espacios planos entre superficies).
- H_4 → Ranuras combinadas con microporosidad apreciable.

Figura 9

Clasificación de lazos de histéresis según la IUPAC.



Nota. Adaptado de About the dominance of mesopores in physisorption in amorphous materials (Strangfeld et al., 2021).

2.9.5 Espectroscopía de fotoluminiscencia

La luz es una manifestación de la energía conocida científicamente como radiación electromagnética. Esta abarca un amplio rango de longitudes de onda, de las cuales la región visible corresponde aproximadamente de 400 nm (violeta, 3.1 eV) a 700 nm (rojo, 1.7 eV) (Adcock et al., 2019).

La fotoluminiscencia (PL) es la emisión de luz sin aporte térmico que ocurre cuando un material, tras absorber fotones, reemite parte de esa energía en forma de luz. El proceso inicia con la excitación de electrones hacia niveles de mayor energía; al relajarse, estos electrones se recombinan con huecos emitiendo un fotón. La energía del fotón emitido es generalmente menor a la del fotón absorbido, fenómeno conocido como corrimiento de Stokes, que hace referencia a esta diferencia entre energía de excitación y energía de emisión (Shukla & Bari, 2018).

Este fenómeno se clasifica en fluorescencia (emisión rápida, del orden de nanosegundos) y fosforescencia (emisión retardada, que puede durar desde microsegundos hasta segundos). En materiales semiconductores, la PL se asocia principalmente a la recombinación electrón-hueco, permitiendo obtener información valiosa sobre el ancho de banda prohibida (band gap), así como sobre defectos estructurales, estados superficiales, dopantes e impurezas (Arenas-Hernández et al., 2022).

Una de las principales ventajas de la fotoluminiscencia es que se trata de una técnica no destructiva y altamente sensible. El análisis de los espectros obtenidos permite caracterizar la calidad cristalina de los materiales, la morfología de interfaces y la presencia de niveles energéticos adicionales dentro de la banda prohibida (denominados estados electrónicos localizados), los cuales son típicos de defectos o impurezas (Gfroerer, 2000).

El equipamiento requerido es relativamente sencillo, pues generalmente consiste en una fuente de excitación (láser o lámpara de descarga), un sistema óptico de colección y un espectrómetro.

La elección de la longitud de onda de excitación es crítica, ya que determina la región del material que se analiza y el tipo de transiciones que se observan. En ciertos casos, la señal de PL puede interferir con otras respuestas ópticas, como la dispersión Raman, por lo que se emplean filtros ópticos para aislar la emisión correspondiente (Lin et al., 2023).

En síntesis, la técnica de fotoluminiscencia no solo proporciona información sobre el band gap, sino también sobre defectos, pureza, calidad de síntesis y procesos de recombinación, lo que la convierte en un recurso indispensable para comprender y optimizar las propiedades ópticas y fotocatalíticas de materiales semiconductores (Teets, 2021).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 3. Desarrollo experimental

3.1 Metodología

3.1.1 Síntesis del dióxido de titanio (TiO₂)

A continuación, en la Tabla 1, se presentan los reactivos empleados para la obtención del TiO₂ mediante el método sol gel, con base a lo reportado por Cortazar et al. (2024).

Tabla 1

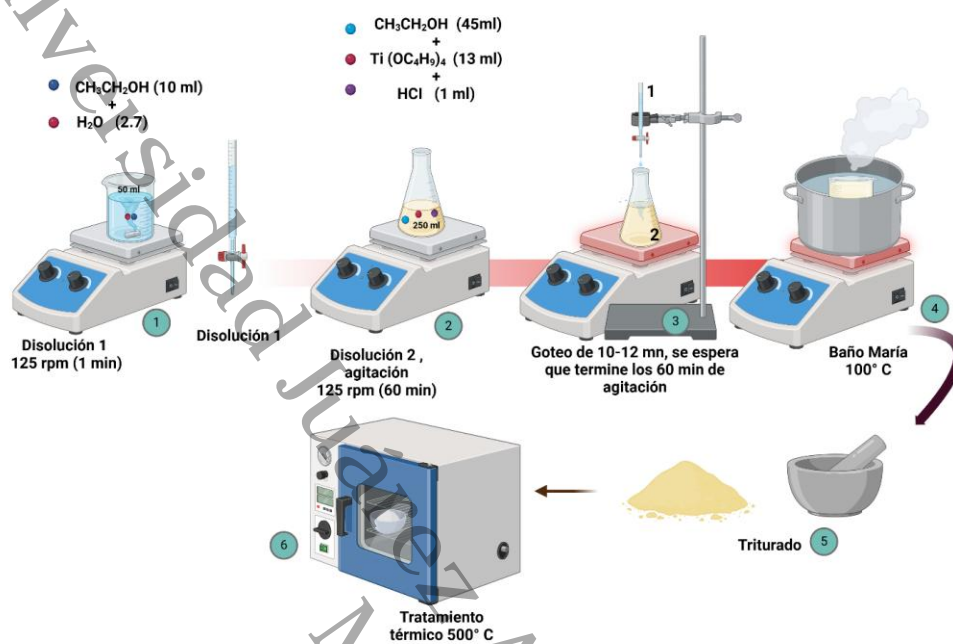
Reactivos usados durante la síntesis de TiO₂

Reactivo	Fórmula	Pureza %
Alcohol etílico	CH ₃ CH ₂ OH	99.5
Tetrabutóxido de titanio	Ti (OC ₄ H ₉) ₄	97.0
Ácido clorhídrico	HCl	36.7
Agua desionizada	H ₂ O	18.3 MΩ·cm

En la Figura 10 se presenta el proceso de síntesis de forma gráfica. En este proceso se prepararon dos disoluciones: en la disolución 1 se utilizó 10 ml de CH₃CH₂OH como solvente y 2.7 ml de H₂O como agente de hidrólisis. Esta solución se agitó a 125 rpm durante 1 min y se reservó en una bureta para su posterior uso.

Para preparar la disolución 2 se utilizó 45 ml de CH₃CH₂OH, 13 ml Ti (OC₄H₉)₄, 1 ml de HCl. Se agitó a 125 rpm durante 60 min. Después de este tiempo, la disolución 1 se incorporó a la disolución 2, mediante goteo constante en un tiempo aproximado de 10-12 min. Esta mezcla se mantuvo en agitación continua hasta formar un gel, el cual fue secado a 100 °C en baño maría. El polvo fue calcinado en un horno tubular a 500 °C por 2 h en atmósfera de oxígeno.

Figura 10

Proceso de obtención del dióxido de titanio (TiO_2)

Nota. Autoría propia. Elaborado con BioRender: Scientific Image and Illustration Software.

3.1.2 Síntesis de sulfuro de cadmio (CdS)

El CdS se obtuvo mediante el método sol-gel, de acuerdo con la metodología de Manzoor et al. (2021). Los reactivos empleados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Reactivos de sulfuro de cadmio (CdS)

Reactivo	Fórmula	Pureza %
Acetato de cadmio	$(CH_3COO)_2Cd \cdot 2H_2O$	99.9
Sulfuro de sodio	$Na_2S \cdot 9H_2O$	98.0
Alcohol etílico	CH_3CH_2OH	96.0
Agua desionizada	H_2O	18.3

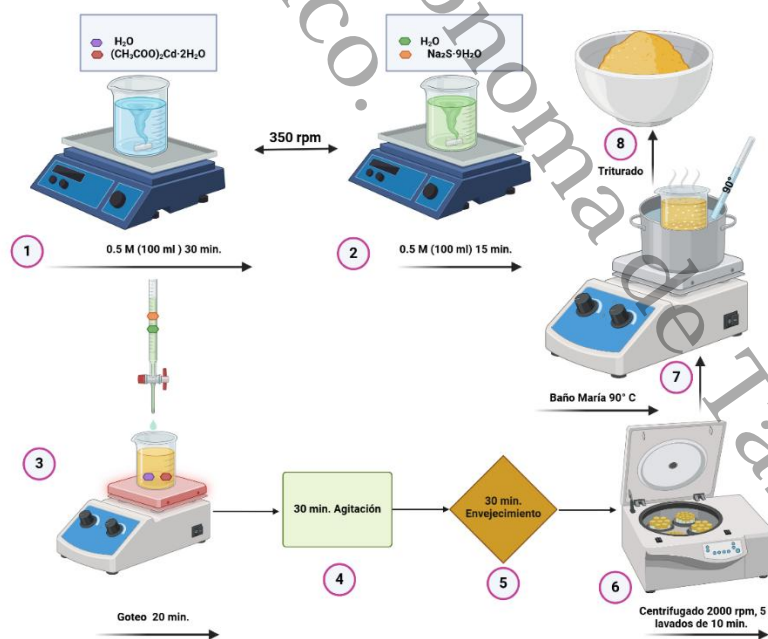
Se preparó una solución de $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cd}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.5 M en 100 ml de agua desionizada y luego se agitó a 350 rpm en la parrilla de agitación magnética durante 30 min. Por otro lado, se preparó una solución 0.5 M de $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ en 100 ml de agua desionizada.

La solución de $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ se incorporó por goteo lento a la solución de acetato de cadmio, manteniendo la agitación a 350 rpm. Finalizada la adición, la mezcla se agitó 30 min adicionales y, enseguida, se dejó en envejecimiento estático 30 min.

El sólido amarillo formado se recuperó por centrifugación a 2000 rpm. El precipitado se lavó cinco veces (10 min por ciclo) con agua desionizada y etanol. El producto húmedo se secó a 90°C en baño María para favorecer la eliminación del solvente residual y, finalmente, se molió hasta obtener un polvo fino para su uso posterior (Manzoor et al., 2021). La representación gráfica del proceso de síntesis se presenta en la Figura 11.

Figura 11

Representación gráfica de la obtención del sulfuro de cadmio (CdS)



Nota. Autoría propia. Elaborado con BioRender: Scientific Image and Illustration Software.

3.1.3 Síntesis de CdS-TiO₂

La síntesis del compuesto CdS-TiO₂ se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.1.1. Para la preparación de la disolución 2 se mezclaron 45 ml de CH₃CH₂OH, 13 ml de Ti (OC₄H₉)₄, 1 ml de HCl y 0.0738 g de CdS (previamente sintetizado) se incorporó el polvo de CdS, asegurando su adecuada dispersión. Después, el procedimiento continuó según lo establecido, manteniendo la agitación y las condiciones necesarias para la formación del gel y su posterior calcinado (Cortazar et al., 2024).

3.1.4 Síntesis de CdS-TiO₂/Zeolitas

La síntesis del compuesto CdS-TiO₂/Zeolitas se realizó de forma similar a la metodología utilizada para la preparación de TiO₂, con la incorporación de zeolita y CdS en la etapa de disolución 2. En esta etapa, se utilizaron dos tipos de zeolitas: la natural, clinoptilolita (CLI) y la sintética (NaA); en diferentes proporciones. Se pesó la cantidad de zeolita (CLI o NaA) correspondiente y luego se siguió el mismo procedimiento utilizado para la adición de CdS en la síntesis de TiO₂, añadiendo los reactivos correspondientes. Tras la adición de zeolita y CdS, el procedimiento continuó tal como en la síntesis de TiO₂ lo indicó.

En la Tabla 3 se enlistan las etiquetas de las muestras sintetizadas, así como sus características.

Tabla 3

Lista de las etiquetas utilizadas para la identificación de las muestras sintetizadas.

Etiqueta de la muestra	Característica
TiO ₂	Muestras sólidas de dióxido de titanio
CdS	Muestras sólidas de dióxido de sulfuro de cadmio
CLI	Muestras sólidas de zeolita natural: clinoptilolita
NaA	Muestras sólidas de zeolita sintética: NaA
CdS-TiO ₂ /CLI0.5	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 0.5 g de CLI
CdS-TiO ₂ /CLI1.0	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 1.0 g de CLI
CdS-TiO ₂ /CLI1.5	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 1.5 g de CLI
CdS-TiO ₂ /NaA0.5	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 0.5 g de NaA
CdS-TiO ₂ /NaA1.0	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 1.0 g de NaA
CdS-TiO ₂ /NaA1.5	Compuestos de TiO ₂ -CdS sintetizados con 1.5 g de NaA

3.2 Condiciones de operación de las técnicas de caracterización.

Para evaluar las propiedades de los fotocatalizadores se empleó un conjunto de técnicas de caracterización estructural, textural, óptica y de desempeño fotocatalítico, cuyas condiciones de operación se describen en los apartados siguientes (Hao et al., 2025).

3.2.1 Difracción de rayos X (DRX)

La caracterización por DRX de los polvos sintetizados se efectuó en un difractómetro Bruker D2 Phaser, con radiación Cu K α ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$). Los difractogramas se registraron en el intervalo $2\theta = 10\text{--}80^\circ$, con velocidad de barrido de $4^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ bajo condiciones estándar del equipo.

3.2.2 Espectroscopía UV-Visible (UV-Vis)

Las muestras se caracterizaron por espectroscopía UV-Visible (UV-Vis) con el fin de identificar el borde de absorción y estimar la energía de banda prohibida (E_g). Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro SHIMADZU UV-2600, efectuando un barrido de 200 a 800 nm. Este procedimiento permitió obtener espectros comparables y definir con claridad el borde de absorción de cada muestra.

3.2.3 Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman permite identificar fases cristalinas y modos vibracionales característicos de un material, así como cambios estructurales y defectos que no siempre son evidentes por DRX. Se registraron espectros a temperatura ambiente en un espectrómetro Horiba–Jobin modelo iHR550 spec, con fuente de excitación láser de 533 nm (verde).

3.2.4 Fisisorción de nitrógeno (N_2)

Los análisis texturales se realizaron por fisisorción de nitrógeno (N_2) en un Autosorb iQ. Antes de la medición, las muestras pulverizadas se desgasificaron a 200 °C (473.15 K) bajo vacío para eliminar humedad y especies fisisorbidas y asegurar superficies limpias. Las isothermas de adsorción–desorción de N_2 se registraron a 77 K (–196.15 °C) empleando un baño de nitrógeno líquido.

3.2.5 Espectroscopía de Fotoluminiscencia (PL)

La fotoluminiscencia evalúa la luz emitida por el material tras ser excitado, lo que permite reconocer centros emisores y señales vinculadas a defectos y a la calidad del material; es información complementaria a Raman y UV-Vis.

Se registraron espectros a temperatura ambiente usando el mismo sistema empleado en Raman: láser de 533 nm (verde) como fuente de excitación, monocromador Horiba-jobin modelo iHR550 spec (550 mm de distancia focal) y detector Synapse CCD refrigerado por Peltier, con un sistema de lentes de colección para la captura de la emisión.

3.3 Fotocatálisis (evaluación del desempeño fotocatalítico)

La eficiencia fotocatalítica de los materiales fotocatalizadores y compuestos sintetizados se evaluó determinando la capacidad de degradación del colorante sintético azul de metileno (AM), a una concentración de 10 mg/L. Las pruebas evaluadas, se realizaron para determinar el efecto del fotocatalizador al activarlo con luz ultravioleta (UV) a temperatura ambiente. En la Figura 12 se muestra el proceso realizado para la evaluación fotocatalítica. Se trabajó con 80 mL de la solución modelo (10 mg/L) a la que se adicionaron 0.024 mg de fotocatalizador. La suspensión se sometió a baño ultrasónico durante 30 min, manteniéndola en oscuridad para favorecer el equilibrio de adsorción-desorción y lograr una dispersión homogénea.

Posteriormente, la suspensión se colocó en el montaje diseñado para pruebas fotocatalíticas, consistente en una caja sellada con una fuente UV en su interior. Durante todo el ensayo, la mezcla se mantuvo en agitación constante a 250 rpm sobre una parrilla. Se tomó una alícuota inicial con la lámpara apagada; enseguida, se encendió la lámpara y se continuó con la toma de alícuotas cada 30 min durante 240 min (4 h).

Cada muestra se transfirió a tubos de ensayo y se realizó separación de fases por centrifugación durante 10 min a 2000 rpm. Finalmente, las soluciones claras se midieron en celda de cuarzo mediante un espectrofotómetro UV-Vis para registrar la absorbancia de cada punto y, con ello, determinar el porcentaje de degradación.

Figura 12

Esquema del montaje experimental y secuencia de muestreo en las pruebas fotocatalíticas.



Nota. Autoría propia. Elaborado con BioRender: Scientific Image and Illustration Software.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Difracción de rayos X (DRX)

4.1.1 Dióxido de titanio soportado en zeolita natural (TiO₂/CLI1.5).

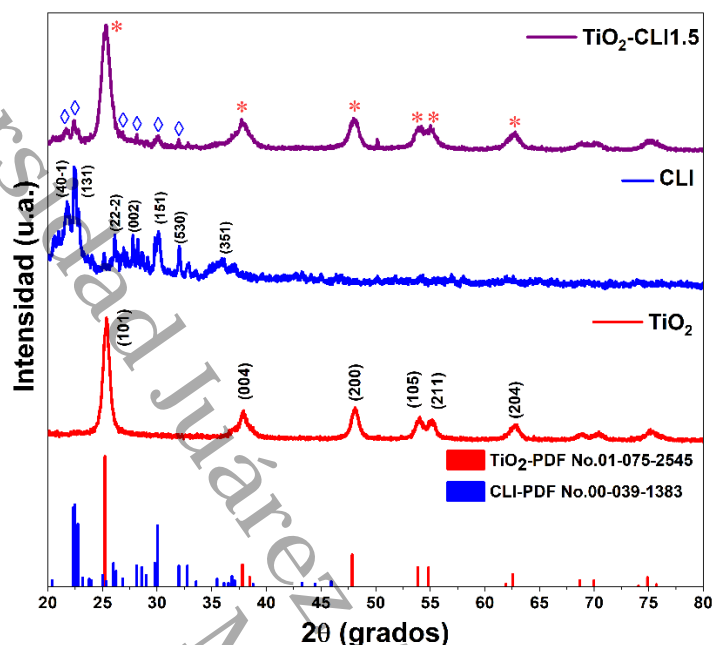
Los patrones de difracción de los materiales puros y compuestos se muestran en la Fig.13. En el difractograma de TiO₂ se observa el patrón de difracción, que corresponde con la referencia de la carta cristalográfica (PDF No. 01-075-2545), confirman la fase cristalina anatasa. Las reflexiones características se encuentran en las posiciones $2\theta = 25.22^\circ, 37.81^\circ, 47.85^\circ, 53.87^\circ, 54.85^\circ, 62.54^\circ$, asignados a los planos cristalográficos: (101), (004), (200), (105), (211), y (204), respectivamente (de Dios et al., 2023; Cahyanti et al., 2023). El tamaño promedio de cristalito, calculado a partir del pico más intenso correspondiente al plano (101), fue de 10.6 nm.

El patrón de difracción de la zeolita natural (CLI), exhibe picos que coinciden con la carta cristalográfica No. 00-039-1383, correspondiente a clinoptilolita cálcica (monoclínica). Las reflexiones características se encuentran en las posiciones de $2\theta = 20.4^\circ, 22.34^\circ, 26^\circ, 26.86^\circ, 30.05^\circ, 31.99^\circ$ y 36.12° , indexadas a los planos cristalográficos: (40 $\bar{1}$), (131), (22 $\bar{2}$), (002), (151), (530) y (351), respectivamente (Grifasi et al., 2024; Piedra López et al., 2021). El tamaño promedio de cristalito se estimó en 27.7 nm.

En el patrón de DRX que corresponde al material compuesto TiO₂/CLI 1.5 se distinguen las mismas reflexiones de anatasa y de CLI, lo que indica la presencia de ambas fases en la muestra. Las intensidades de anatasa son comparables a las del TiO₂ pristino y, en 24–28° (2θ), se aprecia posible superposición con señales de CLI. Dentro de la resolución del gráfico, no se observa un corrimiento claro en (101) (Ismael, 2020; Mergenbayeva et al., 2024). Se obtuvo un tamaño de cristalito del orden de 8.37.

Figura 13

Difractogramas de rayos X del TiO_2 , la zeolita natural (CLI) y el compuesto $\text{TiO}_2\text{-CLI1.5}$.



4.1.2 Dióxido de titanio soportado en zeolita sintética tipo A ($\text{TiO}_2/\text{NaA1.5}$).

Los patrones de difracción de TiO_2 , NaA y del material compuesto TiO_2/NaA se muestran en la Figura 14. El patrón de difracción de DRX de la zeolita sintética presenta el conjunto de reflexiones propio de esta estructura en $2\theta = 21.64^\circ$, 23.96° , 27.08° , 29.91° y 34.15° , que corresponden a las direcciones de los planos cristalográficos: (600), (622), (642), (820) y (664), los cuales indican la coincidencia de la estructura cúbica representativas de zeolita NaA de acuerdo con la carta cristalográfica PDF No. 00-057-0132, no se muestran señales de otro tipo de material (Ashfaq et al., 2022).

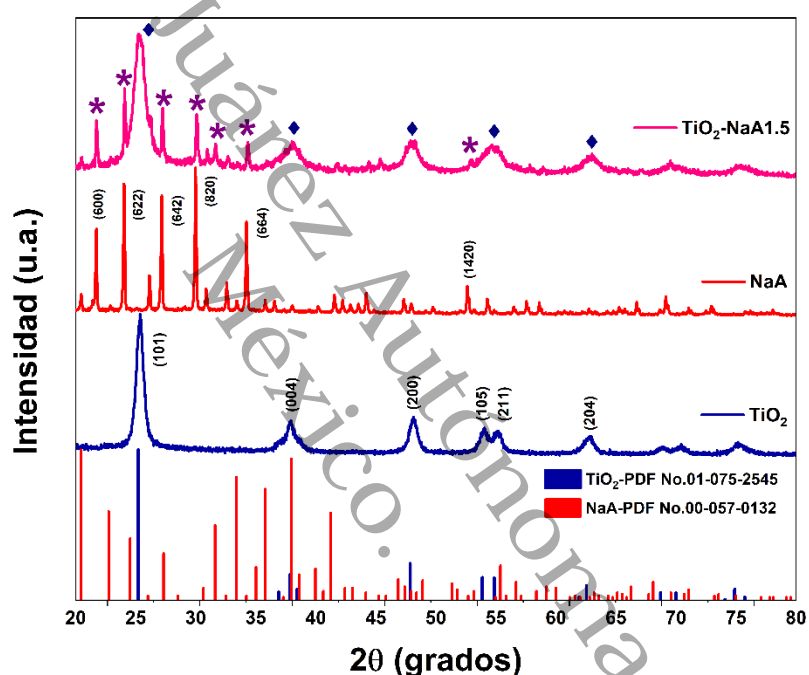
En el difractograma de TiO_2 puro se observa la fase anatasa, cuyas reflexiones características aparecen en $2\theta = 25.22^\circ$, 37.81° , 47.85° , 53.87° , 54.85° y 62.54° , asignadas a los planos (101), (004), (200), (105), (211) y (204), respectivamente (Cahyanti et al., 2023).

En el material compuesto TiO_2/NaA 1.5 se observan al mismo tiempo las reflexiones de anatasa y de NaA, lo que indica presencia de ambas fases. Las intensidades de anatasa son

similares a las del TiO_2 prístino. Alrededor de 25.3° (2θ), posición del (101) de anatasa, se aprecia solo una contribución débil de NaA; por su parte, las reflexiones más intensas de NaA (622 y 642) se distinguen a un lado del pico de TiO_2 y no muestran superposición apreciable. Dentro de la resolución del gráfico, no se observa un corrimiento claro en la posición de (101) (Mahamud et al., 2023). El valor determinado para el tamaño de cristalito para NaA fue 56 nm.

Figura 14

Difractogramas de rayos X del TiO_2 , la zeolita sintética (NaA) y el compuesto TiO_2 -NaA1.5.



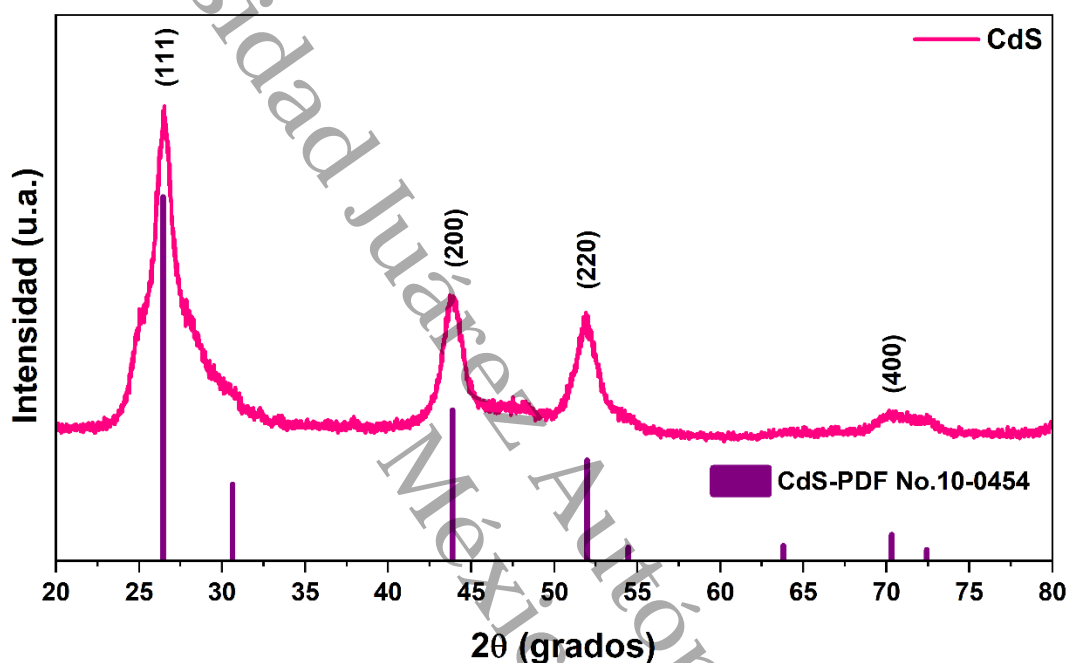
4.1.3 Sulfuro de cadmio (CdS)

En la Figura 15 se presenta el difractograma del CdS medido en el intervalo $2\theta = 20-80^\circ$. Se reconocen las reflexiones características de una misma fase se localizan en $2\theta = 26.50^\circ$, 30.80° , 43.96° y 64.02° , que se asignan a los planos (111), (200), (220) y (400), respectivamente, correspondientes a CdS con estructura cristalina cúbica tipo blanda de zinc, que coinciden con la carta cristalográfica: PDF No. 10-0454 (Aziz et al., 2023). No aparecen reflexiones atribuibles a la fase hexagonal (wurtzita) ni corrimientos en la posición de los picos, lo que confirma la

estabilidad de la fase cúbica del CdS reportada en la literatura reciente (Umaru et al., 2023; Suryawanshi et al., 2023). Se determinó un tamaño de cristalito de aproximadamente 9 nm.

Figura 15

Difractograma de rayos X del sulfuro de cadmio (CdS).



4.1.4 Compósito TiO_2 -CdS soportado en zeolita natural (TiO_2 -CdS/CLI).

Se estudiaron tres compósitos: TiO_2 -CdS/CLI0.5, TiO_2 -CdS/CLI1.0 y TiO_2 -CdS/CLI1.5; en todos los casos, el CdS se mantuvo en 2% en peso (0.0738 g).

Como se observa en la Figura 16 a), en los tres difractogramas se reconocen con claridad las reflexiones de anatasa (TiO_2) en $2\theta = 25.22^\circ$ (101), 37.81° (004), 47.85° (200), 53.87° (105), 54.85° (211) y 62.54° (204), PDF No. 01-075-2545), y confirman que la fase se mantiene estable durante la síntesis, sin evidencia de rutilo, en concordancia con lo señalado por Chinnasamy et al., (2020).

Además, se distinguen las señales de la clinoptilolita (CLI) en 20.40° (40-1), 22.34° (131), 26.00° (22-2), 26.86° (002), 30.05° (151), 31.99° (530) y 36.12° (351); el patrón de CLI se

identifica en las tres muestras conforme a la carta cristalográfica PDF No. 00-039-1383, y su contribución se acentúa conforme aumenta la cantidad de soporte. En particular, CdS-TiO₂/CLI1.5 muestra mayor intensidad en los picos de CLI, sin afectar la cristalinidad de TiO₂, cuyos picos de anatasa permanecen definidos para todas las proporciones, como también se ha reportado en materiales soportados en zeolitas (Jalloul et al., 2022).

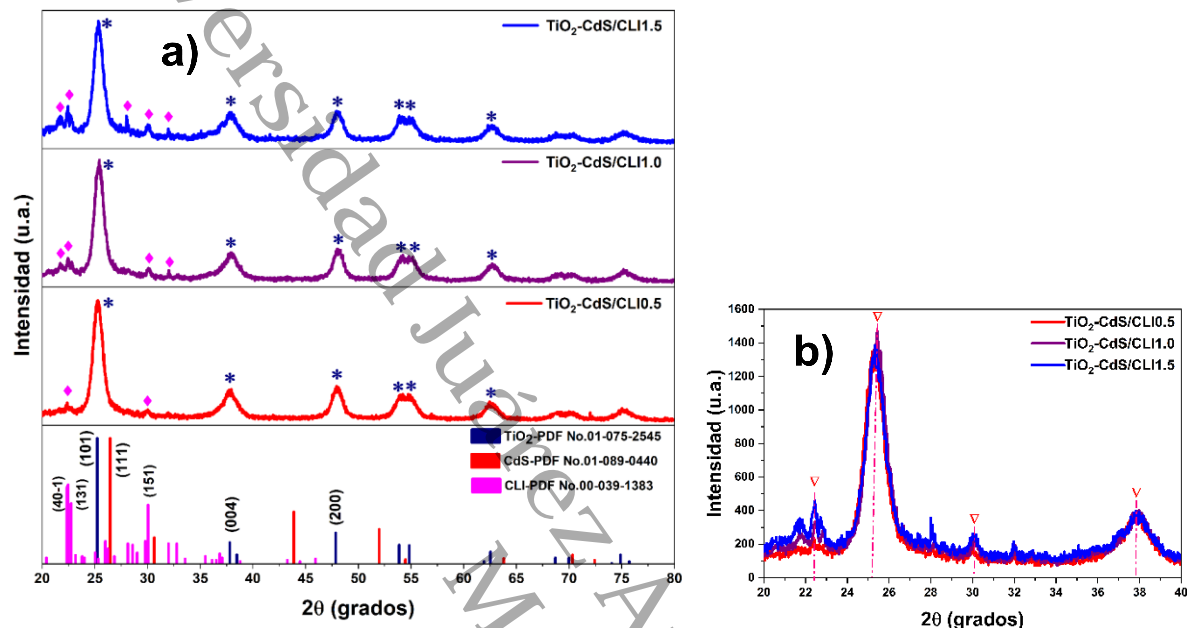
Aunque el CdS se incorporó en 2 % en las tres muestras, no se detectan picos atribuibles a CdS en los difractogramas: su contribución es débil frente a TiO₂ y, en bajo ángulo —donde domina el (101) de anatasa, no se resuelven máximos independientes (queremos decir que no se ve ningún pico de CdS por sí solo; o bien la señal es demasiado débil, o queda dentro al pico intenso de TiO₂ y no se puede diferenciar). Las posiciones de los picos de TiO₂ se conservan para las tres composiciones.

En la Figura 16 b). Se observa un barrido de 20-40° (2θ), el cual permitió analizar con detalle la zona de (101) = 25.22°. Para CLI0.5, CLI1.0 y CLI1.5, el máximo aparece en la misma posición dentro de la resolución del gráfico; no se observa un corrimiento claro entre composiciones. Además del (101), se aprecian contribuciones de CLI cerca de ~22-23° y ~30.

En conjunto, los tres compósitos muestran presencia simultánea de anatasa y CLI; la incorporación de CdS no modifica las posiciones de los picos de TiO₂ ni induce desplazamientos detectables en (101). Los resultados de DRX sostienen que la fase anatasa de TiO₂ permanece estable en todos los compósitos, sin formación de nuevas fases (Nieto-Caballero et al., 2007 Jalloul et al., 2022).

Figura 16

Difractogramas de rayos X de los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI}$ con diferentes proporciones de zeolita natural (a) y su ampliación en el rango $2\theta = 20^\circ - 40^\circ$ (b).



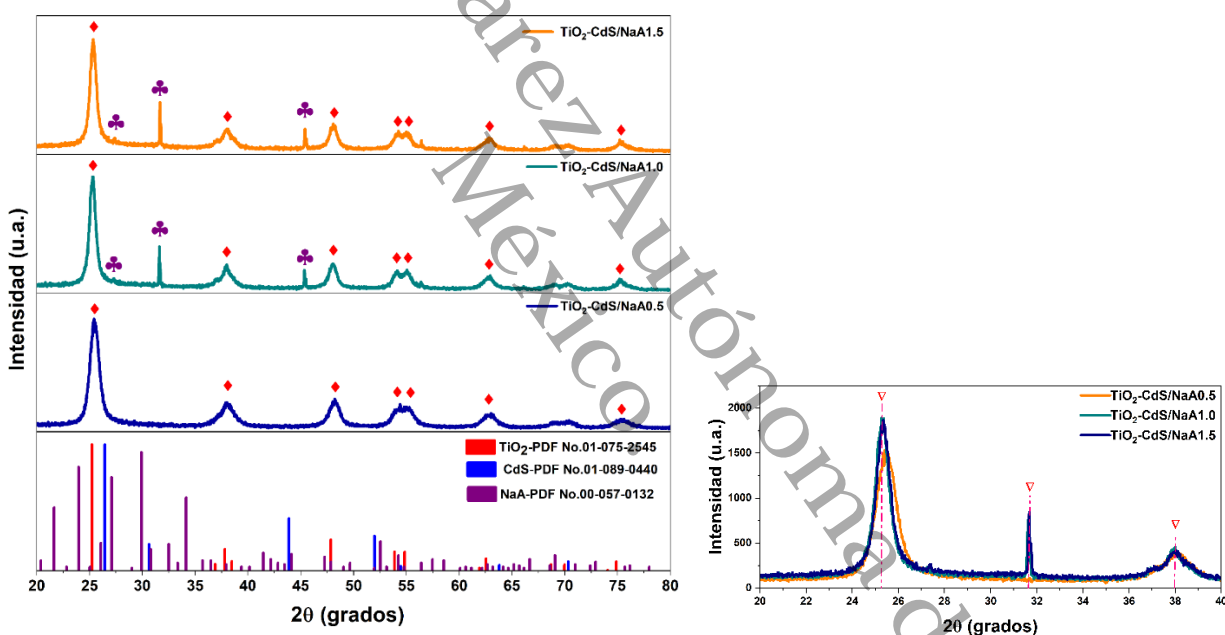
4.1.5 Compósito $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportado en zeolita sintética tipo A ($\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA}$).

Los patrones de difracción de rayos X de los compósitos: $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$, $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.0}$ y $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$ se muestran en la Figura 17. Se observaron señales claras correspondientes a la fase anatasa del TiO_2 . Los difractogramas muestran que dicha fase se conservó estable durante la síntesis, con ligeras variaciones de intensidad que no implican cambios de fase, lo que indica que el proceso no alteró estructura. También se identificaron los picos característicos de la zeolita NaA, cuya intensidad aumenta al incrementar el porcentaje del soporte (Armaković & Armaković, 2025). En cambio, no se detectan señales atribuibles al CdS en ninguna de las muestras. Este resultado coincide con otros estudios que señalan que, cuando el CdS se encuentra disperso en cantidades pequeñas o en estado amorfo, puede no reflejar señales definidas en DRX (Chinnasamy et al., 2020 Lazauskas et al., 2019).

En la muestra CdS-TiO₂/NaA0.5, el plano (101) aparece a un ángulo ligeramente mayor (de ~25.22° a ~25.46°). En difracción, un 2θ mayor significa que los planos del cristal quedan ligeramente más próximos. En esta interfaz se produce, a la vez, una tensión compresiva leve de la red, sin cambio de fase cristalina. No se observan picos resueltos de CdS, probablemente por su baja fracción y/o alta dispersión, como se ha informado en compósitos afines (Gao et al., 2017; Orha et al., 2025).

Figura 17

Difractogramas de rayos X de los compósitos TiO₂-CdS/NaA con diferentes proporciones de zeolita sintética.



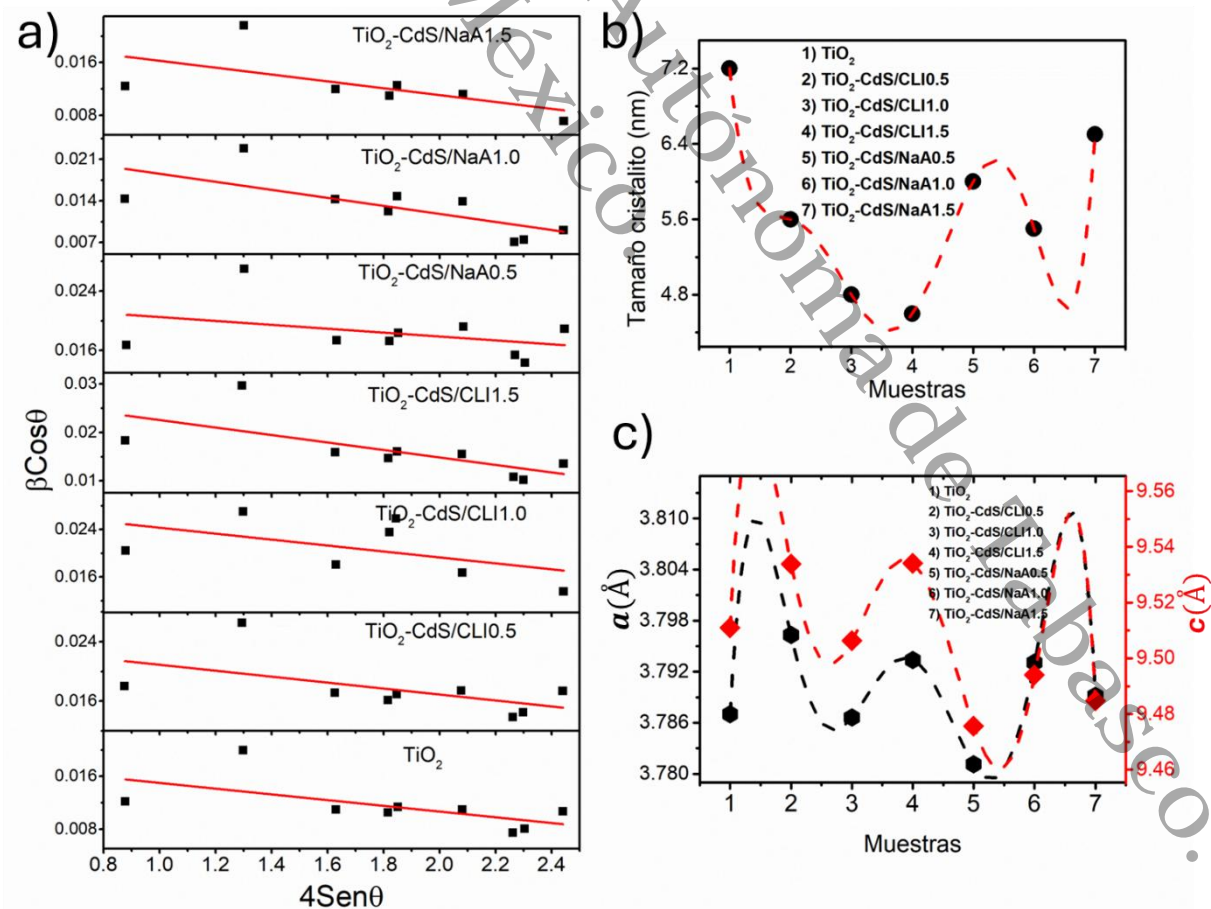
Se utilizó el modelo de deformación uniforme (UDM) del análisis Williamson-Hall, para estimar la deformación en la red del TiO₂ causada por la incorporación de las partículas de CdS, así como el uso de las zeolitas como soportes. El modelo UDM considera (Sahadat Hossain & Ahmed, 2023):

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta \quad (1)$$

Donde K es un factor de forma (0.9) y ε es el microestres. A través de un ajuste lineal de la gráfica de $\beta \cos \theta$ vs $4 \sin \theta$ de los picos de difracción podemos conocer la pendiente y la intersección en el eje de las ordenadas que representan la deformación y el tamaño de cristalito, respectivamente (Figura 18-a) (Mote et al., 2012), en la Tabla 4 se resumen los datos obtenidos.

Figura 18.

a) Análisis W-H de las partículas de TiO_2 utilizando el modelo UDM. Ajuste lineal de los datos, la tensión se extrae de la pendiente y el tamaño de cristalito se obtiene empleando la intersección con el eje de las ordenadas. b) Tamaño de cristal y c) parámetros de red de la estructura tetragonal de la fase anatasa.



La tensión en la red del TiO_2 incrementa ligeramente cuando se incorpora CdS y la zeolita en menor proporción, es decir para los compuestos con CLI0.5 y NaA0.5. Algunos reportes indican que la presencia de los átomos de Cd y S provocan desajustes estructurales en el TiO_2 ya que existe la posibilidad de sustitución de los iones de cadmio por los de titanio o que éstos nuevos iones se sitúen de manera intersticial (Moghaddam & Nasirian, 2012; Piler et al., 2020), lo que se traduce en modificaciones en los parámetros de red (Figura 2-c). De acuerdo con el reporte de Hu, los iones de Cd provocan el efecto Jahn-Teller, en la estructura cristalina de TiO_2 , distorsionándola uniformemente en tres dimensiones para acomodar los iones de Cd (Hu et al., 2020), provocando cambios en los parámetros de red.

Por otro lado, cuando la cantidad de zeolita (para las muestras con CLI1.5 y NaA1.5) en los compósitos, la intensidad de los picos de difracción del TiO_2 disminuye y además la tensión disminuye, lo cual se puede asociar a una disminución de los defectos intrínsecos del TiO_2 al interactuar con la zeolita en el medio de reacción, ya que se pueden generar enlaces Ti-O-Si (Hakki et al., 2017). Los valores negativos observados en la Tabla 4, para la tensión de la red se han reportado como fuerzas de compresión sobre esta (Moghaddam & Nasirian, 2012). Como se puede observar en la Figura 18-b, en general, el tamaño de cristalito del TiO_2 disminuyó con la incorporación de las zeolitas, ya que estas inhiben la agregación y el crecimiento del TiO_2 , garantizando que las partículas del semiconductor se encuentren dispersas en el soporte (Bukit et al., 2021; Jalloul et al., 2022), además que los poros de las zeolitas actúan como microreactores, los cuales restringe el crecimiento del TiO_2 (Lafjah et al., 2011).

Tabla 4.

Parámetros estructurales estimados por DRX de las partículas de TiO_2 sintetizadas con diferentes porcentajes de zeolitas, natural y sintética.

Muestra	Tamaño de cristalito promedio (nm)	Tensión	Parámetros de red (Å)	
			<i>a</i>	<i>c</i>
TiO_2	7.2	-0.00434	3.7870	9.5109
$\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$	5.6	-0.00401	3.7963	9.5338
$\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.0}$	4.8	-0.01020	3.78663	9.50630
$\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$	4.6	-0.00772	3.7934	9.5341
$\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$	6	-0.00262	3.7811	9.4756
$\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.0}$	5.5	-0.00676	3.79309	9.49399
$\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$	6.5	-0.0052	3.7892	9.4848

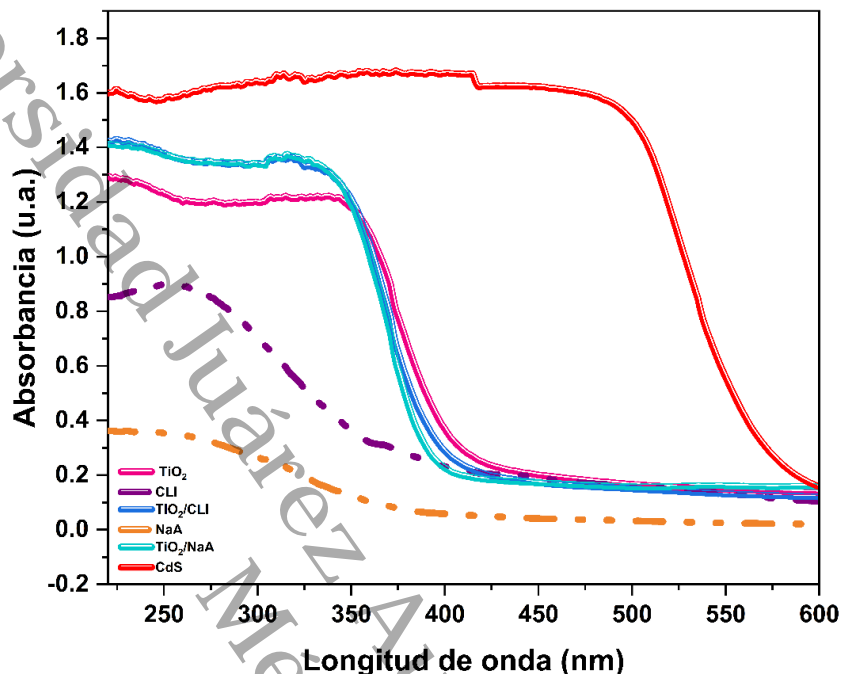
4.2 Espectros UV-Vis y banda prohibida.

4.2.1 Espectros de absorbancia UV-Vis de TiO_2 , CdS, CLI, NaA y TiO_2 -zeolita.

Los espectros de absorbancia se registraron a temperatura ambiente utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (220-600 nm). La Figura 19 muestra los espectros de los fotocatalizadores de TiO_2 , CLI, TiO_2/CLI , NaA, TiO_2/NaA y CdS. El CdS exhibe un borde alrededor de ~500 nm, lo que confirma absorción en la región visible y su potencial como material fotoactivo bajo luz visible (Yang et al., 2019). El TiO_2 presenta un borde nítido en UV (~380-400 nm) y una elevación suave entre ~320-350 nm atribuible a absorciones en el UV. Aunque las zeolitas no presentan propiedades ópticas, se registraron sus espectros para documentar su comportamiento de dispersión, se observa una señal débil en UV. En consecuencia, el acoplamiento TiO_2 -zeolita (CLI/NaA) no extiende la absorción hacia el visible. Además, los compósitos TiO_2/CLI y TiO_2/NaA conservan la posición del borde en UV de TiO_2 , y las diferencias entre curvas se asocian principalmente a la dispersión de soporte.

Figura 19

Espectros de absorción UV-Vis de TiO_2 , CdS, zeolitas (CLI y NaA) y sus compósitos TiO_2 /zeolita.

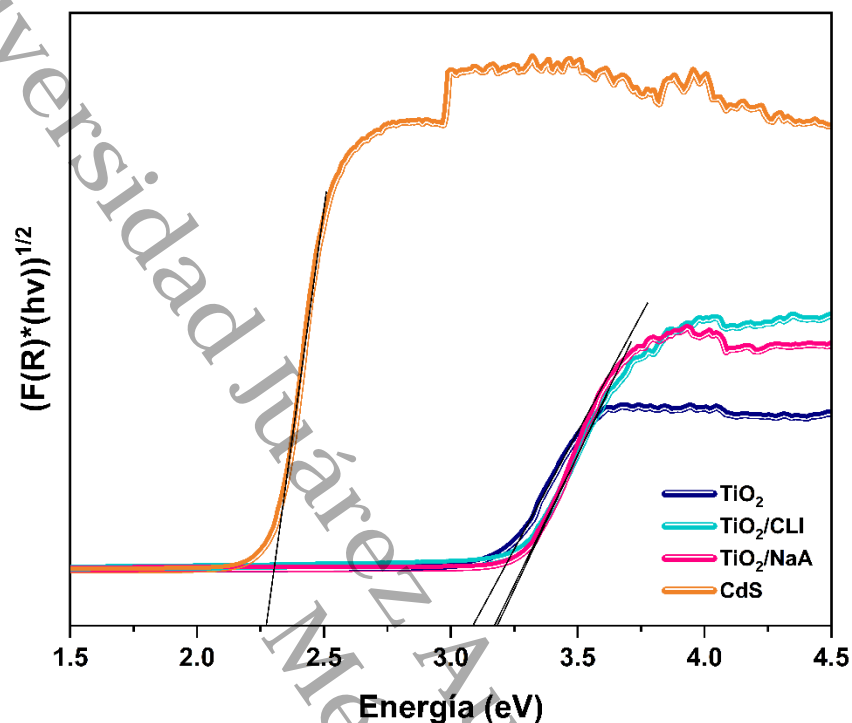


4.2.2 Estimación de la banda prohibida de TiO_2 , CdS y TiO_2 - zeolita.

Se evaluaron los espectros de absorción UV-Vis mediante la banda prohibida de energía (E_g) desde los puntos insertados, la estructura de CdS se determina en 2.30 eV, ligeramente inferior al valor reportado en la literatura para CdS (2.42 eV). La reducción de la brecha de banda de un material puede verse influenciada por el aumento de tamaño de cristalito, efectos de superficie y variación propia del método; aun así, confirma absorción en visible (Yang et al., 2019). En el TiO_2 , la extrapolación por Kubelka–Munk da $E_g = 3.22$ eV (Aziz et al., 2023). Al soportarlo en zeolita se observa un aumento leve: TiO_2 /CLI = 3.26 eV y TiO_2 /NaA = 3.30 eV. No hay evidencia de cambio de fase. Cuando la fracción de zeolita es alta, estos efectos ópticos pueden acentuarse, en concordancia con la tendencia 3.22 \rightarrow 3.26 \rightarrow 3.30 eV (Piedra López et al., 2021).

Figura 20

Determinación de la energía de banda prohibida (E_g) de TiO_2 , CdS y los compósitos TiO_2 /zeolita.

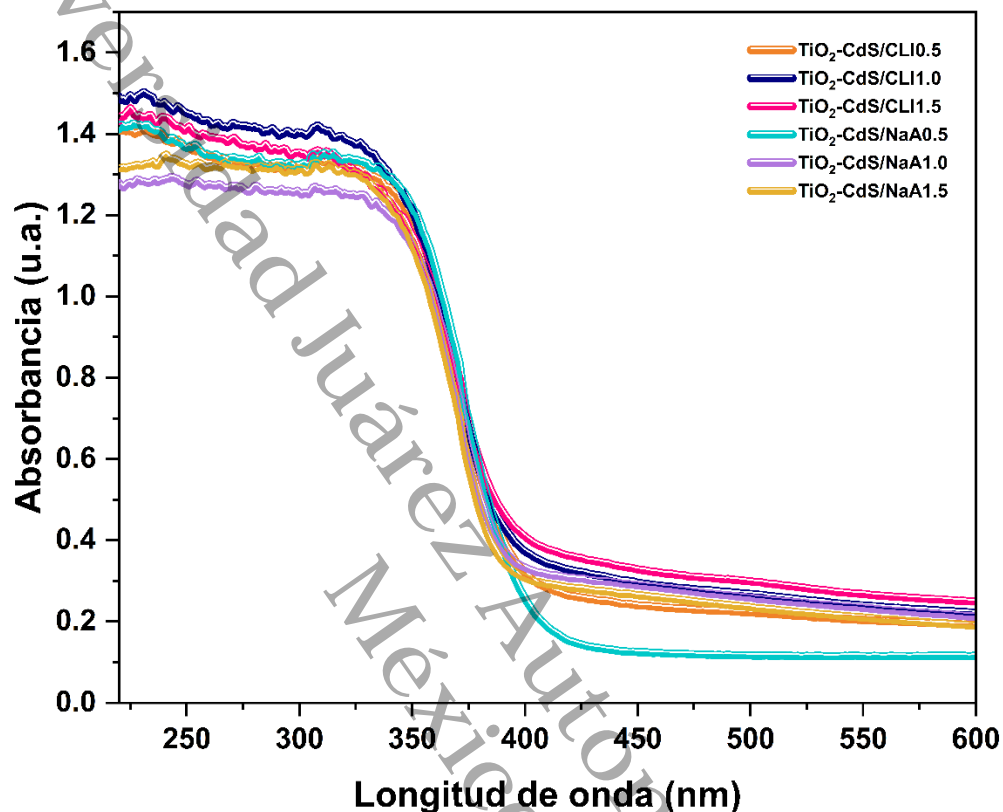


4.2.3 Espectros UV-Vis de los compósitos TiO_2 -CdS con soportes zeolíticos (CLI, NaA).

Absorbancia UV-Vis de los compósitos TiO_2 -CdS/zeolita (CLI y NaA). Los espectros se observan en la Figura 21 donde se muestran que el borde de absorción se mantiene en $\sim 380 - 400$ nm, característico de TiO_2 (anatasa) (Huayna et al., 2024). Por debajo de ~ 350 nm la señal aumenta porque está en UV, no porque cambie el borde. La contribución de CdS en la región visible está atenuada es decir baja fracción y fuerte dispersión en el soporte, de modo que no se observa un desplazamiento evidente del borde hacia el visible. Las diferencias de altura entre las series (0.5/1.0/1.5) se explican sobre todo por la dispersión/porosidad del soporte y por cómo se reparte el material activo sobre la zeolita, más que por cambios reales en los niveles de energía del material. En resumen, el soporte zeolítico afecta la línea base del espectro por dispersión, pero no genera nuevas bandas de absorción (Piedra López et al., 2021).

Figura 21

Espectros de absorbancia UV-Vis de los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA).



4.2.4 Estimación de la banda prohibida de los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ /zeolita (CLI y NaA).

La determinación del valor de la energía de banda prohibida (E_g) para cada muestra se realizó a partir de los gráficos de Kubelka-Munk $(F(R) \cdot hv)^1 / ^2$ vs Energía, mostrados en la Figura 22. En los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA}$, el borde óptico se mantiene prácticamente constante en 3.26 eV en toda la serie. Esto indica que, dentro de este rango de proporciones, el TiO_2 es el material que domina la absorción, mientras que la zeolita NaA únicamente influye de manera leve en la intensidad de la señal, sin modificar la posición del borde de absorción.

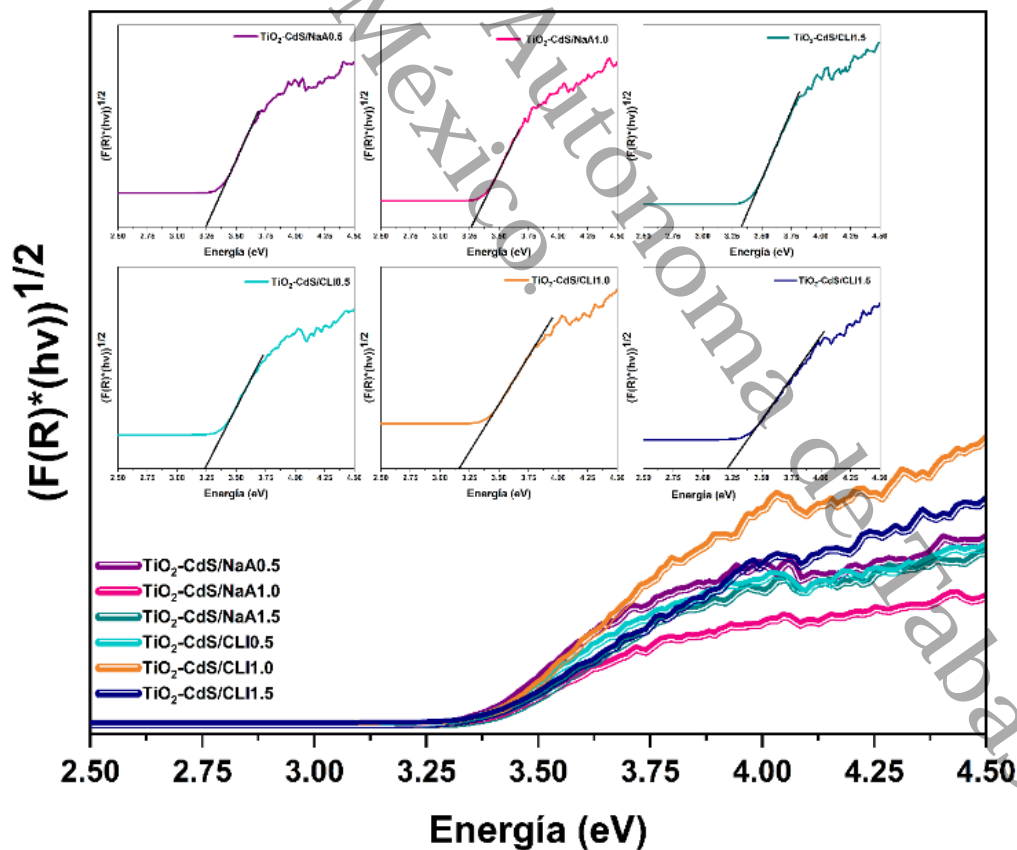
Por otro lado, en los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI}$, el valor de E_g aumenta a 3.38 eV, evidenciando un desplazamiento al azul respecto al TiO_2 puro (3.22 eV) y a $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA}$ (3.26 eV). Este incremento puede atribuirse a que la zeolita CLI genera una mayor interacción óptica

con el TiO_2 , lo que provoca una ligera variación en la respuesta del material, aunque sin alterar su estructura cristalina.

En ambos soportes, la contribución del CdS es mínima debido a su baja proporción y a la alta dispersión dentro del compósito. Estos resultados son coherentes con lo observado en la caracterización estructural (DRX), donde se confirmó la conservación de la fase anatasa. Los ligeros cambios observados (del orden de centésimas de eV) no implican la formación de nuevas fases, sino que se asocian a efectos ópticos del soporte y a una leve interacción entre el TiO_2 y las zeolitas (Piedra López et al., 2021).

Figura 22

Determinación de la energía de banda prohibida (E_g) de los compósitos TiO_2 -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA) mediante el método de Kubelka–Munk.



En los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA}$, el borde óptico se mantiene prácticamente constante en 3.26 eV en toda la serie. Esto indica que, dentro de este rango de proporciones, el TiO_2 es el material que domina la absorción, mientras que la zeolita NaA únicamente influye de manera leve en la intensidad de la señal, sin modificar la posición del borde de absorción.

Por otro lado, en los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI}$, el valor de E_g aumenta a 3.38 eV, evidenciando un desplazamiento al azul respecto al TiO_2 puro (3.22 eV) y a $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA}$ (3.26 eV). Este incremento puede atribuirse a que la zeolita CLI genera una mayor interacción óptica con el TiO_2 , lo que provoca una ligera variación en la respuesta del material, aunque sin alterar su estructura cristalina.

En ambos soportes, la contribución del CdS es mínima debido a su baja proporción y a la alta dispersión dentro del compósito. Estos resultados son coherentes con lo observado en la caracterización estructural (DRX), donde se confirmó la conservación de la fase anatasa. Los ligeros cambios observados (del orden de centésimas de eV) no implican la formación de nuevas fases, sino que se asocian a efectos ópticos del soporte y a una leve interacción entre el TiO_2 y las zeolitas (Piedra López et al., 2021).

4.3 Espectroscopía Raman

4.3.1 TiO_2 , CdS y compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolita.

Los espectros Raman obtenidos con excitación láser de 633 nm para TiO_2 , CdS y los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas (CLI y NaA) se registraron bajo una misma condición de excitación, seleccionada por su mejor relación señal/ruido como se observa en la Figura 23.

En TiO_2 se reconocen las bandas características de la fase anatasa: un modo intenso en $\sim 143 \text{ cm}^{-1}$ (E_g), junto con contribuciones en $\sim 395\text{-}396 \text{ cm}^{-1}$ (B_{1g}), $\sim 514\text{-}517 \text{ cm}^{-1}$ (A_{1g}/B_{1g}) y $\sim 639 \text{ cm}^{-1}$ (E_g). Estas posiciones confirman que la estructura anatasa se conserva tras la preparación de los materiales (Mamedov, 2020; Pinto et al., 2020; Taudul et al., 2023).

El CdS exhibe el modo LO en $\sim 302 \text{ cm}^{-1}$ y su sobretono 2LO en ~ 601 (Prabhu & Khadar, 2008) para CdS cristalino (Prabhu & Khadar, 2008). Estas posiciones se emplearon como guía para buscar la fase de CdS en los compósitos (Bhattacharya et al., 2016; Sivasubramanian et al., 2006).

En los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI}$ (0.5 y 1.5 g) predominan las bandas de anatasa; el modo LO de CdS ($\sim 302 \text{ cm}^{-1}$) no se resuelve y la contribución en $\sim 601 \text{ cm}^{-1}$ se observa únicamente como una señal débil dentro del nivel de ruido. Este comportamiento se atribuye a la baja sección Raman de CdS bajo la excitación utilizada y a la elevada intensidad del modo Eg (1) de TiO_2 , que enmascara señales débiles; adicionalmente, la dispersión y la fluorescencia asociadas al sistema soportado pueden reducir la detectabilidad. La presencia de CdS en estos compósitos se confirma por DRX, por lo que la falta de un máximo definido en $\sim 302 \text{ cm}^{-1}$ no implica ausencia de la fase (Petcu et al., 2023).

En $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$ se mantiene la firma de anatasa y se aprecia una débil contribución en $\sim 601 \text{ cm}^{-1}$, compatible con el 2LO de CdS, mientras que el LO ($\sim 302 \text{ cm}^{-1}$) no se separa del fondo con esta excitación. Este patrón es consistente con compósitos soportados donde el sobretono permanece visible cuando el modo fundamental se atenúa por contraste con el Eg (1) de TiO_2 y por efectos ópticos de la matriz porosa (Novembre et al., 2024).

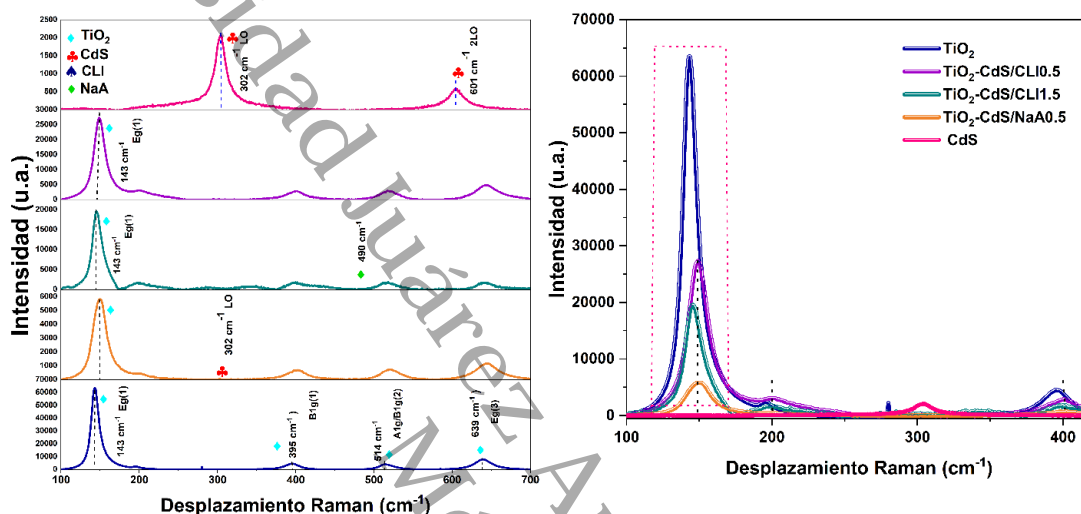
La muestra $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$ no se incluye en la figura por presentar un fondo elevado sin picos resolubles en $100\text{--}700 \text{ cm}^{-1}$, atribuible a fluorescencia y dispersión óptica del soporte. Este efecto deja la señal vibracional por debajo del nivel de detección y no contradice la presencia de las fases identificadas por DRX.

En conjunto, Raman corrobora la conservación de la fase anatasa del TiO_2 en todos los compósitos y, aunque la detectabilidad de CdS es limitada bajo la condición empleada, la evidencia espectral (2LO tenue en NaA0.5) y los resultados estructurales independientes

respaldan la coexistencia $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ sobre zeolitas. El soporte actúa principalmente como matriz de dispersión, sin inducir nuevas fases cristalinas.

Figura 23

Espectros Raman de TiO_2 , CdS, zeolitas (CLI y NaA) y compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/zeolita}$, mostrando el intervalo completo y la ampliación en el rango 100-400 cm^{-1} .



4.4 Fisisorción de nitrógeno (N_2)

4.4.1 Isotermas de adsorción-desorción de N_2 de los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas CLI y NaA.

En la Figura 24 se presentan las isotermas de adsorción-desorción de N_2 obtenidas a 77 K mediante un baño de nitrógeno líquido, junto con la distribución de tamaños de poro de los compósitos 23 (a) $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$, 23 (b) $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$, 23 (c) $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$, 23 (d) $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$ y 23 (e) TiO_2 . Los insertos muestran la distribución BJH (rama de desorción) correspondiente a cada muestra.

En las tres isotermas se observa un isoterma tipo IV con un lazo de histéresis H3 en el rango de presiones relativas intermedias ($P/P_0 \approx 0.4\text{-}0.9$), propio de sólidos mesoporosos.

Este tipo de curva se asocia con la formación de multicapa y la condensación capilar del nitrógeno en poros del orden de 2–50 nm, mientras que la histéresis H3 indica la presencia de

poros en forma de lámina o hendidura, típicos de estructuras con agregados no uniformes. Este comportamiento confirma que los materiales poseen una porosidad abierta y canales accesibles, condiciones favorables para la difusión de moléculas en procesos catalíticos (Xu et al., 2020).

En la muestra $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$ se registró la mayor área superficial BET $\approx 98.6 \text{ m}^2/\text{g}$, con un volumen total de poro de $0.142 \text{ cm}^3/\text{g}$ y un diámetro promedio BJH de 3.6 nm , lo que refleja una mesoporosidad fina y uniforme. La zeolita sintética NaA, en baja proporción, favoreció la dispersión de las fases activas (TiO_2 y CdS) y generó una textura abierta con poros homogéneos.

Por su parte, el compuesto $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$ presentó un área superficial $78.9 \text{ m}^2/\text{g}$, un volumen total de poro de $0.095 \text{ cm}^3/\text{g}$ y un diámetro BJH de 3.6 nm . Estos valores indican que el soporte natural CLI conserva la estructura mesoporosa, aunque con menor accesibilidad debido a su red más compacta. Aun así, mantiene una porosidad estable y adecuada para dispersar las partículas semiconductoras.

Finalmente, el material $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$ mostró una disminución del área superficial $56.8 \text{ m}^2/\text{g}$ y del volumen de poro $0.103 \text{ cm}^3/\text{g}$, junto con un incremento del diámetro medio 4.6 nm . Este comportamiento sugiere una obstrucción parcial de mesoporos finos o aglomeración de partículas causada por la mayor cantidad de soporte. Al aumentar la proporción de NaA, los espacios porosos pueden cubrirse parcialmente, reduciendo la superficie expuesta sin alterar la morfología general del material (de Dios et al., 2023).

En conjunto, las isotermas tipo IV con lazo H3 y los picos BJH entre 3 y 5 nm confirman que todos los compósitos son mesoporosos. La formulación NaA0.5 ofreció la mayor área y volumen de poro, evidenciando la mejor dispersión de las fases activas; CLI0.5 mantuvo una textura mesoporosa uniforme, y NaA1.5 mostró una reducción del área efectiva atribuida a la saturación del soporte. Estas características texturales confirman que los materiales sintetizados poseen una porosidad accesible y estable, parámetro clave para favorecer la difusión de

moléculas y el contacto entre las fases activas y el medio acuoso, lo que influirá directamente en su eficiencia fotocatalítica (Septiningrum et al., 2024; Xu et al., 2020).

Además de los compósitos mencionados, se evaluaron las propiedades texturales del TiO_2 puro y del compósito $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$, con el fin de comparar el efecto de la incorporación del semiconductor CdS y del soporte zeolítico sobre la estructura porosa del material.

El TiO_2 presentó un área superficial de $65.8 \text{ m}^2/\text{g}$, un volumen de poro de $0.122 \text{ cm}^3/\text{g}$ y un tamaño promedio de poro de 5.27 nm . Estos valores confirman la presencia de una estructura predominantemente mesoporosa, característica común en materiales de TiO_2 obtenidos por el método sol-gel, donde la formación de agregados de nanopartículas genera espacios interparticulares que actúan como poros mesoscópicos (Xu et al., 2020).

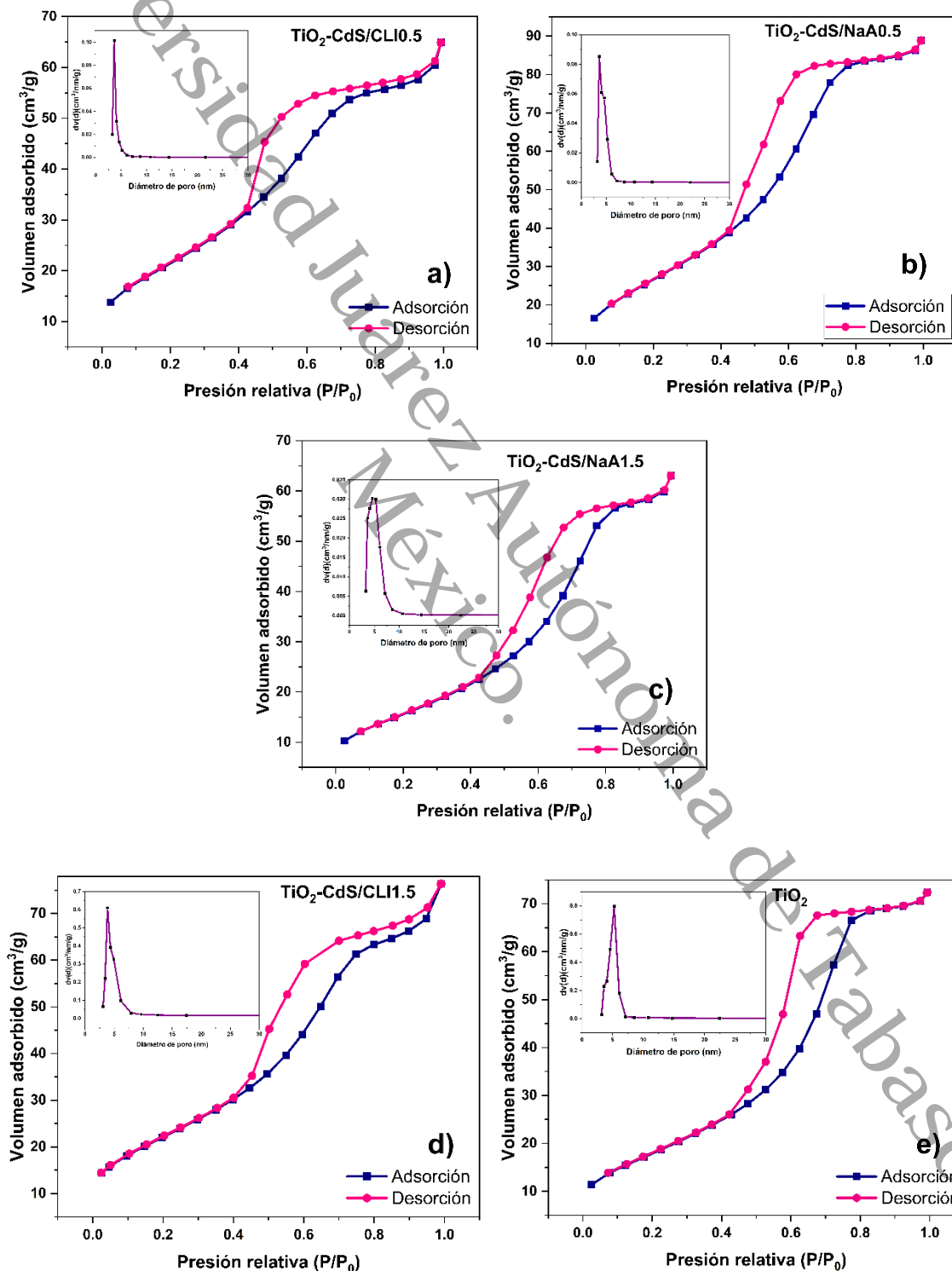
Por otro lado, el compósito $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$ mostró un incremento del área superficial hasta $80.7 \text{ m}^2/\text{g}$, mientras que el volumen de poro fue de $0.119 \text{ cm}^3/\text{g}$ y el diámetro promedio de poro de 3.84 nm . El aumento del área superficial respecto al TiO_2 puro puede atribuirse a la incorporación de la zeolita natural (clinoptilolita), cuya estructura microporosa y elevada área específica favorece la dispersión de las partículas semiconductoras sobre su superficie.

Asimismo, la ligera disminución del diámetro de poro en el compósito puede relacionarse con la deposición de las fases activas TiO_2 y CdS dentro de los canales o cavidades de la zeolita, lo que reduce el tamaño efectivo de los poros accesibles. Este fenómeno es común en materiales soportados, donde la interacción entre el semiconductor y la matriz porosa modifica las propiedades texturales del sistema.

En conjunto, las isothermas tipo IV con histéresis H3 y los tamaños de poro en el intervalo de $3\text{-}5 \text{ nm}$ confirman que todos los materiales sintetizados presentan mesoporosidad, lo cual resulta favorable para aplicaciones fotocatalíticas. La presencia de poros en este rango facilita la difusión de moléculas orgánicas hacia los sitios activos del catalizador y mejora la interacción entre el contaminante y las fases semiconductoras, contribuyendo potencialmente a una mayor eficiencia en los procesos de degradación fotocatalítica (de Dios et al., 2023).

Figura 24

Isotermas de adsorción-desorción de N_2 de los compósitos TiO_2 -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA): (a) TiO_2 -CdS/CLI0.5, (b) TiO_2 -CdS/NaA0.5, (c) TiO_2 -CdS/NaA1.5, 23 (d) TiO_2 -CdS/CLI1.5 y 23 (e) TiO_2 .



La Tabla 5 resume las propiedades texturales de los compósitos (a) $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$, (b) $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$, (c) $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$, 23 (d) $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$ y 23 (e) TiO_2 . Obtenidas por fisisorción de N_2 a 77 K: área BET, volumen de poro y tamaño de poro BJH. Los valores muestran la tendencia general del sistema y servirán para la comparación entre formulaciones.

Tabla 5

Propiedades texturales por fisisorción de N_2 a 77 K. Área específica por BET, volumen de poro y tamaño de poro.

Muestra	Área superficial (m^2/g)	Volumen de poro (cm^3/g)	Tamaño de poro (nm)
$\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$	78.9	0.095	3.63
$\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$	98.6	0.142	3.62
$\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA1.5}$	56.8	0.103	4.61
$\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$	80.7	0.119	3.84
TiO_2	65.8	0.122	5.27

4.5 Fotoluminiscencia (PL)

4.5.1 Espectros de TiO_2 , CdS y compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas CLI y NaA.

Los espectros de PL se obtuvieron a temperatura ambiente con excitación de 533 nm, empleando el mismo arreglo óptico que en Raman distancia focal: 550 mm. La Figura 25 compara las emisiones de TiO_2 , CdS y los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI}$ (0.5 y 1.5) y $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$.

En los compósitos se observa una banda ancha con máximo cercano a $\sim 585\text{-}590$ nm, característica de sistemas que incorporan CdS y su interfaz con TiO_2 . En cambio, TiO_2 y CdS puros presentan intensidades muy bajas, cercanas al nivel de fondo con esta configuración (Herrera-Ramos et al., 2025; Kontos et al., 2011).

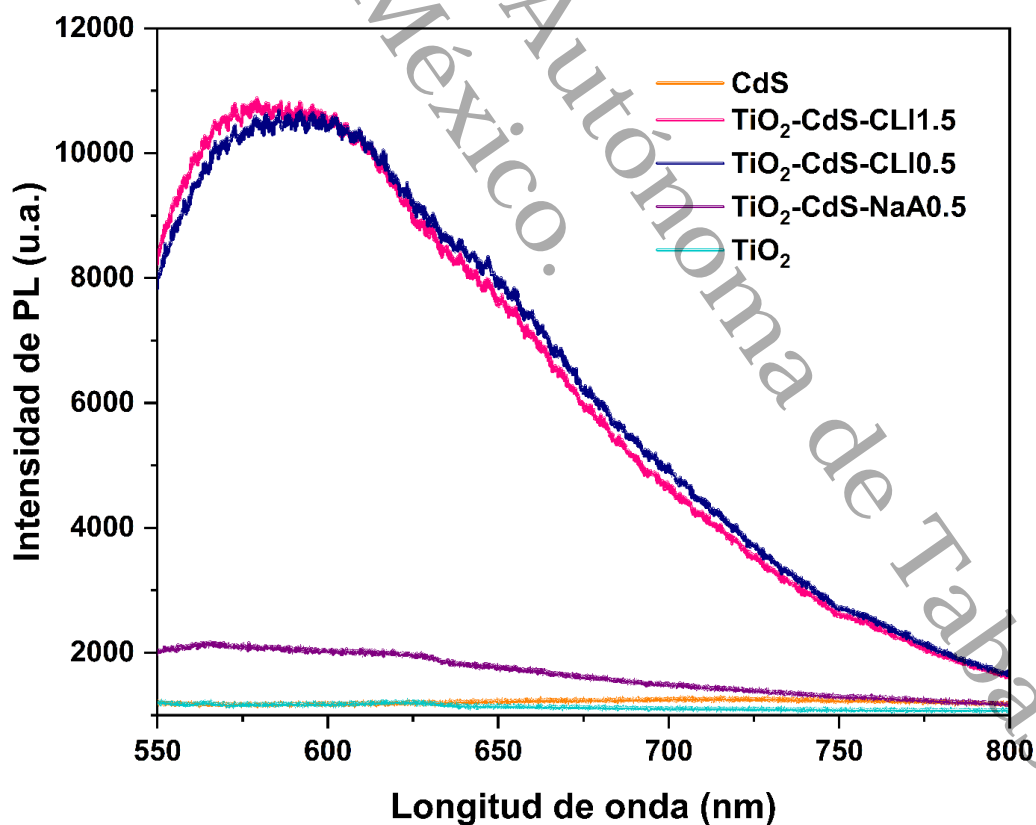
La intensidad relativa sigue el orden: $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5}$, $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5}$, $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$, CdS y TiO_2 . Una emisión más intensa indica que más electrones y huecos se vuelven a encontrar y emiten luz, mientras que una emisión más débil sugiere que se separan mejor, lo cual favorece la fotocatalisis. Bajo este criterio, $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$ muestra la menor

emisión entre los compósitos, lo que indica una separación de electrones y huecos más eficiente (Khima et al., 2024; Tristão et al., 2006). En los materiales soportados en CLI, la banda es más intensa y ligeramente más ancha lo que refleja que hay más lugares en el material donde los electrones y los huecos se vuelven a encontrar y emiten luz.

En síntesis, la fotoluminiscencia demuestra que $\text{TiO}_2\text{-CdS/NaA0.5}$ favorece una mejor separación de cargas, mientras que los compósitos con CLI presentan mayor emisión y, por tanto, mayor recombinación. Este comportamiento será útil para relacionarlo posteriormente con la actividad fotocatalítica de los materiales (Secundino-Sánchez et al., 2019; Mahamud et al., 2023).

Figura 25

Espectros de fotoluminiscencia (PL) de los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA), comparados con el TiO_2 y el CdS puros.



4.6 Fotocatálisis

4.6.1 Degradación del azul de metileno bajo radiación UV para TiO_2 y compósitos TiO_2 /zeolitas.

La Figura 26 muestra los espectros de absorción registrados durante la degradación del azul de metileno (MB) en un intervalo de 0 a 240 minutos. En todos los casos se observa una disminución progresiva de la banda principal localizada alrededor de 664 nm, característica del colorante, lo que confirma el avance de la fotodegradación bajo radiación UV.

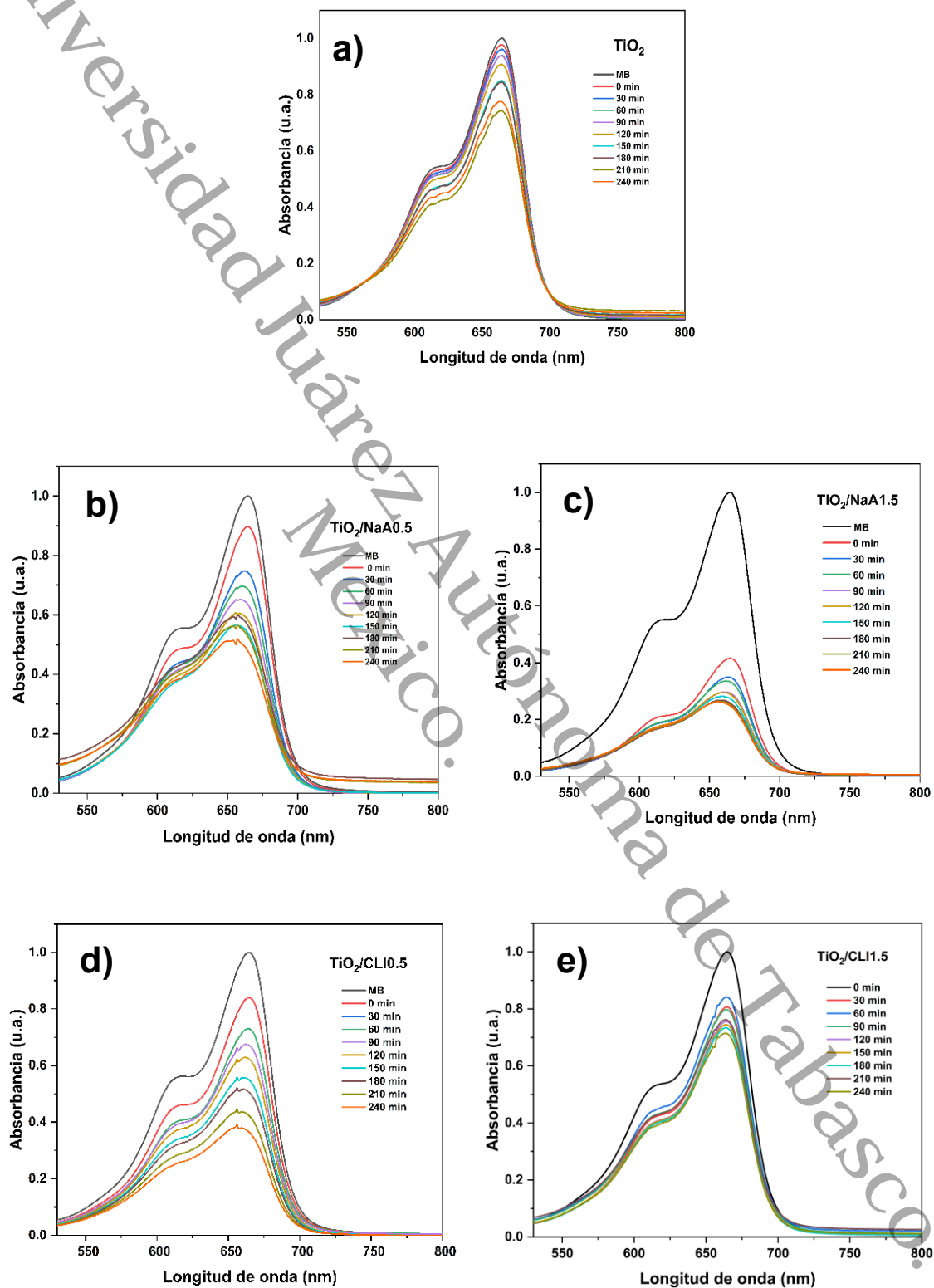
En la Figura 26 (a), correspondiente al TiO_2 , se observa la reducción de la señal que es moderada, alcanzando una eficiencia de degradación del 22.68 %. Este resultado coincide con lo reportado para el TiO_2 puro, cuya actividad suele verse limitada por la rápida recombinación de los pares electrón-hueco generados durante la irradiación (Huayna et al., 2024; Kim et al., 2021).

Al incorporar el TiO_2 sobre la zeolita NaA, las curvas de absorbancia disminuyen con mayor intensidad, evidenciando una mejora significativa en la actividad fotocatalítica. En la Figura 26 (b) (TiO_2 /NaA 0.5) la degradación del colorante aumenta de forma notable respecto al TiO_2 solo, mientras que en la Figura 26 (c) (TiO_2 /NaA 1.5) se alcanza la máxima eficiencia con un 75.25 % de degradación. Este comportamiento se atribuye a que la estructura porosa y la pureza de la zeolita sintética permiten una dispersión más homogénea de las partículas de TiO_2 , lo cual favorece la separación de cargas y la formación de especies oxidantes responsables de la fotodegradación del azul de metileno (Armaković & Armaković, 2025).

En la Figura 26 (d) y Figura 25 (e), correspondientes a los compósitos con zeolita natural CLI, también se observa una mejora frente al TiO_2 puro, aunque con una tendencia diferente. La muestra TiO_2 /CLI 0.5 alcanzó una eficiencia de 63.77 %, mientras que TiO_2 /CLI 1.5 presentó un valor ligeramente inferior (52.90 %). Este descenso puede deberse a que un exceso de soporte natural reduce la exposición del TiO_2 a la radiación o cubre parte de sus sitios activos, limitando la generación de especies reactivas de oxígeno (El-Naggar et al., 2024; Gul et al., 2021).

Figura 26

Espectros de absorción registrados durante la degradación del azul de metileno (MB)



En conjunto, los resultados evidencian que el uso de zeolitas como soporte potencia la actividad del TiO_2 al combinar procesos de adsorción superficial con una mejor dispersión del semiconductor. La zeolita NaA presentó el mejor desempeño al favorecer una transferencia de carga más eficiente, mientras que la CLI mostró una mayor sensibilidad a la cantidad de soporte, alcanzando su mejor respuesta con 0.5 g.

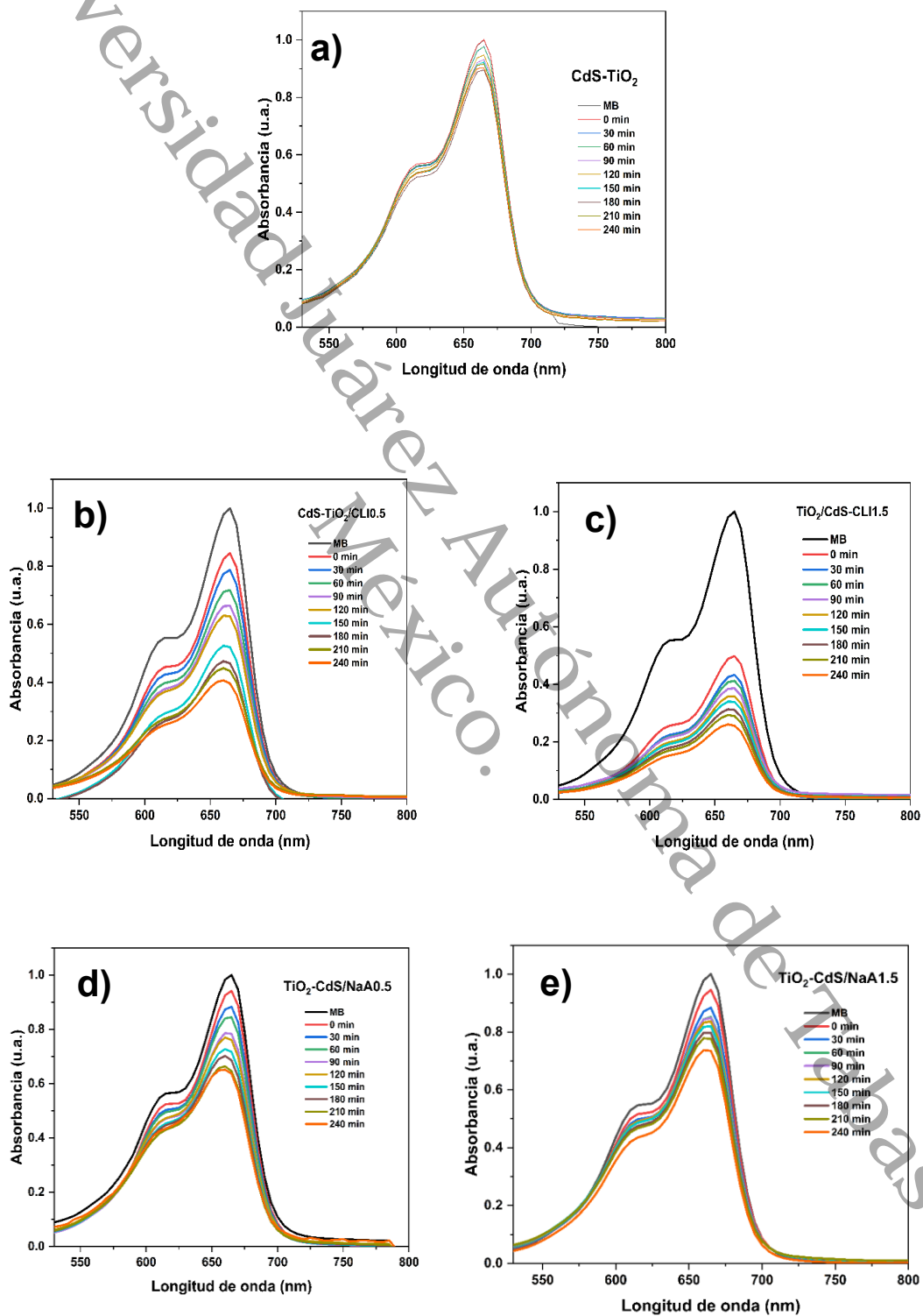
En la Figura 27 (a), correspondiente al sistema CdS-TiO_2 , se aprecia una disminución moderada en la absorbancia, con una eficiencia de degradación de 33.28 %. Este valor representa una mejora frente al TiO_2 puro, atribuida al acoplamiento entre ambos semiconductores, que favorece una mejor separación de cargas (Du et al., 2021).

La incorporación de zeolita natural (CLI) en los compósitos $\text{CdS-TiO}_2/\text{CLI}$ 0.5 y $\text{TiO}_2\text{-CdS}/\text{CLI}$ 1.5, mostrados en las Figuras 27 (b) y 27 (c), produce una mejora significativa en la actividad fotocatalítica, alcanzando eficiencias de 60.35 % y 74.40 %, respectivamente. Esta tendencia confirma que la CLI contribuye a dispersar mejor las partículas activas y a favorecer la adsorción del colorante en su superficie porosa (Anh et al., 2022).

En contraste, las muestras soportadas en zeolita sintética (NaA), mostradas en las Figuras 27 (d) y 27 (e), alcanzaron eficiencias de 36.33 % y 26.55 %, respectivamente. Estos valores evidencian que, aunque la NaA también posee una estructura microporosa, su menor tamaño de poro dificulta la adsorción del azul de metileno y limita la interacción con las fases activas (h et al., 2022; Kordala & Wyszowski, 2024). En conjunto, los resultados de la Figura 27 demuestran que la incorporación del CdS mejora el comportamiento del TiO_2 al extender la absorción de luz y facilitar la separación de cargas, pero la estabilidad del sistema depende fuertemente del soporte utilizado. La zeolita natural (CLI) se confirmó como el medio más favorable para la dispersión y estabilización del compuesto, mientras que la NaA no mostró el mismo beneficio estructural.

Figura 27

Degradación del azul de metileno bajo radiación UV para CdS-TiO_2 y compósitos TiO_2 - CdS /zeolitas.



4.6.2 Degradación del azul de metileno bajo simulador solar para compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas (CLI y NaA).

La Figura 28 presenta los espectros de absorbancia obtenidos durante la degradación del azul de metileno (MB) empleando los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA) bajo irradiación solar simulada. Los ensayos se realizaron con un simulador de 500 W (lámpara de xenón) que opera en una ventana espectral de 400–1000 nm, por lo que se evalúa el desempeño de los materiales en la región visible y parte del infrarrojo cercano; en estas condiciones, el CdS amplía la respuesta óptica del TiO_2 y favorece el aprovechamiento de la luz incidente. En todos los casos se observa una disminución progresiva de la banda característica del MB (~664 nm), lo que confirma la fotodegradación del colorante a lo largo del tiempo de irradiación (0–240 min).

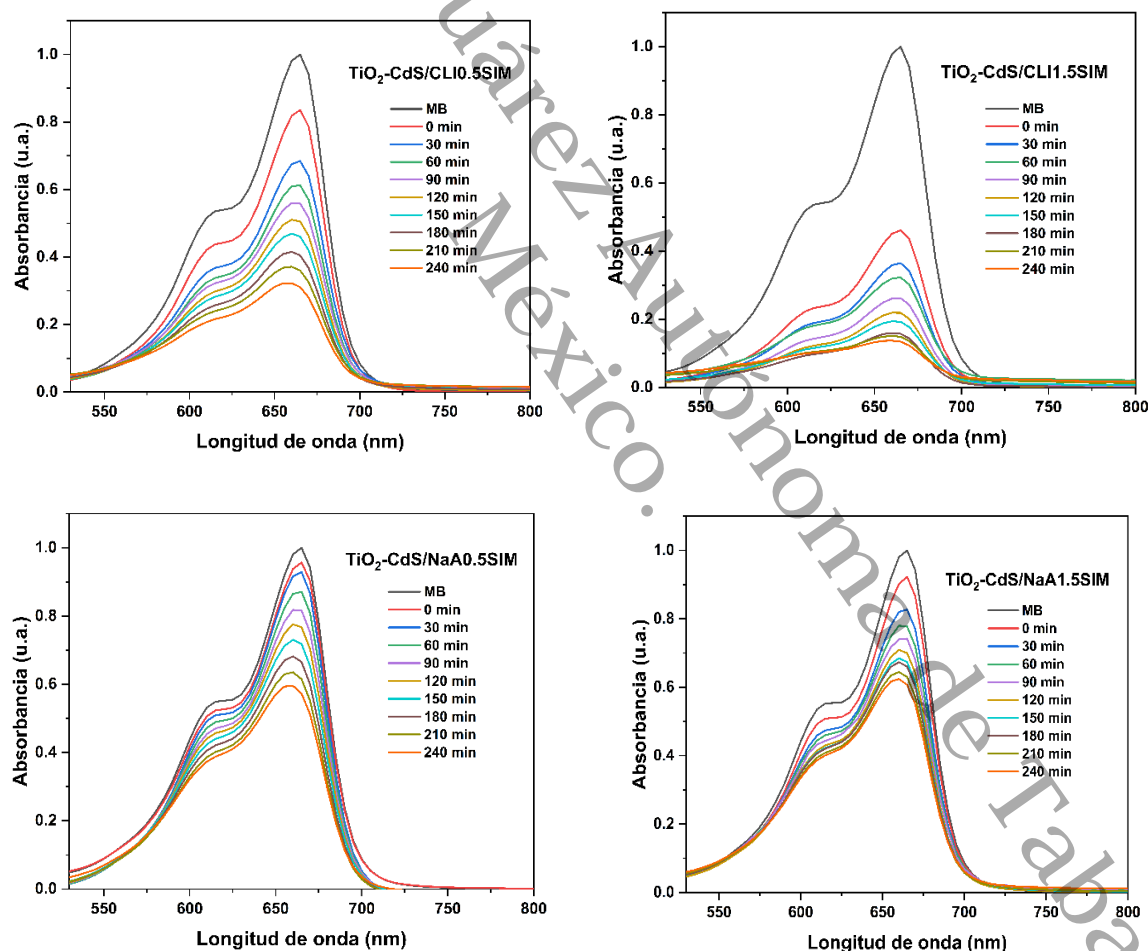
En las muestras soportadas en zeolita natural (CLI), mostradas en las Figuras 28 (a) y 28 (b), se registró una mejora significativa al aumentar la cantidad de soporte. La formulación $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5-SIM}$ alcanzó 86.56 %, superior a $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI0.5-SIM}$ (68.92 %). Este comportamiento se asocia a que la CLI favorece la dispersión homogénea de las partículas semiconductoras y promueve la adsorción del colorante sobre su superficie, lo que mejora el contacto con los sitios activos (Anh et al., 2022; Du et al., 2021). Además, la presencia de CdS en el compósito amplía la respuesta óptica del TiO_2 hacia la región visible y facilita la separación de cargas fotoinducidas, incrementando la generación de especies reactivas ($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$) responsables de la oxidación del azul de metileno (Mahamud et al., 2023; Liu et al., 2021; Dabhane et al., 2021).

Por otro lado, los compósitos soportados en zeolita sintética (NaA), mostrados en las Figuras 28 (c) y 28 (d), presentaron eficiencias de 42.70 % y 39.22 %, respectivamente, valores menores a los observados para las muestras con CLI. Este comportamiento puede explicarse por las características microporosas de la NaA y el tamaño reducido de sus poros, que restringen la difusión del azul de metileno hacia el interior de su estructura. En consecuencia, la adsorción

ocurre principalmente en la superficie externa, limitando el contacto directo entre las moléculas del colorante y las partículas activas del fotocatalizador, lo que reduce la eficiencia del proceso. Estas observaciones coinciden con lo señalado en los artículos (Kordala & Wyszowski, 2024; Anh et al., 2022), donde se describe que el tamaño de poro y la naturaleza del soporte influyen directamente en la accesibilidad del contaminante y en la respuesta fotocatalítica.

Figura 28

Espectros de absorción registrados durante la degradación del azul de metileno (MB) empleando los compósitos TiO_2 -CdS soportados en zeolitas naturales (CLI) y sintéticas (NaA) bajo irradiación solar simulada



Bajo simulación solar, CLI supera a NaA por su estructura más abierta y mayor adsorción, lo que mejora la dispersión de TiO_2 -CdS y el aprovechamiento de la luz, resultando en mayor degradación del contaminante (Kordala & Wyszowski, 2024).

4.6.3 Efecto de degradación del azul de metileno

La Figura 29 muestra la evolución del cociente C_t/C_0 con respecto al tiempo de reacción durante los ensayos fotocatalíticos realizados bajo radiación ultravioleta y simulación solar. Estos resultados permiten comparar el comportamiento de los distintos sistemas sintetizados en términos de eficiencia de degradación (R), la cual se calculó según la relación $R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$, donde C_0 y C_t representan las concentraciones inicial y final del contaminante, respectivamente (Dabhane et al., 2021; Rabani et al., 2025).

Figura 29 a): TiO_2 y TiO_2/CLI bajo radiación UV. En esta gráfica se observa que el TiO_2 puro presenta una degradación baja, lo que se asocia a la recombinación rápida de los electrones y huecos generados por la luz UV. En cambio, al incorporar zeolita natural (CLI), las curvas descienden con mayor pendiente, mostrando una mejora en la eficiencia fotocatalítica. Esto ocurre porque la estructura porosa de la CLI favorece la dispersión del TiO_2 y la adsorción del colorante, permitiendo un mejor contacto con los sitios activos (Kordala & Wyszowski, 2024).

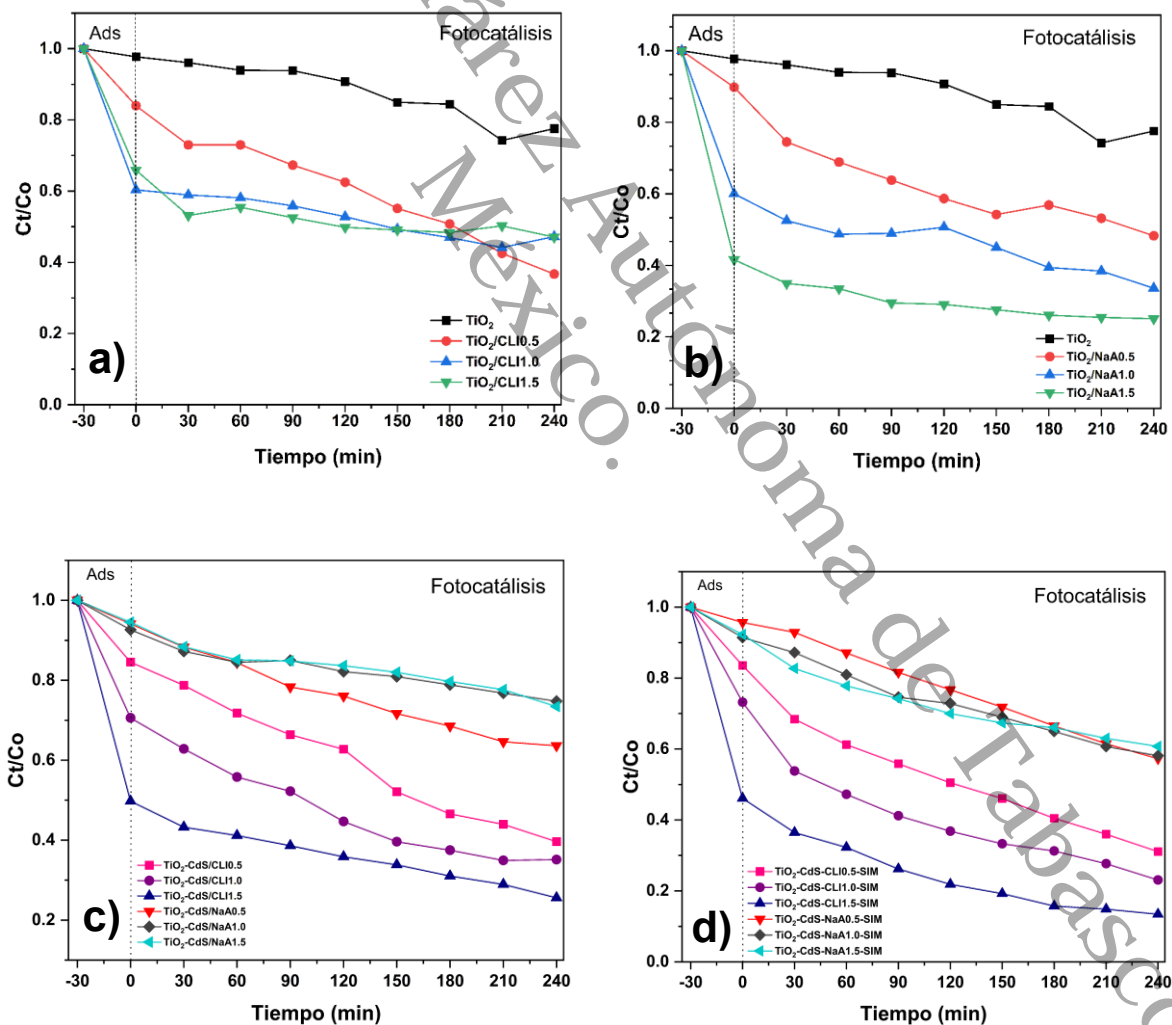
Figura 29 b): TiO_2 y TiO_2/NaA bajo radiación UV. En esta parte se aprecia un comportamiento similar, aunque el aumento en la eficiencia es más moderado. La NaA, al ser una zeolita sintética de poros más pequeños, limita la difusión del AM hacia el interior de su estructura, por lo que la adsorción ocurre principalmente sobre la superficie externa (Kordala & Wyszowski, 2024). Esto explica que su mejora sea menor en comparación con la CLI.

Figura 29 c): $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportado en zeolitas bajo radiación UV. Las curvas muestran una disminución más pronunciada, indicando una mayor degradación. Este resultado confirma la sinergia entre TiO_2 y CdS, ya que al acoplar ambos semiconductores se mejora la separación de cargas y se incrementa la formación de radicales oxidantes ($\cdot\text{OH}$ y $\cdot\text{O}_2$), que atacan el colorante. En este sistema, los compósitos $\text{TiO}_2\text{-CdS}/\text{CLI}$ presentan una mejor respuesta que los de NaA, debido a la dispersión más homogénea y la adsorción efectiva que ofrece la CLI (Liu et al., 2021; Mahamud et al., 2023).

Figura 29 d): $\text{TiO}_2\text{-CdS}$ soportado en zeolitas bajo simulador solar (SIM). En esta gráfica se observa que las curvas descienden más rápido que bajo radiación UV, especialmente para el compuesto $\text{TiO}_2\text{-CdS/CLI1.5-SIM}$. Este resultado se debe a que el CdS amplía la absorción del TiO_2 hacia la región visible, permitiendo un mejor aprovechamiento del espectro solar. Además, la CLI potencia la adsorción superficial y facilita la transferencia de carga, mejorando el rendimiento general. En cambio, los materiales con NaA muestran una degradación más lenta, atribuida a su estructura más cerrada y menor área superficial (Anh et al., 2022).

Figura 29

Eficiencia de degradación del azul de metileno bajo radiación UV y luz simulada (SIM) para los compósitos TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{zeolitas}$ y $\text{TiO}_2\text{-CdS/zeolitas}$.



Nota: SIM indica los ensayos realizados bajo luz simulada.

En todos los casos, las curvas C_t/C_0 vs. tiempo evidencian que la zeolita natural (CLI) ofrece las condiciones más favorables para la fotodegradación del azul de metileno. Esto se debe a su mayor porosidad, capacidad de adsorción y mejor compatibilidad con las fases TiO_2 -CdS. El compuesto TiO_2 -CdS/CLI1.5-SIM se consolida como el material más eficiente, ya que combina una absorción extendida a la región visible, una separación más efectiva de cargas y una mayor estabilidad durante la irradiación (Mahamud et al., 2018; Mahamud et al., 2023).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

Se sintetizaron compósitos fotocatalíticos TiO_2 -CdS soportados en zeolitas NaA y clinoptilolita (CLI) mediante el método sol-gel, obteniéndose materiales con buena dispersión del semiconductor sobre las matrices zeolíticas.

- Los análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmaron la presencia de la fase anatasa del TiO_2 y la fase cúbica correspondiente al CdS, sin detectarse fases secundarias, lo que indica una correcta incorporación de los semiconductores en los soportes zeolíticos.

- Los espectros de Raman mostraron las bandas características del TiO_2 en fase anatasa, confirmando la conservación de su estructura cristalina después del proceso de síntesis y la interacción con los soportes zeolíticos.

- Los estudios de fisisorción de N_2 (BET) mostraron isothermas características de tipo IV con histéresis, propias de materiales mesoporosos. Los compósitos soportados presentaron un incremento en el área superficial específica y volumen de poro, lo que favorece la adsorción del azul de metileno y facilita la difusión del contaminante hacia los sitios activos del fotocatalizador.

- Los análisis de UV-Vis de reflectancia difusa evidenciaron que la incorporación de CdS permitió extender la absorción de luz hacia la región visible, favoreciendo la generación de pares electrón-hueco bajo irradiación.

- Los resultados de fotoluminiscencia mostraron una disminución en la intensidad de emisión en los compósitos soportados, lo que indica una menor recombinación electrón-hueco y una mayor eficiencia en la separación de cargas.

- Las pruebas de actividad fotocatalítica demostraron que el TiO_2 puro alcanzó una degradación del azul de metileno de 22.68 %, mientras que los compósitos soportados presentaron un incremento significativo en la eficiencia, destacando TiO_2 /CLI 1.5 bajo simulación solar mostró el mejor desempeño fotocatalítico con 86.56%.

En conjunto, los resultados indican que la incorporación de zeolitas como soporte y el acoplamiento TiO_2 -CdS mejoran las propiedades estructurales, texturales y ópticas de los

materiales, incrementando significativamente su desempeño fotocatalítico en la degradación de contaminantes orgánicos en agua.

Recomendaciones

1. Evaluar otras relaciones CdS/TiO₂ y diferentes proporciones de zeolita con el fin de optimizar aún más el desempeño fotocatalítico bajo radiación solar natural.
2. Analizar la estabilidad y reutilización de los compósitos CdS-TiO₂/zeolita mediante su uso en múltiples experimentos de fotodegradación, con el fin de evaluar su desempeño a lo largo del tiempo.
3. Ampliar el estudio fotocatalítico a otros contaminantes orgánicos de interés ambiental, como fármacos o pesticidas, con el propósito de validar la versatilidad de los materiales sintetizados.
4. Profundizar en el estudio del mecanismo de degradación mediante técnicas complementarias, con el fin de identificar las especies reactivas responsables del proceso y correlacionarlas con las propiedades estructurales y ópticas del material.

Referencias citadas

- Adcock, J. L., Barnett, N. W., & Francis, P. S. (2019). Luminescence | Overview. *Encyclopedia of Analytical Science*, 270–280. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11027-3>
- Afreen, G., Shoeb, M., & Upadhyayula, S. (2020). Effectiveness of reactive oxygen species generated from rGO/CdS QD heterostructure for photodegradation and disinfection of pollutants in waste water. *Materials Science and Engineering: C*, 108, 110372. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2019.110372>
- Al-Amiery, A. A., Fayad, M. A., Abdul Wahhab, H. A., Al-Azzawi, W. K., Mohammed, J. K., & Majdi, H. S. (2024). Interfacial Engineering for Advanced Functional Materials: Surfaces, Interfaces, and Applications. In *Results in Engineering* (Vol. 22). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102125>
- Alex Mbachu, C., Kamoru Babayemi, A., Chinedu Egboosiuba, T., Ifeanyichukwu Ike, J., Jacinta Ani, I., & Mustapha, S. (2023). Green synthesis of iron oxide nanoparticles by Taguchi design of experiment method for effective adsorption of methylene blue and methyl orange from textile wastewater. *Results in Engineering*, 19, 101198. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101198>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Ali, M. M., Haque, M. J., Kabir, M. H., Kaiyum, M. A., & Rahman, M. S. (2021). Nano synthesis of ZnO–TiO₂ composites by sol-gel method and evaluation of their antibacterial, optical and photocatalytic activities. *Results in Materials*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100199>
- Allothman, Z. A. (2012). A review: Fundamental aspects of silicate mesoporous materials. In *Materials* (Vol. 5, Number 12, pp. 2874–2902). <https://doi.org/10.3390/ma5122874>
- Anh, L. K., Oanh, N. T. K., Hieu, T. L. M., Phuong, N. T. T., Duong, N. T. H., Dung, N. V., & Long, N. Q. (2022a). Synthesis and Photocatalytic Activity for Toluene Removal of

CDs/TiO₂- Zeolite Y. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 17(4), 862–871. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.4.16137.862-871>

Anh, L. K., Oanh, N. T. K., Hieu, T. L. M., Phuong, N. T. T., Duong, N. T. H., Dung, N. V., & Long, N. Q. (2022b). Synthesis and Photocatalytic Activity for Toluene Removal of CDs/TiO₂- Zeolite Y. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 17(4), 862–871. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.4.16137.862-871>

Anucha, C. B., Altin, I., Bacaksiz, E., & Stathopoulos, V. N. (2022). Titanium dioxide (TiO₂)-based photocatalyst materials activity enhancement for contaminants of emerging concern (CECs) degradation: In the light of modification strategies. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100262>

Arenas-Hernandez, A., Zuñiga Islas, C., Moreno, M., Calleja Arriaga, W., Mendoza-Cervantes, J. C., Carlos, N., Ascencio-Hurtado, C. R., & Heredia Jiménez, A. (2022). Study of Oxygen Vacancies in TiO₂ Nanostructures and Their Relationship with Photocatalytic Activity. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/app12073690>

Armaković, S. J., & Armaković, S. (2025a). Zeolite-Supported TiO₂ for Enhanced Photocatalytic Performance in Environmental Applications: A Review. *Catalysts*, 15(2), 174.

Armaković, S. J., & Armaković, S. (2025b). Zeolite-Supported TiO₂ for Enhanced Photocatalytic Performance in Environmental Applications: A Review. In *Catalysts* (Vol. 15, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/catal15020174>

Ashfaq, M. H., Shahid, S., Javed, M., Iqbal, S., Hakami, O., Aljazzar, S. O., Fatima, U., Elkaeed, E. B., Pashameah, R. A., Alzahrani, E., Farouk, A. E., & Somaily, H. H. (2022a). Controlled growth of TiO₂/Zeolite nanocomposites for simultaneous removal of ammonium and phosphate ions to prevent eutrophication. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1007485>

- Ashfaq, M. H., Shahid, S., Javed, M., Iqbal, S., Hakami, O., Aljazzar, S. O., Fatima, U., Elkaeed, E. B., Pashameah, R. A., Alzahrani, E., Farouk, A. E., & Somaily, H. H. (2022b). Controlled growth of TiO₂/Zeolite nanocomposites for simultaneous removal of ammonium and phosphate ions to prevent eutrophication. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1007485>
- Aziz, N. A., Sheng, C. K., & Jie, H. J. (2023). Water remediation capability of cubic-phase CdS nanoparticles as photocatalyst on photodegradation of aqueous rhodamine 6G dye under UV irradiation. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 18(1), 203–210. <https://doi.org/10.15251/DJNB.2023.181.203>
- Bawa, S., Kothiyal, N. C., Maurya, S. K., Bhatrola, K., & Budhalakoti, B. (2024). Polymeric-Aluminosilicate Mixed Membranes and Their Properties. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95486-0.00017-X>
- Bertier, P., Schweinar, K., Stanjek, H., Ghanizadeh, A., Clarkson, C. R., Busch, A., Kampman, N., Prinz, D., Amann-Hildebrand, A., Krooss, B. M., & Pipich, V. (2016). On the use and abuse of N₂ physisorption for the characterization of the pore structure of shales (pp. 151–161). <https://doi.org/10.1346/cms-wls-21.12>
- Bhattacharya, S., Pal, A., Jana, A., & Datta, J. (2016). Synthesis and characterization of CdS nanoparticles decorated TiO₂ matrix for an efficient N₃ based dye sensitized solar cell (DSSC). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(12), 12438–12445. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5298-3>
- Bukit, N., Ginting, E. M., Frida, E., & Bukit, B. F. (2021). Physical analysis of TiO₂ and bentonite nanocomposite as adsorbent materials. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 912–920.
- Cahyanti, R., Sumari, S., Fajaroh, F., Asrori, M. R., & Prakasa, Y. F. (2023). Fe-TiO₂/zeolite H-A photocatalyst for degradation of waste dye (methylene blue) under UV irradiation. *AIMS Materials Science*, 10(1), 40–54. <https://doi.org/10.3934/matersci.2023003>

- Chakravorty, A., & Roy, S. (2024). A Review of - Photocatalysis, basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100155>
- Chang, C., Rad, S., Gan, L., Li, Z., Dai, J., & Shahab, A. (2023). Review of the sol-gel method in preparing nano TiO₂ for advanced oxidation process. In *Nanotechnology Reviews* (Vol. 12, Number 1). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0150>
- Chinnasamy, M., Ajithkumar, R., Singh, A., Yangzom, D., Parvati, T. S., & Joanna, P. S. (2020). Comparative study on the behaviour of textile reinforced concrete slab with engineered cementitious composite slab. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.529>
- Cortazar, J. S., Matus, A. K. L., Blanco, L. R., Hernández, G. P., Torres, I. Z., Escobar, B. L. P., Palomera, R. C., & Morales, E. R. (2024). Coupling of TiO₂ and ZnO with metal sulfides (CuS and ZnS) for applications in solar cells. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 19(2), 493–502.
- Dabhane, H., Ghotekar, S., Tambade, P., Pansambal, S., Murthy, H. C. A., Oza, R., & Medhane, V. (2021a). A review on environmentally benevolent synthesis of CdS nanoparticle and their applications. In *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* (Vol. 3, pp. 209–219). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.06.002>
- Dabhane, H., Ghotekar, S., Tambade, P., Pansambal, S., Murthy, H. C. A., Oza, R., & Medhane, V. (2021b). A review on environmentally benevolent synthesis of CdS nanoparticle and their applications. In *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* (Vol. 3, pp. 209–219). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.06.002>
- Davel, C., Bassiri-Gharb, N., & Correa-Baena, J. P. (2025). Machine learning in X-ray diffraction for materials discovery and characterization. *Matter*, 8(9), 102272. <https://doi.org/10.1016/J.MATT.2025.102272>
- de Dios, F. S., Morales, E. R., Del Carmen Arellano Cortaza, M., Hernández, G. P., Mandujano, E. V. M., Alejandro, E. M. L., & Blanco, L. R. (2023a). Improvement of

photocatalysis using ZnO/zeolite nanocomposites for contaminant removal in aqueous media. *Desalination and Water Treatment*, 312, 79–88. <https://doi.org/10.5004/DWT.2023.29961>

de Dios, F. S., Morales, E. R., Del Carmen Arellano Cortaza, M., Hernández, G. P., Mandujano, E. V. M., Alejandro, E. M. L., & Blanco, L. R. (2023b). Improvement of photocatalysis using ZnO/zeolite nanocomposites for contaminant removal in aqueous media. *Desalination and Water Treatment*, 312, 79–88. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29961>

de Dios, F. S., Morales, E. R., Del Carmen Arellano Cortaza, M., Hernández, G. P., Mandujano, E. V. M., Alejandro, E. M. L., & Blanco, L. R. (2023c). Improvement of photocatalysis using ZnO/zeolite nanocomposites for contaminant removal in aqueous media. *Desalination and Water Treatment*, 312, 79–88. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29961>

de Farias, R. F. (2023). *Zeolites* (pp. 141–144). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18791-9.00004-0>

Du, Y. E., Niu, X., He, X., Hou, K., Liu, H., & Zhang, C. (2021). Synthesis and photocatalytic activity of tio₂/cds nanocomposites with co-exposed anatase highly reactive facets. *Molecules*, 26(19). <https://doi.org/10.3390/molecules26196031>

El-Naggar, M. A., Maghawry, A. H., Alturki, A. A., Nosier, S. A., Hussein, M., & Abdel-Aziz, M. H. (2024). TiO₂-catalyzed photodegradation of methylene blue in a helical FEP tubing reactor: modeling and optimization using response surface methodology. *Applied Water Science*, 14(9). <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02205-3>

Escobar-Alarcón, L., & Solís-Casados, D. A. (2020a). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 1e–23e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>

- Escobar-Alarcón, L., & Solís-Casados, D. A. (2020b). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 1e–23e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Eskandari-Ghadi, M., & Zhang, Y. (2021). Mechanics of shrinkage-swelling transition of microporous materials at the initial stage of adsorption. *International Journal of Solids and Structures*, 222–223. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111041>
- Ferney, V. C., & Hurtado, M. F. (2017). *Difracción de rayos X: un mundo de aplicaciones por descubrir* X-ray diffraction: An applications world to be discover* (Vol. 2).
- Fewster, P. F. (2023). The Limits of X-ray Diffraction Theory. *Crystals*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/cryst13030521>
- Gao, X., Liu, X., Zhu, Z., Gao, Y., Wang, Q., Zhu, F., & Xie, Z. (2017). Enhanced visible light photocatalytic performance of CdS sensitized TiO₂ nanorod arrays decorated with Au nanoparticles as electron sinks. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01124-5>
- Gfroerer, T. H. (2000). Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a2510>
- Giraldo, J. F. R., & Marin, J. E. G. (2025). Application of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for protozoan analysis: A systematic review. In *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* (Vol. 51). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104441>
- Gomathi Thanga Keerthana, B., & Murugakoothan, P. (2019). Synthesis and characterization of CdS/TiO₂ nanocomposite: Methylene blue adsorption and enhanced photocatalytic activities. *Vacuum*, 159, 476–481. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2018.10.082>

- Gorji, R., Skvaril, J., & Odlare, M. (2024). Applications of optical sensing and imaging spectroscopy in indoor farming: A systematic review. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124820>
- Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., & Piumetti, M. (2024a). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–36.
- Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., & Piumetti, M. (2024b). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5>
- Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., & Piumetti, M. (2024c). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5>
- Gul, A., Ullah, R., Sun, J., Munir, T., & Bai, S. (2021). The fabrication of TiO₂-supported clinoptilolite: via F-contained hydrothermal etching and a resultant highly energetic {001} facet for the enhancement of its photocatalytic activity. *RSC Advances*, 11(29), 17849–17859. <https://doi.org/10.1039/d1ra02269e>
- Hakki, A., Yang, L., Wang, F., & Macphee, D. E. (2017). The effect of interfacial chemical bonding in TiO₂-SiO₂ composites on their photocatalytic NO_x abatement performance. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, (125), 56070.
- Hao, C., Ni, Z., Wang, J., Liu, H., Zheng, Z., Li, Y., Guo, J., Zhang, R., & Zhang, Q. (2025). A review of semiconductor photocatalyst characterization techniques. In *Reviews in Analytical Chemistry* (Vol. 44, Number 1). Sciendo. <https://doi.org/10.1515/revac-2023-0061>
- Herrera-Ramos, J., Oros-Ruíz, S., Romero-Villegas, A. G., Carrera-Crespo, J. E., Pérez-Hernández, R., S. Valente, J., & Tzompantzi, F. (2025). Exploring Synthesis Methods of CdS/TiO₂ Photocatalysts for Enhanced Hydrogen Production Under Visible Light. *Catalysts*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/catal15080699>

- Hossain, N., Mobarak, M. H., Mimona, M. A., Islam, M. A., Hossain, A., Zohura, F. T., & Chowdhury, M. A. (2023). Advances and significances of nanoparticles in semiconductor applications – A review. In *Results in Engineering* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101347>
- Hsu, C. Y., Mahmoud, Z. H., Abdullaev, S., Ali, F. K., Ali Naeem, Y., Mzahim Mizher, R., Morad Karim, M., Abdulwahid, A. S., Ahmadi, Z., Habibzadeh, S., & Kianfar, E. (2024). Nano titanium oxide (nano-TiO₂): A review of synthesis methods, properties, and applications. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100626>
- Hu, Y., Pan, Y., Wang, Z., Lin, T., Gao, Y., Luo, B., Hu, H., Fan, F., Liu, G., & Wang, L. (2020). Lattice distortion induced internal electric field in TiO₂ photoelectrode for efficient charge separation and transfer. *Nature Communications*, 11(1), 2129.
- Huayna, G., Laura, A., Churata, R., Lazo, L., Guzmán, R., Ramos, P. G., & Rodriguez, J. M. (2024a). Synthesis and characterization of a photocatalytic material from TiO₂ nanoparticles supported on zeolite obtained from ignimbrite residue used in decolorization of methyl orange. *Applied Sciences*, 14(8), 3146.
- Huayna, G., Laura, A., Churata, R., Lazo, L., Guzmán, R., Ramos, P. G., & Rodriguez, J. M. (2024b). Synthesis and Characterization of a Photocatalytic Material from TiO₂ Nanoparticles Supported on Zeolite Obtained from Ignimbrite Residue Used in Decolorization of Methyl Orange. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/app14083146>
- Huayna, G., Laura, A., Churata, R., Lazo, L., Guzmán, R., Ramos, P. G., & Rodriguez, J. M. (2024c). Synthesis and Characterization of a Photocatalytic Material from TiO₂ Nanoparticles Supported on Zeolite Obtained from Ignimbrite Residue Used in Decolorization of Methyl Orange. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/app14083146>
- Innocenzi, P. (2023a). Sol-gel processing for advanced ceramics, a perspective. In *Open Ceramics* (Vol. 16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100477>

- Innocenzi, P. (2023b). Sol-gel processing for advanced ceramics, a perspective. In *Open Ceramics* (Vol. 16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100477>
- Iqbal, M., Ali, A., Nahyoon, N. A., Majeed, A., Pothu, R., Phulpoto, S., & Thebo, K. H. (2019). Photocatalytic degradation of organic pollutant with nanosized cadmium sulfide. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(1), 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.09.002>
- Ismael, M. (2020a). Enhanced photocatalytic hydrogen production and degradation of organic pollutants from Fe (III) doped TiO₂ nanoparticles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103676>
- Ismael, M. (2020b). Enhanced photocatalytic hydrogen production and degradation of organic pollutants from Fe (III) doped TiO₂ nanoparticles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103676>
- Jalloul, G., Al-Mousawi, A., Chocr, F., Merhi, A., Awala, H., & Boyadjian, C. (2022a). Fe-Sensitized Zeolite Supported TiO₂ for the Degradation of Tetracycline Using Blue LED Irradiation. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.873257>
- Jalloul, G., Al-Mousawi, A., Chocr, F., Merhi, A., Awala, H., & Boyadjian, C. (2022b). Fe-sensitized zeolite supported TiO₂ for the degradation of tetracycline using blue LED irradiation. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 873257.
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M. A. H., Karmakar, A. K., Zhou, J. L., Ahmed, M. B., & Moni, M. A. (2020). Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. In *Environmental Advances* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>
- Khima, N., Chelouche, A., Challali, F., Djouadi, D., djermoune, A., bellucci, S., & Touam, T. (2024). *TiO₂ sol-gel thin films: role of acidic and basic pH on physical characteristics*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4564620/v1>

- Kim, M. G., Kang, J. M., Lee, J. E., Kim, K. S., Kim, K. H., Cho, M., & Lee, S. G. (2021a). Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂Nanoparticles. *ACS Omega*, 6(16), 10668–10678. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00043>
- Kim, M. G., Kang, J. M., Lee, J. E., Kim, K. S., Kim, K. H., Cho, M., & Lee, S. G. (2021b). Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂Nanoparticles. *ACS Omega*, 6(16), 10668–10678. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00043>
- Kok Sheng, C., Binti Aziz, N. A., & Mohammad Alrababah, Y. (2023). Annealing temperature-dependent CdS phase tunability in improving photocatalytic efficiency towards aquatic dye decomposition. *Results in Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100445>
- Kontos, A. G., Likodimos, V., Vassalou, E., Kapogianni, I., Raptis, Y. S., Raptis, C., & Falaras, P. (2011). Nanostructured titania films sensitized by quantum dot chalcogenides. *Nanoscale Research Letters*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-266>
- Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024a). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. In *Molecules* (Vol. 29, Number 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>
- Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024b). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. In *Molecules* (Vol. 29, Number 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>
- Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. In *Results in Surfaces and Interfaces* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122>
- Lafjah, M., Djafri, F., Bengueddach, A., Keller, N., & Keller, V. (2011). Beta zeolite supported sol–gel TiO₂ materials for gas phase photocatalytic applications. *Journal*

of *Hazardous Materials*, 186(2–3), 1218–1225.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.11.134>

- Lerici, L., Femanelli, C., Digulio, E., Pierella, L., & Saux, C. (2018). Synthesis and characterization of iron photocatalysts supported on microporous zeolites. *Revista Materia*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0450>
- Li, M., Zhang, R., Zou, Z., Zhang, L., & Ma, H. (2024). Optimizing physico-chemical properties of hierarchical ZnO/TiO₂ nano-film by the novel heating method for photocatalytic degradation of antibiotics and dye. *Chemosphere*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140392>
- Lin, K., Jasrasaria, D., Yoo, J. J., Bawendi, M., Utzat, H., & Rabani, E. (2023). Theory of photoluminescence spectral line shapes of semiconductor nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 14(32), 7241–7248.
- Liu, X., Sayed, M., Bie, C., Cheng, B., Hu, B., Yu, J., & Zhang, L. (2021). Hollow CdS-based photocatalysts. In *Journal of Materiomics* (Vol. 7, Number 3, pp. 419–439). Chinese Ceramic Society. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2020.10.010>
- Madkhali, N., Prasad, C., Malkappa, K., Choi, H. Y., Govinda, V., Bahadur, I., & Abumousa, R. A. (2023). Recent update on photocatalytic degradation of pollutants in waste water using TiO₂-based heterostructured materials. In *Results in Engineering* (Vol. 17). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100920>
- Mahamud, M., Taddesse, A. M., Bogale, Y., & Bezu, Z. (n.d.). *Zeolite Supported CdS/TiO₂/CeO₂ Composite: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity for Methylene Blue Dye Degradation*. Retrieved <https://ssrn.com/abstract=4299929>
- Mahamud, M., Taddesse, A. M., Bogale, Y., & Bezu, Z. (2023). Zeolite supported CdS/TiO₂/CeO₂ composite: Synthesis, characterization and photocatalytic activity for methylene blue dye degradation. *Materials Research Bulletin*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112176>

- Mamedov, S. (2020). Caracterización de nanopulvos de TiO₂ mediante espectroscopia Raman. *SPECTROSCOPY*, 35(2), 41–49. <https://www.spectroscopyonline.com/view/characterization-tio2-nanopowders-raman-spectroscopy>
- Manzoor, S., Ashiq, M. F., Usman, M., Sadaqat, M., Mahmood, K., Munawar, T., Iqbal, F., Al-Anazy, M. M., Ashiq, M. N., & Najam-ul-Haq, M. (2021). Development of excellent and novel flowery zirconia/cadmium sulfide nanohybrid electrode: for high performance electrochemical supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 40, 102718.
- Mergenbayeva, S., Abitayev, Z., Batyrbayeva, M., Vakros, J., Mantzavinos, D., Atabaev, T. S., & Pouloupoulos, S. G. (2024a). TiO₂/Zeolite Composites for SMX Degradation under UV Irradiation. *Catalysts*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/catal14020147>
- Mergenbayeva, S., Abitayev, Z., Batyrbayeva, M., Vakros, J., Mantzavinos, D., Atabaev, T. S., & Pouloupoulos, S. G. (2024b). TiO₂/Zeolite Composites for SMX Degradation under UV Irradiation. *Catalysts*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/catal14020147>
- Moghaddam, H. M., & Nasirian, S. (2012). Dependence of activation energy and lattice strain on TiO₂ nanoparticles? *Nanoscience Methods*, 1(1), 201–212.
- Morab, S., Sundaram, M. M., & Pivrikas, A. (2023). Review on charge carrier transport in inorganic and organic semiconductors. *Coatings*, 13(9), 1657.
- Mosbah, M. Ben, Mechi, L., Khiari, R., & Moussaoui, Y. (2020). Current state of porous carbon for wastewater treatment. In *Processes* (Vol. 8, Number 12, pp. 1–24). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8121651>
- Mote, V., Purushotham, Y., & Dole, B. (2012). Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6(1), 2–9. <https://doi.org/10.1186/2251-7235-6-6>
- Munguti, L., & Dejene, F. (2020). Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties of ZnO–TiO₂ composites for application in dye

removal in water. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 24, 100594. <https://doi.org/10.1016/J.NANOSO.2020.100594>

Munien, C., Rathilal, S., & Tetteh, E. K. (2025). Challenges and Prospects of TiO₂-Based Photocatalysis for Wastewater Treatment: Keyword Analysis. *Catalysts*, 15(9), 801.

Muscetta, M., Ganguly, P., & Clarizia, L. (2024). Solar-powered photocatalysis in water purification: applications and commercialization challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113073>

Nieto-Caballero, F. G., Mora, E. S., Gracia-Jiménez, J. M., Sánchez-Mora, E., Gracia-Jiménez, J. M., Silva-González, N. R., & Rodríguez, A. G. (2007). *Photodecomposition of methylene blue by amorphous TiO₂ CdS and TiO₂CdS films* Article in *Revista Mexicana de Física · Photodecomposition of methylene blue by amorphous TiO₂, CdS and TiO₂-CdS films* (Vol. 53, Number 7). <https://www.researchgate.net/publication/253315192>

Novembre, D., Gimeno, D., Marinangeli, L., Tangari, A. C., Rosatelli, G., Ciulla, M., & Profio, P. (2024). Rice Husk as Raw Material in Synthesis of NaA (LTA) Zeolite. *Molecules*, 29(18). <https://doi.org/10.3390/molecules29184396>

Orha, C., Morariu, M. I., Nicolaescu, M., Bandaş, C., & Lazau, C. (2025). Synthesis and Investigation of Na-Zeolite-Decorated Black TiO₂ Hybrid Material with Enhanced Properties. *Crystals*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/cryst15040319>

Osterrieth, J. W. M., Rampersad, J., Madden, D., Rampal, N., Skoric, L., Connolly, B., Allendorf, M. D., Stavila, V., Snider, J. L., Ameloot, R., Marreiros, J., Ania, C., Azevedo, D., Vilarrasa-Garcia, E., Santos, B. F., Bu, X. H., Chang, Z., Bunzen, H., Champness, N. R., ... Fairen-Jimenez, D. (2022). How Reproducible are Surface Areas Calculated from the BET Equation? *Advanced Materials*, 34(27). <https://doi.org/10.1002/adma.202201502>

Owens, G. J., Singh, R. K., Foroutan, F., Alqaysi, M., Han, C. M., Mahapatra, C., Kim, H. W., & Knowles, J. C. (2016). Sol-gel based materials for biomedical applications. In *Progress*

in *Materials Science* (Vol. 77, pp. 1–79). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.12.001>

Petcu, G., Papa, F., Atkinson, I., Baran, A., Apostol, N. G., Petrescu, S., Richaudeau, L., Blin, J. L., & Parvulescu, V. (2023). Co- and Ni-Doped TiO₂ Nanoparticles Supported on Zeolite Y with Photocatalytic Properties. *Nanomaterials*, 13(15).
<https://doi.org/10.3390/nano13152200>

Piedra López, J. G., González Pichardo, O. H., Pinedo Escobar, J. A., de Haro del Río, D. A., Inchaurregui Méndez, H., & González Rodríguez, L. M. (2021a). Photocatalytic degradation of metoprolol in aqueous medium using a TiO₂/natural zeolite composite. *Fuel*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119030>

Piedra López, J. G., González Pichardo, O. H., Pinedo Escobar, J. A., de Haro del Río, D. A., Inchaurregui Méndez, H., & González Rodríguez, L. M. (2021b). Photocatalytic degradation of metoprolol in aqueous medium using a TiO₂/natural zeolite composite. *Fuel*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119030>

Piedra López, J. G., González Pichardo, O. H., Pinedo Escobar, J. A., de Haro del Río, D. A., Inchaurregui Méndez, H., & González Rodríguez, L. M. (2021c). Photocatalytic degradation of metoprolol in aqueous medium using a TiO₂/natural zeolite composite. *Fuel*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119030>

Piler, K., Bahrim, C., Twagirayezu, S., & Benson, T. J. (2020). Lattice disorders of TiO₂ and their significance in the photocatalytic conversion of CO₂. In *Advances in Catalysis* (Vol. 66, pp. 109–233). Elsevier.

Pinto, A. J., Sanchez-Pastor, N., Callegari, I., Pracejus, B., & Scharf, A. (2020). Challenges to rutile-based geoscientific tools: low-temperature polymorphic TiO₂ transformations and corresponding reactive pathways. *Scientific Reports*, 10(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64392-8>

Pourghorbani dinachali, K., Fadavieslam, M. R., & Zavareh, S. (2022a). A study of the effect of the synthesis conditions of titanium dioxide on its morphology and cell

toxicity properties. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(9).
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104022>

Pourghorbani dinachali, K., Fadavieslam, M. R., & Zavareh, S. (2022b). A study of the effect of the synthesis conditions of titanium dioxide on its morphology and cell toxicity properties. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(9).
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104022>

Prabhu, R. R., & Khadar, M. A. (2008). Study of optical phonon modes of CdS nanoparticles using Raman spectroscopy. In *Bull. Mater. Sci* (Vol. 31, Number 3).

Qutub, N., Singh, P., Sabir, S., Sagadevan, S., & Oh, W. C. (2022). Enhanced photocatalytic degradation of Acid Blue dye using CdS/TiO₂ nanocomposite. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09479-0>

Rabani, I., Tran, N. T., Maqsood, M. F., Kaseem, M., Dastgeer, G., & Truong, H. B. (2025). Visible light-driven photocatalytic degradation of rhodamine B and 5-fluorouracil using ZIF-8/GO: unveiling mechanisms. *RSC Advances*, 15(37), 30217–30230. <https://doi.org/10.1039/d5ra05177k>

Racovita, A. D. (2022). Titanium Dioxide: Structure, Impact, and Toxicity. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Number 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095681>

Raizada, P., Sudhaik, A., & Singh, P. (2019a). Photocatalytic water decontamination using graphene and ZnO coupled photocatalysts: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 509–525. <https://doi.org/10.1016/J.MSET.2019.04.007>

Raizada, P., Sudhaik, A., & Singh, P. (2019b). Photocatalytic water decontamination using graphene and ZnO coupled photocatalysts: A review. In *Materials Science for Energy Technologies* (Vol. 2, Number 3, pp. 509–525). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.04.007>

- Regmi, A., Basnet, Y., Bhattarai, S., & Gautam, S. K. (2023a). Cadmium Sulfide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Study. *Journal of Nanomaterials*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8187000>
- Regmi, A., Basnet, Y., Bhattarai, S., & Gautam, S. K. (2023b). Cadmium Sulfide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Study. *Journal of Nanomaterials*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8187000>
- Sahadat Hossain, M., & Ahmed, S. (2023). Easy and green synthesis of TiO₂ (Anatase and Rutile): Estimation of crystallite size using Scherrer equation, Williamson-Hall plot, Monshi-Scherrer Model, size-strain plot, Halder- Wagner Model. *Results in Materials*, 20, 100492. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2023.100492>
- Secundino-Sánchez, O., Diaz-Reyes, J., Sánchez-Ramírez, J. F., & Jiménez-Pérez, J. L. (2019). Structural and optical characterization of the crystalline phase transformation of electrospinning TiO₂ nanofibres by high temperatures annealing. *Revista Mexicana de Física*, 65(5), 459–467. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.65.459>
- Septiningrum, F., Yuwono, A. H., Maulana, F. A., Nurhidayah, E., Dhaneswara, D., Sofyan, N., Hermansyah, H., & Purwanto, W. W. (2024). Mangosteen pericarp extract mediated synthesis of Ag/TiO₂ nanocomposite and its application on organic pollutant degradation by adsorption-photocatalytic activity. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100394>
- Shukla, U., & Bari, S. (2018). Study on the Photoluminescence. *Journal of Pure Applied and Industrial Physics*, 8(5), 25–31. <https://doi.org/10.29055/jpaip/307>
- Sivasubramanian, V., Arora, A. K., Premila, M., Sundar, C. S., & Sastry, V. S. (2006). Optical properties of CdS nanoparticles upon annealing. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 31(1), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2005.10.001>
- Strangfeld, C., Wiehle, P., & Munsch, S. M. (2021). About the dominance of mesopores in physisorption in amorphous materials. *Molecules*, 26(23), 7190.

- Suryawanshi, V. K., Patil, S. R., Patil, P. N., Wagh, V., Ajmera, S., Suryawanshi, H. P., & Pawar, S. P. (2023). Study of antimicrobial activity of sonochemically synthesized CdS nanoparticles. In *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci* (Vol. 12, Number 10).
- Taudul, B., Tielens, F., & Calatayud, M. (2023). On the Origin of Raman Activity in Anatase TiO₂ (Nano)Materials: An Ab Initio Investigation of Surface and Size Effects. *Nanomaterials*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/nano13121856>
- Teets, T. S. (2021). *Photoluminescence*. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsinfocus.7e5014>
- Terna, A. D., Elemike, E. E., Mbonu, J. I., Osafire, O. E., & Ezeani, R. O. (2021). The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis, properties and applications. In *Materials Science and Engineering: B* (Vol. 272). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115363>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tristão, J. C., Magalhães, F., Corio, P., & Sansiviero, M. T. C. (2006). Electronic characterization and photocatalytic properties of CdS/TiO₂ semiconductor composite. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 181(2–3), 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2005.11.018>
- Tsai, Y. L., Huang, E., Li, Y. H., Hung, H. T., Jiang, J. H., Liu, T. C., Fang, J. N., & Chen, H. F. (2021). Raman spectroscopic characteristics of zeolite group minerals. *Minerals*, 11(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/min11020167>
- Umaru, D., Hafeez, H. Y., Mohammed, J., Suleiman, A. B., Ndikilar, C. E., & Zakariyya, Y. (2023a). A review of recent progress in solar fuel (Hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting of cadmium sulfide (CdS) based photocatalyst. *Applied Surface Science Advances*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100520>

- Umaru, D., Hafeez, H. Y., Mohammed, J., Suleiman, A. B., Ndikilar, C. E., & Zakariyya, Y. (2023b). A review of recent progress in solar fuel (Hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting of cadmium sulfide (CdS) based photocatalyst. *Applied Surface Science Advances*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100520>
- Umaru, D., Hafeez, H. Y., Mohammed, J., Suleiman, A. B., Ndikilar, C. E., & Zakariyya, Y. (2023c). A review of recent progress in solar fuel (Hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting of cadmium sulfide (CdS) based photocatalyst. *Applied Surface Science Advances*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100520>
- Umejuru, E. C., Mashifana, T., Kandjou, V., Amani-Beni, M., Sadeghifar, H., Fayazi, M., Karimi-Maleh, H., & Sithole, N. T. (2023). Application of zeolite based nanocomposites for wastewater remediation: Evaluating newer and environmentally benign approaches. *Environmental Research*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116073>
- Uyen, N. N., Toan, N. C., Truong, N., Tu, L. A., & Le, P. H. (2025). Plasmonic Au–TiO₂ nanowire/nanotube heterostructures for multifunctional photocatalysis: dye and pesticide degradation, water splitting, and antibacterial activity. *Nanoscale Advances*, 7(22), 7317–7332. <https://doi.org/10.1039/D5NA00765H>
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M. L., & Akhtar, F. (2023a). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. In *Chemosphere* (Vol. 328). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M. L., & Akhtar, F. (2023b). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. In *Chemosphere* (Vol. 328). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- Vu, V. N., Thanh Pham, T. H., Le, T. H., & Vuong, T. X. (2025). Enhanced removal of phenol red from water by Cu(ii)-modified Mg–Al composites via adsorption and photocatalysis. *RSC Advances*, 15(35), 28500–28523. <https://doi.org/10.1039/D5RA02645H>

- Wang, L., & Yu, J. (2023). *Principles of photocatalysis* (pp. 1–52). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>
- Woo, S., Jung, H., & Yoon, Y. (2023). Real-time UV/VIS spectroscopy to observe photocatalytic degradation. *Catalysts*, *13*(4), 683.
- Xu, J., Zhang, T., & Zhang, J. (2020a). Photocatalytic degradation of methylene blue with spent FCC catalyst loaded with ferric oxide and titanium dioxide. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69643-2>
- Xu, J., Zhang, T., & Zhang, J. (2020b). Photocatalytic degradation of methylene blue with spent FCC catalyst loaded with ferric oxide and titanium dioxide. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69643-2>
- Yang, X., Yang, Y., Wang, B., Wang, T., Wang, Y., & Meng, D. (2019). Synthesis and photocatalytic property of cubic phase CdS. *Solid State Sciences*, *92*, 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.04.004>
- Zamudio-Torres, I., Ramírez-Morales, E., Pérez-Hernández, G., Hernández-Cruz, M. G., & Rojas-Blanco, L. (2022). Photodegradation of phenol under visible light using chabazite as a stabilizer in anatase TiO₂. *Desalination and Water Treatment*, *266*, 276–283. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28652>
- Zemedu, Y. B., Mahamud, M., Tadesse, A., & Bezu, Z. (2022). *Zeolite Supported Cds/Tio2/Ceo2 Composite: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity for Methylene Blue Dye Degradation*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4299929>
- Zhang, H., bin Samsudin, I., Jaenicke, S., & Chuah, G.-K. (2022). Zeolites in catalysis: sustainable synthesis and its impact on properties and applications. *Catalysis Science & Technology*, *12*(19), 6024–6039.
- Zhang, H., Samsudin, I. bin, Jaenicke, S., & Chuah, G. K. (2022). Zeolites in catalysis: sustainable synthesis and its impact on properties and applications. *Catalysis Science and Technology*, *12*(19), 6024–6039. <https://doi.org/10.1039/d2cy01325h>

Anexo 1

Alojamiento de Tesis en Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	ESTUDIO DEL COMPOSITO CdS-TiO ₂ /ZEOLITA PARA PROCESOS FOTOCATALÍTICOS
Autor de Tesis:	Hugo Armando de la Cruz Hernández
ORCID:	https://orcid.org/0009-0002-5919-587X
Resumen de la Tesis:	<p>En este trabajo se desarrolló un estudio sobre la síntesis y evaluación fotocatalítica de compósitos CdS-TiO₂/zeolita, empleando zeolitas naturales (clinoptilolita) y sintética (NaA) como soportes estructurales. Los materiales fueron obtenidos mediante la técnica sol-gel, con el objetivo de favorecer la dispersión de las fases semiconductoras y mejorar la respuesta a la radiación visible. La caracterización estructural por Difracción de Rayos X (DRX) confirmó la formación de la fase anatasa del TiO₂ y la fase cúbica blenda de zinc del CdS, evidenciando una distribución homogénea sobre la superficie porosa de las zeolitas.</p>

	<p>Las pruebas fotocatalíticas se realizaron utilizando azul de metileno (10 ppm) como contaminante modelo bajo irradiación de un simulador solar, con un tiempo total de reacción de 240 min. Los resultados mostraron que el acoplamiento del CdS con TiO_2 y su incorporación en la matriz zeolítica incrementaron la eficiencia de degradación en comparación con los sistemas individuales. En particular, el compósito TiO_2-CdS/CLI1.5-SIM presentó la mayor actividad fotocatalítica, lo que se atribuye al efecto sinérgico entre las fases semiconductoras y la elevada área superficial de la zeolita natural. Estos hallazgos confirman el potencial del sistema híbrido CdS-TiO_2/zeolita como material sostenible para la remoción de contaminantes orgánicos en medios acuosos.</p>
<p>Palabras Claves de la Tesis:</p>	<p>Fotocatálisis, TiO_2, CdS, zeolita, azul de metileno.</p>
<p>Referencias Citadas:</p>	<p>Las referencias citadas en el trabajo se encuentran en el apartado de "Referencias" que comprende desde la página 87 a la 105.</p>

Anexo 2



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura

**4^{to} Coloquio
Nacional**
Tendencias en el Desarrollo
de los Materiales: Hacia los
Procesos Sostenibles

Otorga la presente

CONSTANCIA

A:

HUGO ARMANDO DE LA CRUZ HERNÁNDEZ,
LIZETH ROJAS BLANCO,
MARCELA DEL CARMEN ARELLANO CORTAZA
Y ÉRIK RAMÍREZ MORALES

Por haber impartido la ponencia en modalidad cartel denominada: **SÍNTESIS DEL COMPOSITO TiO₂/ZEOLITA CLI/NAA PARA APLICACIONES FOTOCATALÍTICAS**, en el marco del **4to. Coloquio Nacional Tendencias en el Desarrollo de los Materiales: Hacia los Procesos Sostenibles**, realizado los días 8 y 9 de octubre del presente, a través de la plataforma del Aula Virtual MS TEAMS.

Cunduacán, Tabasco a; 25 de octubre de 2024

Dra. Dora María Frías Márquez DIRECCIÓN
Directora



Folio: CDCE/2024/4306



Anexo 3



La Sociedad Mexicana de Física a través de la Vocalía de Divulgación otorga la presente constancia

A: Hugo Armando de la Cruz Hernández

Por su participación como ponente en el SEXTO EVENTO de las Jornadas Nacionales de Física 2025 de la Sociedad Mexicana de Física con actividades de divulgación científica y apropiación social del conocimiento, celebrado del 8 al 14 de diciembre del presente año.



Dra. Jennifer López Chacón
Vocal de Divulgación de la
Sociedad Mexicana de Física



Folio: JNF250518