



Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



**“Estudio de las propiedades ópticas y estructurales de óxidos semiconductores
sintetizados mediante química verde”**

TESIS

**PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TITULO DE
BIOINGENIERO**

Presenta:

Astrid Guadalupe Arce Barajas

Director: Dr. Priscy Alfredo Luque Morales

Codirectora: Dra. Reina Vianey Quevedo Robles

Ensenada, Baja California a septiembre 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO



**“Estudio de las propiedades ópticas y estructurales de óxidos
semiconductores sintetizados mediante química verde”**

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE

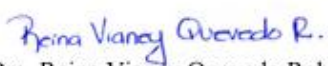
Bioingeniero

PRESENTA

**Astrid Guadalupe Arce Barajas
360894**

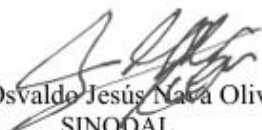
A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


Dr. Priscy Alfredo Luque Morales
DIECTOR


Dra. Reina Vianey Quevedo Robles
CODIRECTORA


Dra. Claudia Mariana Gómez Gutiérrez
SINODAL


Dr. Rubén César Villarreal Sánchez
SINODAL


Dr. Osvaldo Jesús Nava Olivas
SINODAL

“Por la Realización Plena del Ser”

Resumen

De la tesis de Astrid Guadalupe Arce Barajas presentado como requisito para la obtención del título de bioingeniero. Ensenada, Baja California, septiembre 2025.

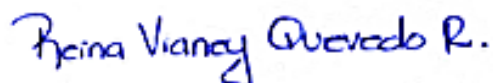
Estudio de las propiedades ópticas y estructurales de óxidos semiconductores sintetizados mediante química verde

Resumen aprobado por:



Dr. Priscy Alfredo Luque Morales

Director de tesis



Dra. Reina Vianey Quevedo Robles

Co-directora de tesis

En este trabajo se presenta la síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos naturales de *Ephedra californica*, con el objetivo de evaluar su eficiencia en la degradación fotocatalítica de tres colorantes: azul de metileno, naranja de metilo y rodamina B. La síntesis se llevó a cabo mediante un método sencillo y ecológico, utilizando extractos a concentraciones de 1%, 3% y 5% p/v, como agentes reductores y estabilizantes. Las nanopartículas obtenidas fueron caracterizadas mediante espectroscopía UV-Vis y FTIR, confirmando la formación del ZnO y la presencia de grupos funcionales provenientes del extracto vegetal.

Los resultados mostraron que la eficiencia fotocatalítica depende de la concentración del extracto utilizado. En la degradación del azul de metileno, las nanopartículas sintetizadas con 5% mostraron la mayor eficiencia, alcanzando un 99.63% de degradación en 180 minutos. Para el naranja de metilo, las mejores eficiencias se obtuvieron con las concentraciones del 1% y 3%, debido posiblemente a la menor aglomeración de partículas. En el caso de la rodamina B, la mayor eficiencia se observó con el 3% de extracto.

Este estudio demuestra que la síntesis verde de nanopartículas de ZnO es una alternativa viable y sostenible para la remediación de aguas contaminadas con colorantes, destacando la importancia de la concentración del extracto en la fotodegradación de los colorantes.

Palabras claves: Semiconductor, síntesis verde, degradación de colorantes, nanopartículas.

Dedicatoria y agradecimientos

Dedico esta tesis a mis padres, Iris y Antonio, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante a lo largo de mi vida. Sin su guía y enseñanza, este logro no hubiera sido posible.

Agradezco a mi director de tesis, Dr. Priscy Alfredo Luque Morales, por su valioso acompañamiento y sabiduría durante este proceso.

A mi codirectora, Dra. Reina Vianney Quevedo Robles, por su paciencia, apoyo incansable, orientación, y por siempre estar disponible para resolver mis dudas y darme confianza.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo para realizar este trabajo de manera satisfactoria, así como el proyecto Ciencia de frontera CF-2023-I-1805 de CONAHCyT.

Al proyecto tratamiento de agua contaminada con desechos industriales en México aplicando óxidos semiconductores de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) número 402/1/C/58/24.

A mis amigos más cercanos, Viviana, Juan Pablo y mi tía Aracely, por su amistad sincera, por su apoyo emocional siendo fuente de motivación y alegría.

A mi gran amiga y mi sobrino, Dannahis y Maico Ali, por su gran amor y compañía, llevándome de la mano en estos momentos.

A los amigos que hice a lo largo de esta carrera que de una forma u otra me apoyaron, en especial a Karen y Mich. Gracias por compartir juntos los momentos más desafiantes, risas, preocupaciones y éxitos.

A todas las personas que han formado parte de este proceso. Mi más sincero agradecimiento a mi familia, amigos, profesores y a todos aquellos que me brindaron apoyo y confianza.

A los integrantes del laboratorio por darme la mano cuando fuera necesario.

A los miembros del comité, Dra. Claudia Mariana Gómez Gutiérrez, Dr. Ruben César Villarreal Sánchez y Dr. Osvaldo Jesús Nava Olivas.

Finalmente, a la Universidad Autónoma de Baja California.

Índice

Resumen	2
1. Introducción.....	7
2. Antecedentes.....	8
2.1 Contaminación del agua.....	8
2.2 Colorantes	9
2.3 Impacto ambiental de los colorantes.....	12
2.4 Métodos de tratamiento del agua	13
2.5 Fotocatálisis heterogénea	14
2.6 Síntesis verde	15
2.7 Nanopartículas de Óxido de Zinc	16
2.8 <i>Ephedra californica</i>	17
3. Hipótesis.....	20
4. Objetivos.....	20
4.1 Objetivo General.....	20
4.2 Objetivos específicos.....	20
5. Metodología.....	21
5.1 Materiales.....	21
5.2 Obtención del extracto natural	21
5.3 Síntesis verde de nanopartículas de ZnO	22
5.4 Evaluación fotocatalítica.....	22
6. Resultados y discusión	23
6.1 Síntesis de nanopartículas.....	23
6.2 Caracterización	25
6.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier	25
6.2.2 Determinación de banda prohibida	27
6.3 Actividad fotocatalítica	28
6.3.1 Degradación de azul de metileno.....	29
6.3.2 Degradación de naranja de metilo.....	32
6.3.3 Degradación de rodamina B	35
6.4 Mecanismo de degradación	38
7. Conclusión.....	38
8. Referencias	40

1. Introducción

El agua es esencial para la vida, ya que se utiliza en numerosos procesos vitales para los seres humanos y otros seres vivos. Sin embargo, el uso extensivo de colorantes por parte de diversas industrias ha llevado a la generación significativa de aguas residuales contaminadas. A lo largo de la historia de la humanidad, los pigmentos y colorantes han estado directamente asociados a las manifestaciones culturales de las diferentes civilizaciones. Lo cual está relacionado directamente con la belleza de su colorido, constituyendo una gran parte del comercio [1].

Dentro de las industrias, hay más de diez mil tipos de pigmentos y colorantes sintéticos que son usados por ellas, en las que predominan la textil, papelera, cosmética, farmacéutica, entre otras. Se estima que cerca del 15% de estos compuestos se desechan en las aguas residuales y son contaminantes persistentes que no pueden removerse con métodos convencionales de tratamiento de agua, debido a sus estructuras complejas [2] [3].

Dentro de la industria textil se utilizan colorantes que son fáciles de utilizar, económicos, altamente estables y ofrecen una amplia variedad de tonalidades. Sin embargo, la concentración de estos en los efluentes antes mencionados puede alcanzar hasta 1000 ppm [4]. Además, durante el 2019, la demanda de productos textiles impulsada por la moda de la industria rápida representó más del 65% del mercado, con una tasa de crecimiento anual del 4.5% durante 2018 al 2025, incrementando su impacto ambiental [5].

Existen diferentes tipos de tratamientos para remover estos colorantes del agua. Algunos de ellos son la coagulación, ósmosis inversa, ultrafiltración, adsorción en carbón activado. Sin embargo, son muy costosos, producen lodos y subproductos incluso más tóxicos y difícil de eliminar que el contaminante original [6].

Por otro lado, los procesos avanzados de oxidación, tienen la característica de degradar completamente los compuestos orgánicos, hasta su mineralización, obteniendo como subproductos H_2O y CO_2 [7]. La fotocatalisis heterogénea llevada a cabo con nanopartículas de óxido de zinc, es considerada una de las mejores opciones para degradar contaminantes debido a que puede trabajar tanto en el espectro visible como en la región UV, presenta una estabilidad química, baja toxicidad y costos reducidos. Además, de que es capaz de degradar

colorantes en medio [8]. Con la mención, del costo de operación, el cual es aproximadamente de 0.68 dólares por metro cúbico de agua tratada [9].

Por otro lado, las tecnologías emergentes han impulsado el uso de nanopartículas. Estas estructuras tienen dimensiones inferiores a 100 nm, en casos excepcionales pueden llegar a 1000 nm. Además, se pueden sintetizar a partir de diferentes materiales [10] [11].

En este sentido, las nanopartículas de óxido de zinc tienen propiedades ópticas, eléctricas, físicas y antimicrobianas [12] [13]. Existen diversos métodos para la síntesis de nanopartículas incluyendo métodos físicos, químicos y métodos verdes. No obstante, la síntesis verde empleando extractos de plantas permite obtener nanopartículas de óxido de zinc con buena estabilidad, morfología controlada y, frecuentemente, con un buen rendimiento catalítico [14]. La fotocatalisis heterogénea, utilizando materiales sintetizados mediante síntesis verde reemplazando los reactivos químicos tóxicos por sustancias naturales como hongos, levaduras y plantas, es la alternativa más económica, sustentable, eficiente y versátil para la eliminación/mitigación de contaminantes del agua [15] [16].

En este proyecto se llevó a cabo la síntesis de nanopartículas semiconductoras de ZnO utilizando extractos naturales como agentes estabilizantes y reductores, con el propósito de degradar fotocatalíticamente tres colorantes orgánicos utilizando nanopartículas sintetizadas a partir de *Ephedra californica*, a diferentes concentraciones.

2. Antecedentes

2.1 Contaminación del agua

El recurso hídrico es uno de los principales recursos naturales debido a que es necesario para la supervivencia del hombre como especie. Sin embargo, a lo largo de la historia se han tenido consecuencias graves por la falta de planeación y el mal aprovechamiento del agua [17]. Según la Organización Mundial de la Salud, un agua está contaminada cuando su composición se ve modificada a tal grado que pierde las condiciones aptas para los usos destinados, es decir, presenta alteraciones físicas, químicas o biológicas lo cual no permite cumplir sus funciones ecológicas [18]. En ambos países sub y desarrollados, se considera que las principales fuentes de contaminación son la agrícola e industrial (Figura 1), así como

también, los de mayor afluencia con problemas de vertidos químicos, cómo lo son los detergentes sintéticos, disolventes, pesticidas, pinturas y colorantes [19].

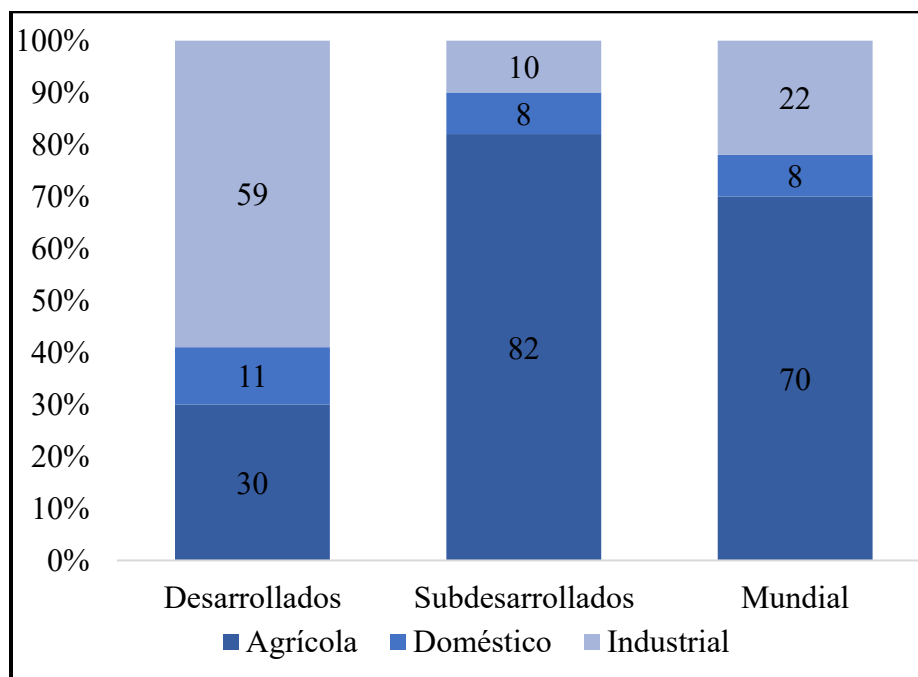
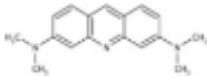
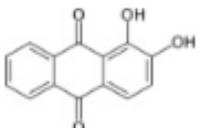
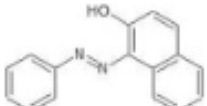
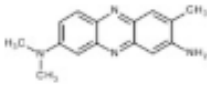
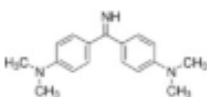
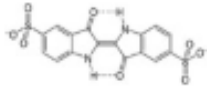


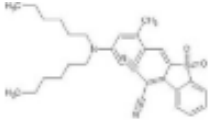
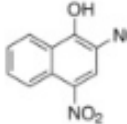
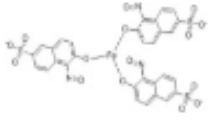
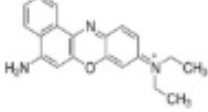

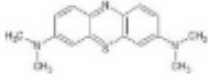
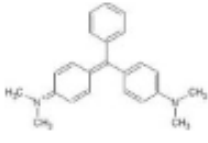
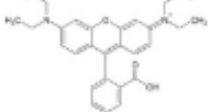
Figura 1. Usos del consumo mundial de agua [20].

2.2 Colorantes

Un colorante es una sustancia utilizada cómo aditivo para acentuar el color original o darle un color más atractivo a otras sustancias [21]. Al paso del tiempo, se desarrollaron diversos colorantes sintéticos. Uno de ellos fue el añil, el cual permitió a diseñadores y estampadores, realizar diseños con colores vivos [22]. Los colorantes sintéticos permiten acceder a una gran diversidad de tonalidades, en la actualidad, se utilizan cerca de 10000 colorantes diferentes, pero los más importantes a nivel industrial son los azoicos [23]. Estos tintes o colorantes orgánicos, pueden ser naturales o sintéticos que son diferenciados por sus propiedades químicas y físicas, las cuales se muestran en la Tabla 1[24].

Tabla 1. Las principales clases de tintes orgánicos sintéticos y sus ejemplos basados en sus cromógenos.

Cromógeno	Índice de color Nombre genérico/color Índice Número de constitución	Nº CAS.	Nombre común	Fórmula estructural del tinte	$\lambda_{\text{máximo}}$ [nm]
Acridina	C.I. básico naranja 14 C.I. 46005	10127-02-3	Naranja acridina		500
Antraquinona	C.I. rojo mordente 3 C.I. 58005	72-48-0	Rojo de alizarina s		609
Azo	C.I. amarillo solvente 14 C.I. 12055	842-07-9	Sudán I		476
Azine	C.I. rojo básico 5 C. I. 50040	553-24-2	Rojo neutro		530
Difenilmetano	C.I. básico amarillo 2 C.I. 41000	2465-27-2	Auramina O		432
Índigo	C.I. azul ácido 74 C.I. 73015	860-22-0	Carmín índigo		612

Metina	C.I. azul disperso 354 C.I. 48480	104137- 27-1			610
Nitro	C.I. amarillo ácido 24 C. I. 10315	605-69-6	Amarillo Martius		432
Nitroso	C.I. verde ácido 1 C.I. 10020	19381- 50-1	Verde naftol B		714
Oxazina	C.I. azul básico 12 C. I. 51180	3625-57- 8	Azul del Nilo A		638
Phthalocyanine	C.I.direct azul 199 C.I. 74190	12222- 04-7			610
Tiazina	C.I. básico azul 9 C.I. 52015	61-73-4	Azul de metileno		660
Trifenilmetano	C.I. básico verde 4 C.I. 42000	2437-29- 8	Verde de malaquita		615
Xanteno	C.I. rojo ácido 52 C.I. 45100	81-88-9	Rodamina B		550

Los colorantes tipo azo, tienen uno o más grupos $-N=N-$ unidos a anillos aromáticos [25].

Los colorantes azoicos se utilizan para telas debido a que su sistema de electrones pi conjugado extendido ocasiona que absorban en la región visible del espectro electromagnético [26].

En la industria textil, la producción de sus productos consiste en una serie de procesos con diversas materias primas como el algodón, lana, fibras o colorantes [27]. También, los colorantes azoicos, en determinadas condiciones, producen aminas aromáticas que son tóxicas, mutagénicas, cancerígenas y alérgicas, además son altamente solubles en agua y difíciles de degradar (Figura 2) [25].

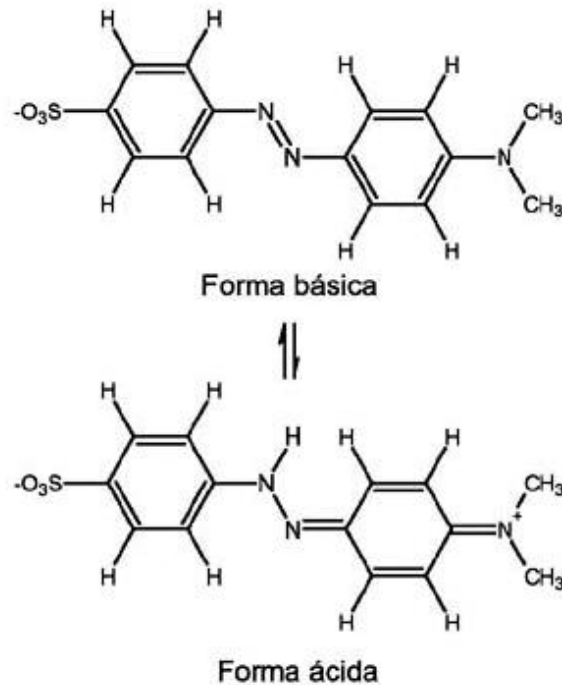


Figura 2. Estructura del naranja de metilo en medio básico y en medio ácido [28].

2.3 Impacto ambiental de los colorantes

Los colorantes empleados en la industria textil tienen un alto impacto en la flora, fauna y microorganismos, así como en la salud humana, debido a que son altamente solubles en los efluentes y cuerpos de agua [29]. En México, hay un alto número de empresas en el sector textil, generando grandes volúmenes de aguas residuales con presencia de estos colorantes [30]. Esto no solo sucede en México; mundialmente, se utilizan 93 000 millones de metros cúbicos de agua cada año, y el 93% regresa coloreada y contaminada [31]. Muchos de los efectos de esta contaminación se observan a largo plazo debido a la acumulación en los tejidos de animales acuáticos (Figura 3), aumentando la población de peces y algas debido a su alto contenido de nitrógeno, y agotando a largo plazo el contenido de oxígeno disuelto en el agua, además de suprimir los procesos fotosintéticos en los recursos de acuáticos [32].

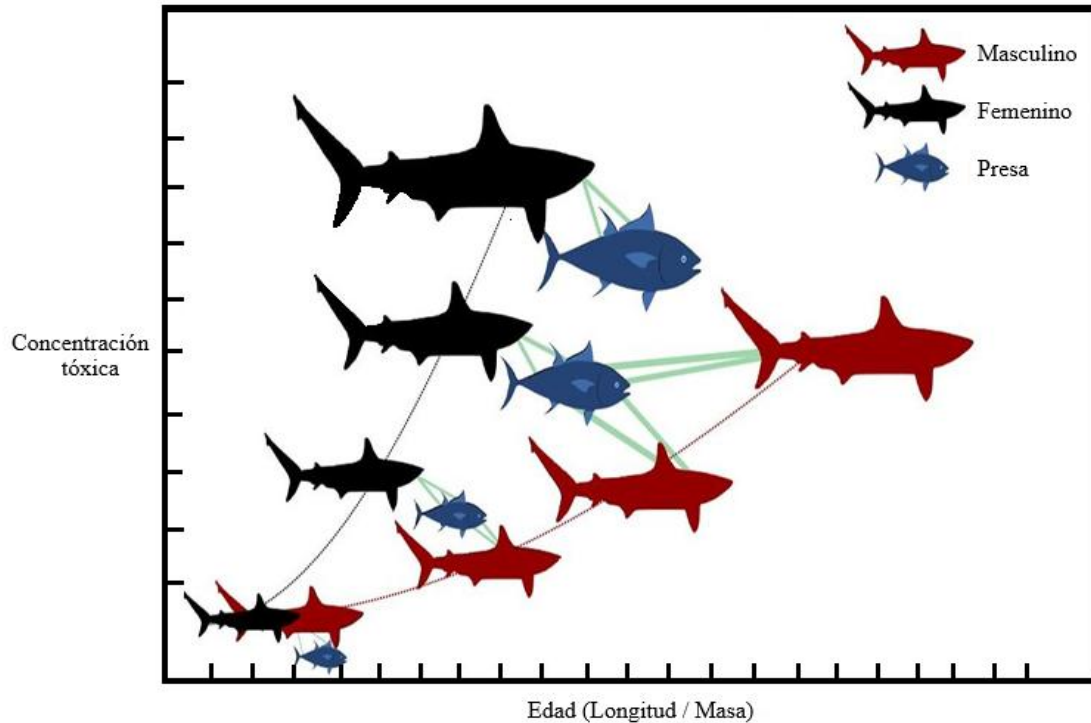


Figura 3. Modelo conceptual de bioacumulación en depredadores de larga vida[33]

2.4 Métodos de tratamiento del agua

Los métodos de tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes que son utilizados en la actualidad son la filtración por membrana y oxidación avanzada, así como métodos biológicos como la biosorción y los métodos enzimáticos.

El tratamiento de aguas residuales por filtración de membrana permite el control del proceso biológico, teniendo un mayor tiempo de retención de sólidos, que funciona de manera independiente a la retención hidráulica, eliminando un alto porcentaje de sólidos en suspensión. Además, permite separar contaminantes según su tamaño molecular e iónico. Esto da una gran versatilidad en su utilización, y puede trabajar a temperaturas ambientales, dándole la mejor rentabilidad (Figura 4) [34].

El tratamiento por medio de oxidación avanzada es un método que conlleva una oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, en la que se llega hasta la mineralización de los contaminantes. Esto es adecuado para aguas contaminadas con productos orgánicos tóxicos, o aquellos que son difíciles de degradar [35].

La fotocatalisis con luz solar es un proceso de oxidación avanzada, usualmente se emplea la luz solar que llega a la superficie terrestre para generar reacciones químicas de oxido-reducción que ayudan a la eliminación de compuestos orgánicos [36].

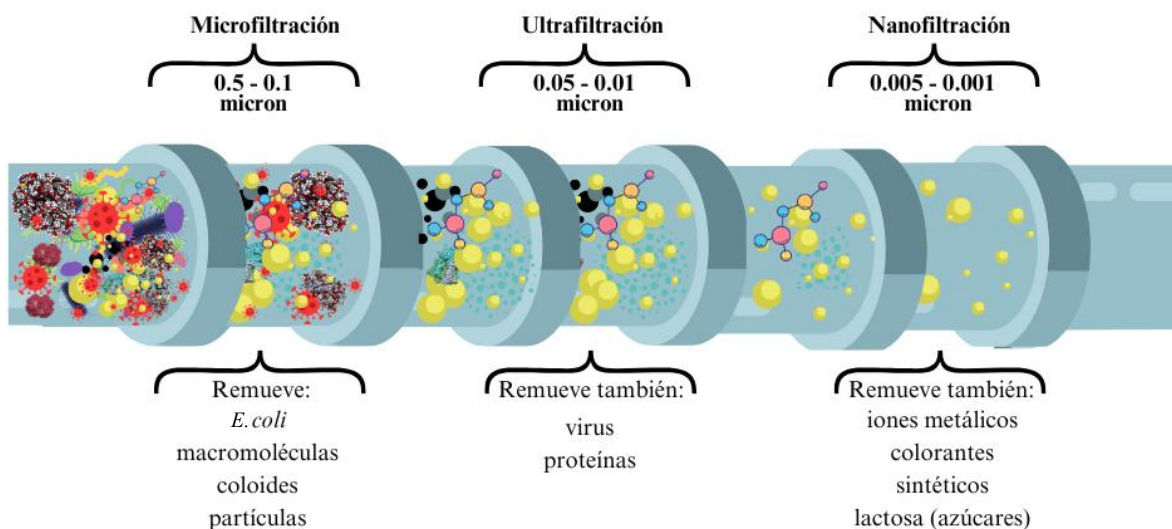


Figura 4. Esquema completo de diversas técnicas de filtración por membrana [37].

Por otro lado, los métodos biológicos, como la biosorción por medio de bacterias y hongos, ayudan a remover los colorantes utilizando lodos activados, composta, suelos, entre otros. El tratamiento por medio de métodos enzimáticos se deriva de la decoloración que es resultado de la retención física en la biomasa a través del metabolismo celular por medio de algunas enzimas, como las lacasas y peroxidasas, que son producidas generalmente por hongos, resultando como muy prometedor.

Sin embargo, algunas de estas tecnologías como la filtración por membrana, procesos de oxidación avanzada, y métodos enzimáticos; son altamente costosas, no se aplican a todos los colorantes y no resuelven el problema de la decoloración.

2.5 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada muy confiable que utiliza la luz ultravioleta, ya sea solar o con una lámpara UV, como catalizadora para excitar un material semiconductor que impulse reacciones de oxido-reducción mediante la formación

de pares electrón-hueco en su superficie [38]. Esto funciona hasta que el fotocatalizador se encuentra lo suficientemente excitado dando lugar a la reacción de oxido-reducción produciendo especies altamente oxidantes como el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), los cuales ayudan a destruir los contaminantes significativamente sin que el fotocatalizador sufra cambios químicos [34]. Uno de los catalizadores que es más utilizado es el dióxido de titanio, debido a que no es tóxico ni genera subproductos tóxicos y, dentro de sus propiedades ópticas se encuentran el alto nivel de refracción [39].

2.6 Síntesis verde

La síntesis de materiales que son amigables con la naturaleza se le conoce como síntesis verde, las cuales a su vez producen una menor cantidad de desechos tóxicos. Algunos de los más utilizados son los extractos de plantas [40]. Esta se basa en la reducción de metales mediante especies naturales, debido al poder de los sistemas biológicos como plantas, algas, tierras diatomeas, bacterias, levaduras, hongos, entre otros, que pueden reemplazar a los agentes químicos (Figura 5). Así se crearon diversas estrategias para sintetizar nanopartículas; algunas de ellas de sales de metales y otras por óxidos metálicos durante el crecimiento de la planta y después son extraídas del material seco de las plantas. Además de sintetizar directamente mediante el uso del extracto acuoso de plantas, siendo este el método más rápido a realizar [10] [41]. Este método es simple, barato y amigable con el medio ambiente debido al uso de material biológico para la síntesis de estas nanopartículas, como se mencionó anteriormente [42].

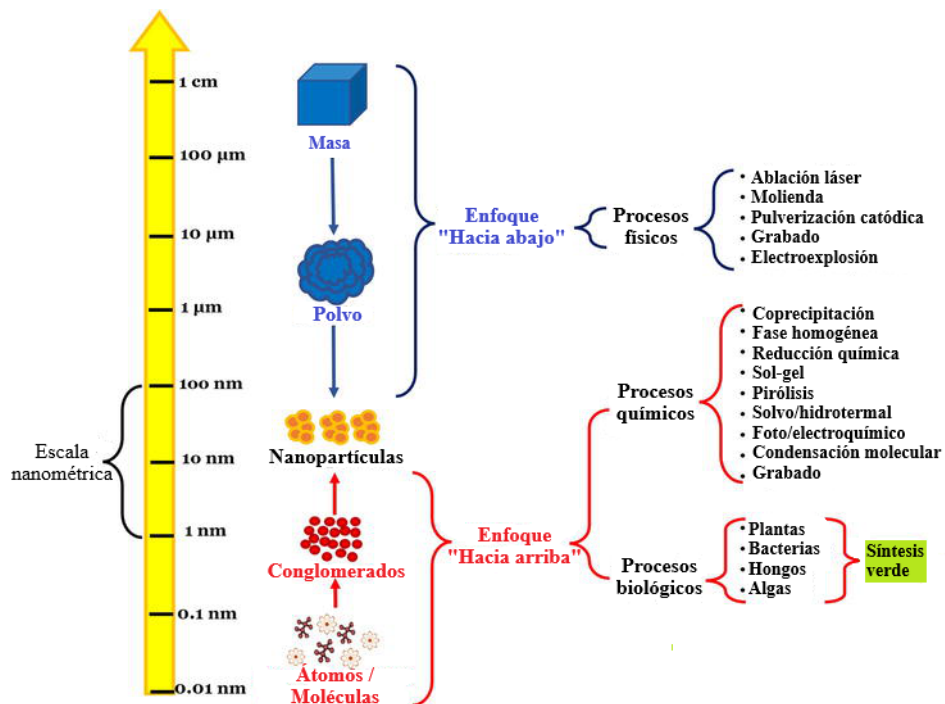


Figura 5. Escala nanométrica y diferentes enfoques para síntesis de nanopartículas [43].

2.7 Nanopartículas de Óxido de Zinc

Las nanopartículas son los desarrollos actuales que son más conocidas y estudiadas. Son estructuras con tamaños inferiores a 100 nm hasta 1000 nm, en casos excepcionales, y pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales. Para observarlas se necesita de microscopios de alta resolución, como el electrónico de barrido o el electrónico de transmisión [10].

El óxido de zinc es uno de los materiales con grandes aplicaciones a nivel avanzado, gracias a su amplia banda prohibida que es de 3.37 eV (Tabla 2), y a su vez una energía de enlace de excitones igual de grande con 60 meV [44].

Tabla 2. Propiedades físicas y ópticas de las nanopartículas de óxido de zinc [45] [46].

Nanopartículas de ZnO	
Estructural estable	Estructura hexagonal wurtzita
Tamaño	22.76 – 24.65 nm
Absorción mínima	Rango visible
Absorción máxima	Rango ultravioleta
Ancho de banda prohibida	3.37 eV
Energía de enlace	60 meV
Morfología	Cuasi-esférica
Seguridad biológica	No tóxicas, bioseguras y biocompatibles
Color	Blanco

Las nanopartículas de óxido de zinc tiene propiedades optoelectricas, físicas y químicas, además de tener una sensibilidad por la luz ultravioleta lo cual le permite una actividad fotocatalítica por la capacidad de excitar a las nanopartículas de óxido de zinc, con lo cual el semiconductor es capaz de hacer una promoción de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción generando un hueco (h⁺) y un e⁻, respectivamente, lo cual propicia reacciones redox con el agua y el oxígeno generando especies reactivas, que eventualmente realizan el proceso de fotodegradación [47] [48]. Hay muchas formas de sintetizar NPs de ZnO. Una de ellas es la precipitación, la cual consta de cuatro pasos: la formación de precursores, en las que se llevan a cabo reacciones de neutralización; nucleación, crecimiento y, por último, el proceso de envejecimiento en el que se engrosan las NPs [49].

2.8 *Ephedra californica*

La familia *Ephedraceae* son subarbustos, arbustos o pequeños arbolitos dioicos; contienen ramas cilíndricas, rematoides, estriadas, erguidas o apoyantes [50]. El género *Ephedra* L., de la misma familia tiene cerca de 60 especies distribuidas en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Figura 6) [51]. Estos arbustos altamente tolerantes a la sequía (Figura 7),

contienen propiedades benéficas dentro del ámbito medicinal, considerando sus componentes fitoquímicos principales, como flavonoides, alcaloides, ácidos fenólicos, entre otros [52] [53].



Figura 6. Distribución mundial del género *Ephedra* [44].

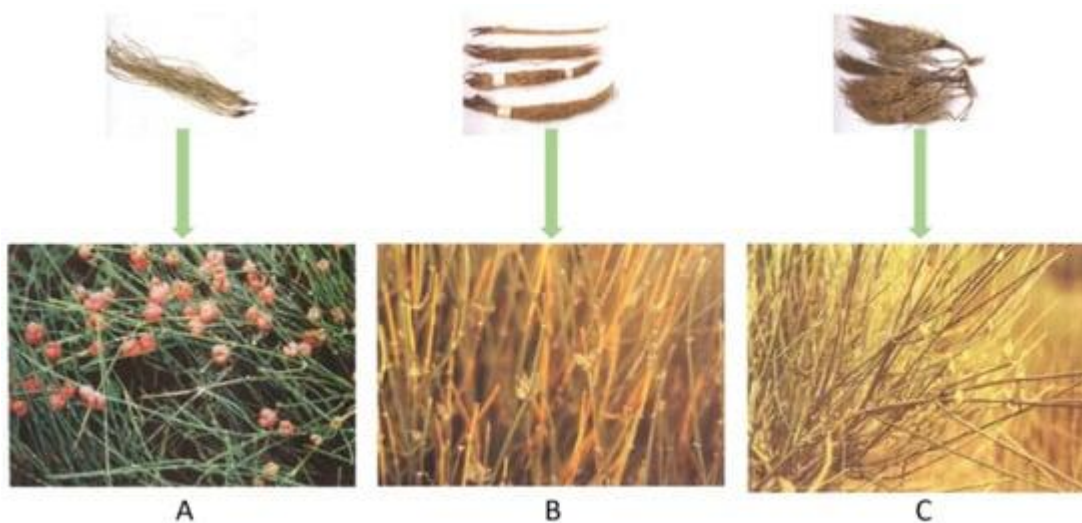


Figura 7. Tres tipos de *Ephedra*: A) *Ephedra sinica*; B) *Ephedra intermedia*; C) *Ephedra equisetina* [54]

En México existen ocho especies: *E. antisiphilitica*, *E. aspera*, *E. compacta*, *E. nevadensis*, *E. pedunculata*, *E. torreyana*, *E. trifurca* y *E. californica*.

Ephedra californica es un arbusto erecto, que va desde tallos jóvenes de color verde amarillento hasta tallos maduros de color café. Tiene ramas semiflexibles a rígidas, firmes y cilíndricas. Crece en terrenos arenosos, pastizal y dunas. Se extiende restringidamente y altamente fragmentado desde Estados Unidos de América hasta México, específicamente Baja California y Baja California Sur (Figura 8) [51] [55].

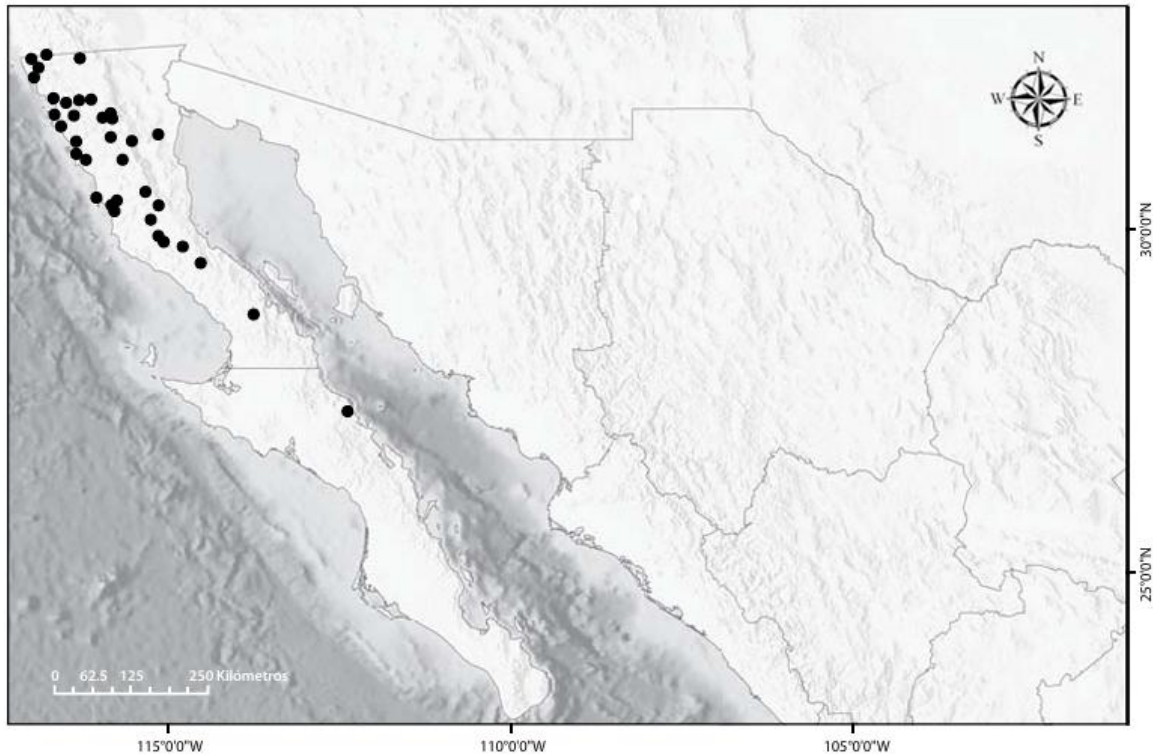


Figura 8. Distribución geográfica de *E. californica* en México [44].

Con todo lo anterior, este trabajo propone la síntesis de nanopartículas de ZnO utilizando diferentes concentraciones del extracto de *Ephedra californica*, en donde las propiedades fotocatalíticas de las nanopartículas semiconductoras serán evaluadas en la degradación de tres colorantes modelos Azul de metileno, Rodamina B y Naranja de metilo.

3. Hipótesis

Las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas mediante química verde, utilizando extractos vegetales, tendrán una degradación fotocatalítica de los colorantes Azul de metileno, Rodamina B y Naranja de metilo bajo irradiación ultravioleta en un tiempo de 3 horas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Degradar fotocatalíticamente tres colorantes orgánicos modelo mediante nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas mediante métodos verdes, a partir de extractos naturales.

4.2 Objetivos específicos

1. Obtener extractos a partir de *Ephedra californica*.
2. Elaborar la síntesis verde de nanopartículas de ZnO a partir de los extractos obtenidos.
3. Determinar las propiedades de las NPs de ZnO por técnicas de caracterización, por medio de espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier y espectroscopía ultravioleta visible.
4. Obtener los estudios de degradación fotocatalítica de un colorante orgánico aplicando radiación ultravioleta.

5. Metodología

5.1 Materiales

1. Extractos naturales de *Ephedra californica* a diferentes concentraciones.
2. Nitrato de zinc hexahidratado, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, como Sal precursora.
3. Colorantes Azul de metileno (MB), Rodamina B (RhB) y Naranja de metilo (MO).
4. Agua desionizada, como solvente

5.2 Obtención del extracto natural

Para la obtención de los extractos se prepararon tres soluciones acuosas a una concentración de 1, 3 y 5 % p/v (peso volumen), por duplicado. Se adicionó agua desionizada a los extractos, y se colocó en agitación durante 2 h (Figura 9). Una vez transcurrido el tiempo, se colocaron en un baño maría por 60 °C por 1 h. Finalmente, se filtraron y se almacenaron para su posterior uso en la síntesis de ZnO.

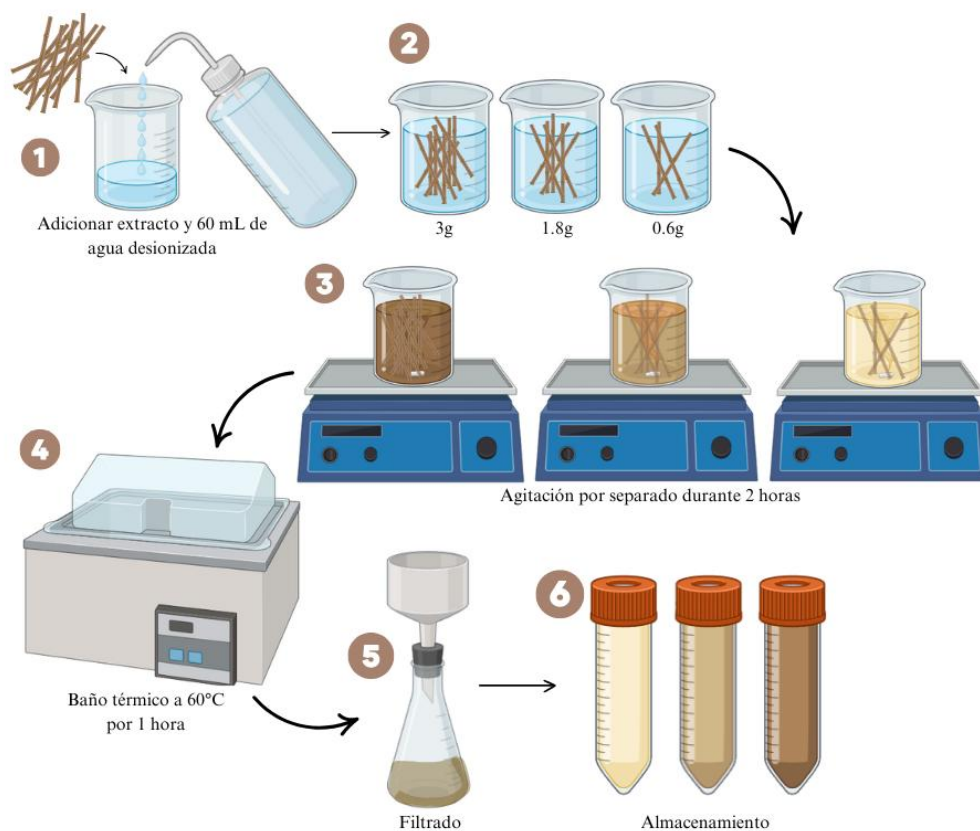


Figura 9. Diagrama para la obtención de solución de extracto.

5.3 Síntesis verde de nanopartículas de ZnO

Para la síntesis de las nanopartículas de ZnO, se mezclaron 2 gramos de la sal precursora $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con 45 mL de solución acuosa del extracto y se colocó en agitación durante 1h. Después, las soluciones se colocaron en un baño maría a 60 °C durante 14 h, logrando retirar el exceso de agua. Posteriormente, se le dio un tratamiento térmico a 400 °C, y, como paso final, se molió para obtener un polvo fino (Figura 10).

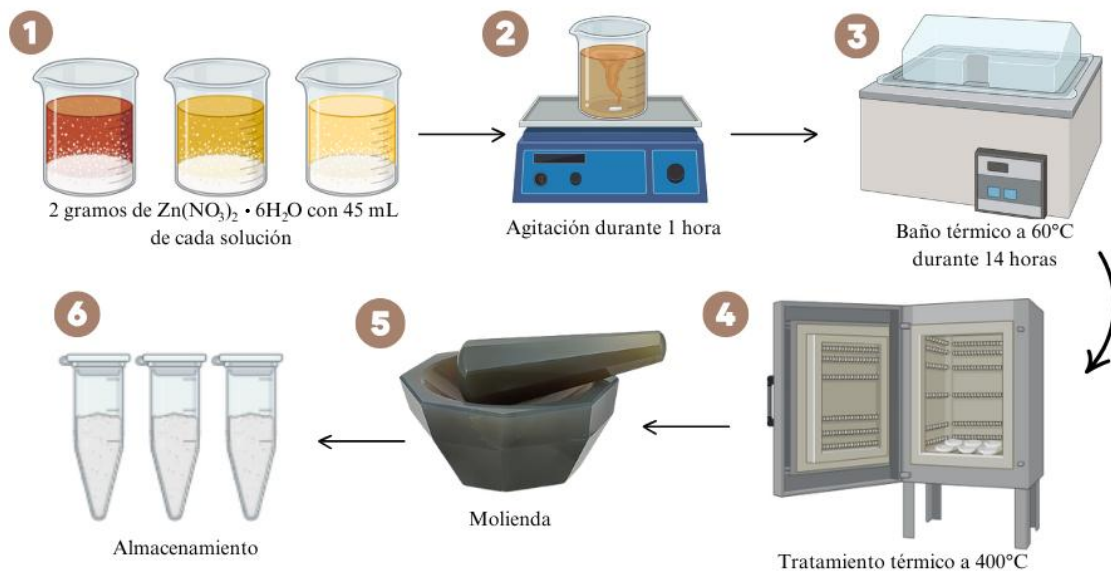


Figura 10. Diagrama de la síntesis verde de NPs de ZnO.

5.4 Evaluación fotocatalítica

Se investigó la fotodegradación de colorantes con una concentración de 15 ppm. Para ello, se colocaron 50 mg de cada muestra de NPs de ZnO en un vaso de precipitado y se dejó en agitación durante 30 minutos. Luego, se colocó en un reactor y se expuso a una luz ultravioleta de 10 W a $18 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Se tomaron alícuotas de 2 mL cada 30 minutos durante 3h, éstas fueron analizadas con un espectrofotómetro UV-Vis para la determinación de la concentración final (Figura 11).

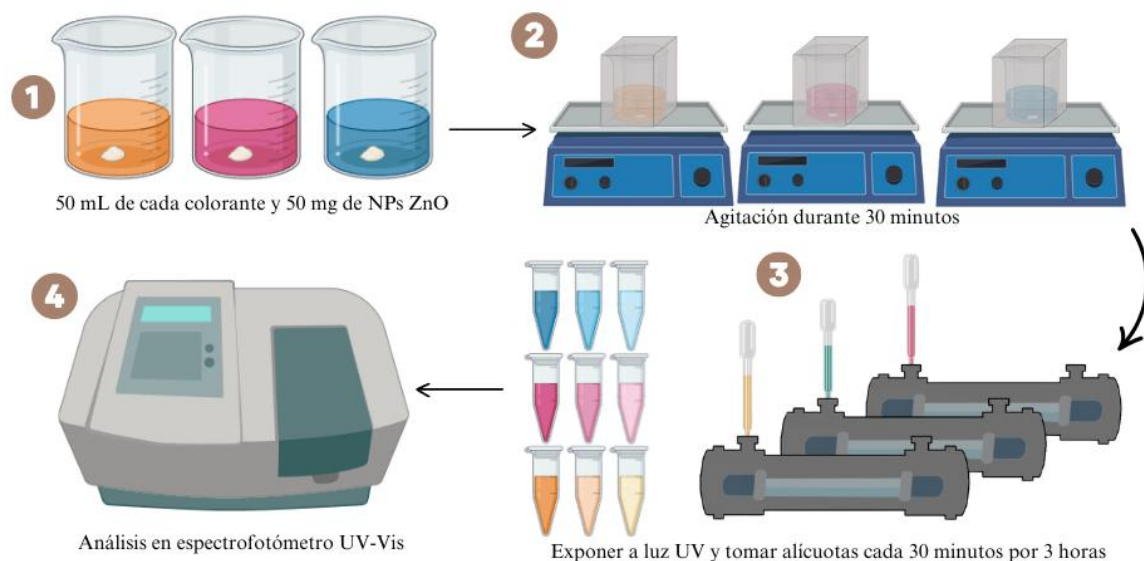


Figura 11. Diagrama de la evaluación fotocatalítica.

6. Resultados y discusión

6.1 Síntesis de nanopartículas

La síntesis de nanopartículas dio como resultado seis muestras de nanopartículas con concentraciones de 1%, 3% y 5% p/v por duplicado, dando como producto final un polvo fino blanquecino, el rendimiento másico fue en aumento dependiente de la concentración, como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Rendimiento másico de NPs de ZnO a distintas concentraciones

Concentración	NPs (mg)
1%	305.5
3%	362.7
5%	379.3

El aumento del rendimiento másico con la concentración del precursor es consistente con estudios previos que reportan una relación entre la concentración del precursor y el

rendimiento de las nanopartículas, favoreciendo a la formación de estas NPs [56]. El hecho de que tenga un mayor rendimiento el de mayor concentración se debe a la disponibilidad de iones metálicos disponibles para nucleación y crecimiento, así favoreciendo a la formación de nanopartículas [57].

Dentro de la Figura 12, se muestra la propuesta del mecanismo de formación de nanopartículas, debido a que los grupos hidroxilos se ligan con la sal precursora, nitrato de zinc hexahidratado. Posteriormente, dentro de la hidrólisis, los iones de los grupos hidroxilos son liberados, y a su vez, ligados a los iones de zinc formando un complejo de zinc. Por último, en la calcinación a 400°C, se liberan las nanopartículas de ZnO [58].

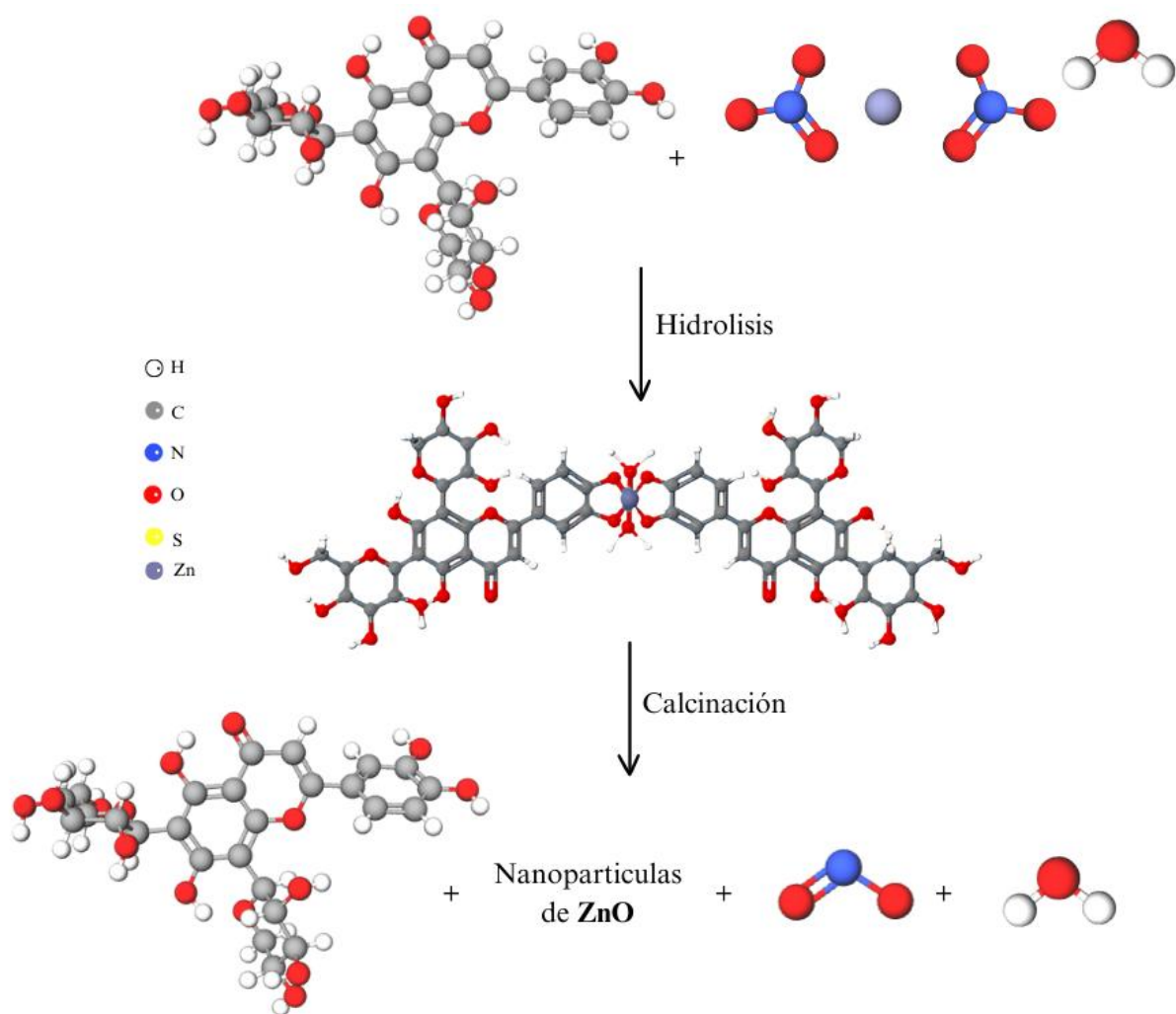


Figura 12. Propuesta de mecanismo de formación de nanopartículas de ZnO.

6.2 Caracterización

6.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier

Un análisis de espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) realiza un análisis fisicoquímico de las nanopartículas [59]. Dentro de la Figura 13, se muestran las bandas de absorción para las tres síntesis de ZnO. La banda observada a 440 cm^{-1} en todas las muestras es atribuido al enlace ZnO, confirmando así la formación del óxido de zinc [60] [61]. Sin embargo, dentro de la región de grupos funcionales y la región de huellas dactilares, es posible observar otras bandas de absorción IF. Esta es atribuida a presencia o restos del extracto utilizado, según Fazeli-Nasab *et. al.*, determinaron que en *Ephedra sínica* las bandas se tenían unas bandas de OH a 3200 cm^{-1} , por lo que la banda obtenida a 3199 cm^{-1} es atribuido a este enlace [59]. Por otro lado, en un extracto de *Ephedra aphylla*, se encontraron picos alrededor de $1000\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ determinados como vibraciones de estiramiento de C-O, obteniendo, un pico en 1016 cm^{-1} , comprobando así que tenemos este enlace [62]. Además, a 1156 cm^{-1} , de acuerdo a la literatura, son vibraciones de estiramiento de enlaces C-C, que intervienen en la formación de fenoles y aromáticos [59]. Por último, se encontró un pico en 1426 cm^{-1} , asociado a la vibración del enlace C-H [63]. Estos son correspondientes a flavonoides encontrados en algunas especies de *Ephedra*, como la herbacetina, mostrado en la figura 14, indicando así la presencia del extracto [64]. Este tipo de flavonoides tiene capacidad reductora y estabilizadora, siendo efectivo para la degradación [65].

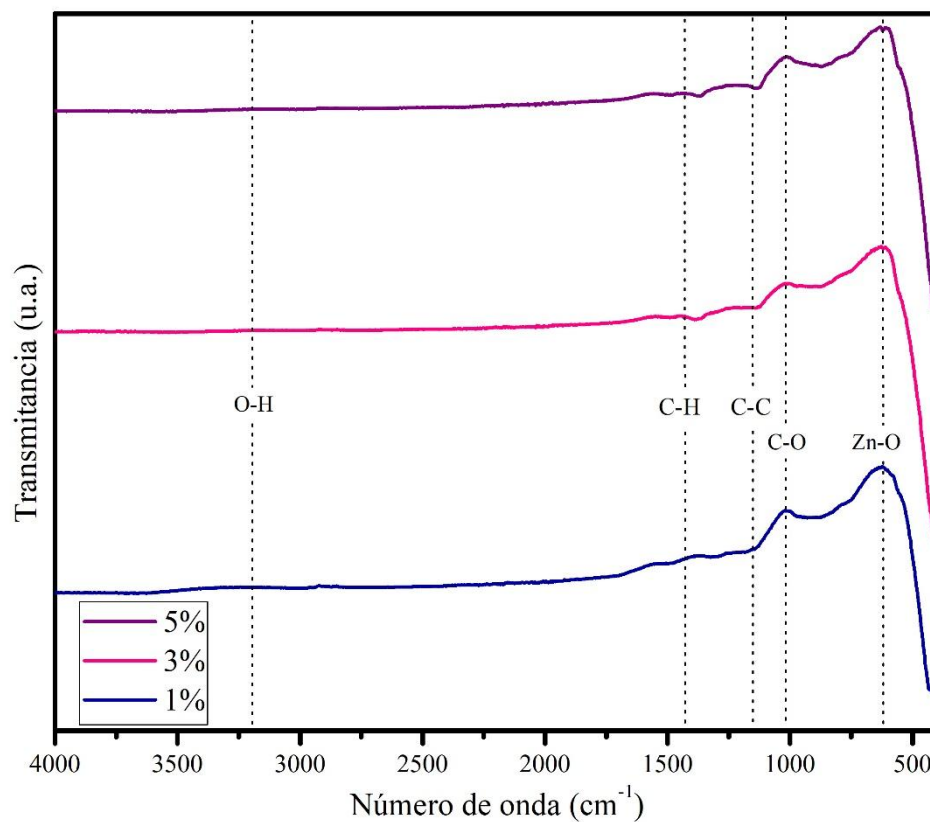


Figura 13. Espectro FTIR de nanopartículas de ZnO utilizando concentraciones del extracto de 1%, 3% y 5% .

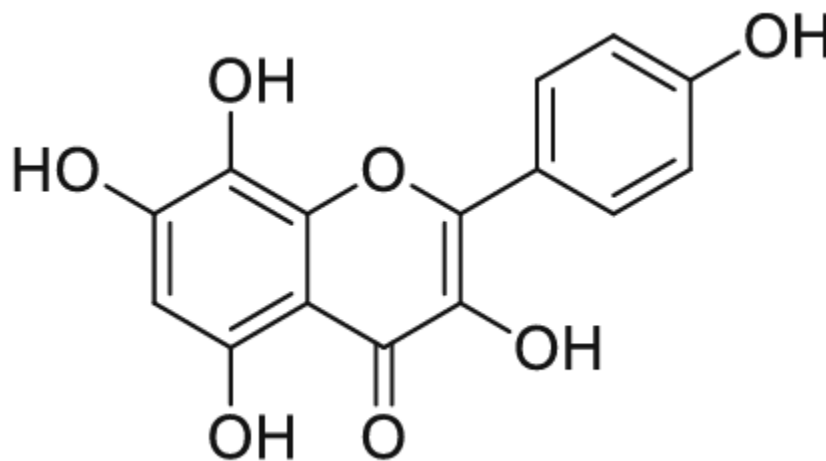


Figura 14. Estructura química del flavonol herbacetina [64].

6.2.2 Determinación de banda prohibida

En la Figura 15, se muestran los espectros de absorción de las nanopartículas de óxido de zinc a concentraciones de 5%, 3% y 1% p/v. Estos cuentan con una banda de absorción máxima en 373 nm, 376 nm y 381 nm. Esta variación es debido a la cantidad de extracto involucrado en la síntesis de las NPs de ZnO [66]. Para determinar la banda prohibida, es decir, la energía requerida para realizar una promoción de electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, se utilizó el modelo de TAUC (Ecuación 1).

$$(\alpha hv)^{1/n} = B(hv - E_g) \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente de absorción (Lambert-Beer), hv es la energía del fotón incidente, B es una constante, E_g es la energía de banda prohibida y n es el tipo de transición electrónica $n=1/2$ [67]. Los valores obtenidos para ZnO 5% es de 2.98 eV (Figura 15 (d)), ZnO 3% es 2.73 (Figura 15 (e)), y, por último, ZnO 1% es 2.52 eV (Figura 15 (f)). El valor del óxido de zinc en su estado puro (ZnO prístino) es de 3.37 eV, la diferencia con el mismo se debe a la presencia de moléculas orgánicas provenientes del extracto vegetal utilizado durante la síntesis [68]. Esta disminución en el valor de la banda prohibida implica que se requiere menos energía para excitar un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, facilitando así la generación de pares electrón-hueco y la consecuente producción de radicales oxidantes [69]. Este fenómeno ha sido ampliamente reportado en estudios recientes, donde extractos naturales actúan no solo como reductores y estabilizantes, sino también como modificadores ópticos que introducen defectos superficiales o niveles intermedios de energía en la estructura del ZnO, favoreciendo la absorción de luz y mejorando la eficiencia fotocatalítica [70][71].

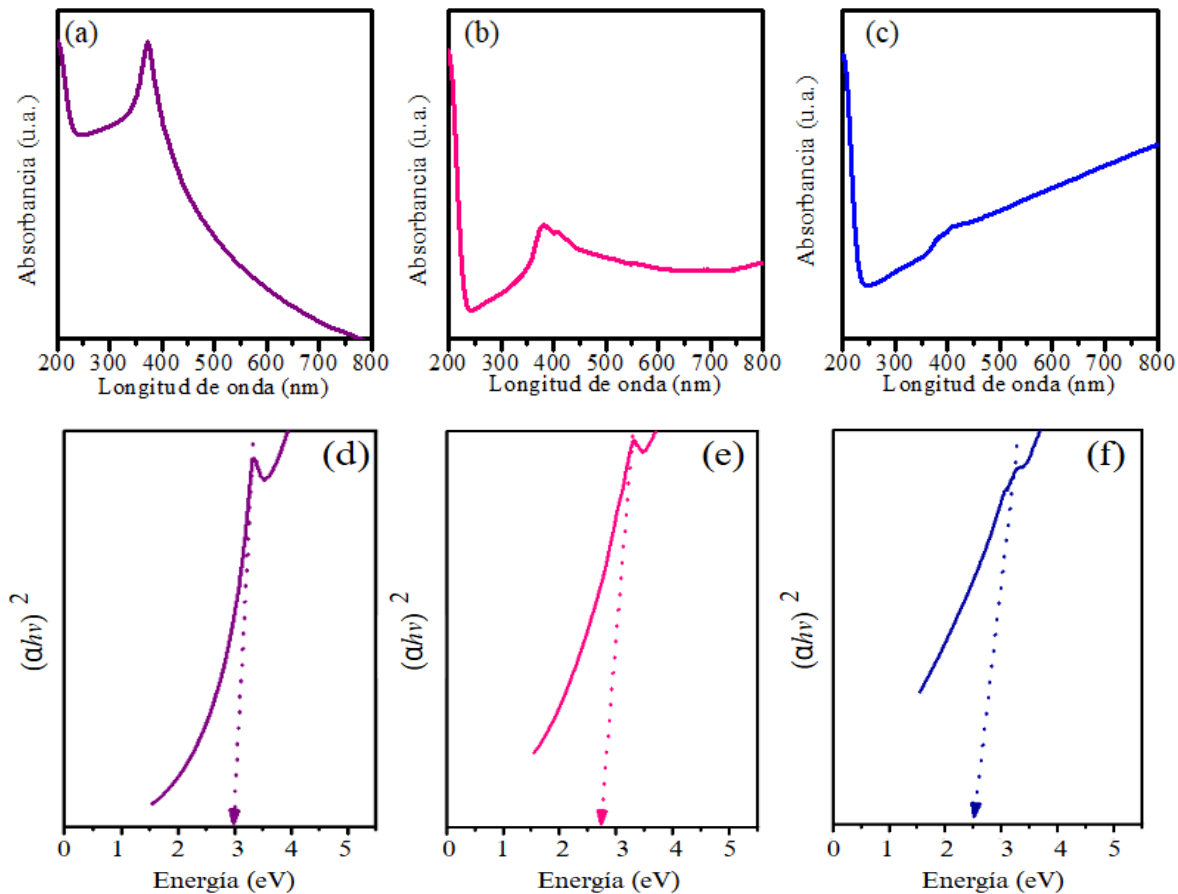


Figura 15. Espectros UV-Vis de ZnO al (a) 5%, (b) 3% y (c) 1% y gráficas TAUC (d) 5%, (e) 3% y (f) 1%.

6.3 Actividad fotocatalítica

La evaluación de la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de ZnO se realizó con tres colorantes diferentes, azul de metileno (MB), naranja de metilo (MO) y rodamina B (RhB) (Figura 16), bajo irradiación con luz ultravioleta con lámparas. Posteriormente las alícuotas se analizaron por espectroscopía UV-Vis.



Figura 16. Colorantes utilizados para degradación, MO, RhB y MB, respectivamente.

6.3.1 Degradación de azul de metileno

La degradación de azul de metileno en presencia de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) redujo la concentración del colorante a lo largo de la toma de alícuotas en intervalos de 0, 10, 20, 30, 60, 120, 150 y 180 minutos. En la Figura 17 (c), se observa la degradación a simple vista a los 120 minutos de las NPs de ZnO al 5%, demostrando una reducción significativa en la intensidad del color. Sin embargo, las concentraciones al 1% y 3% muestran una degradación lenta, por lo que, se tiene una menor actividad catalítica [72].



Figura 17. Alícuotas de la degradación de azul de metileno con NPs de ZnO al (a)1%, (b) 3% y (c) 5%.

El análisis del colorante azul de metileno se llevó a cabo en los rangos de 400-800 nm [73], con un pico visible de absorción en el rango de longitud de 650-680nm [74]. En la Figura 18 (a), (b) y (c), se muestran los espectros de absorción del azul de metileno expuestos a luz UV durante los 180 minutos. La etiqueta -30 es considerado el colorante sin exposición, debido a que estuvo 30 minutos en agitación a oscuridad como un periodo de adsorción/desorción. Posteriormente la primera toma de muestra comenzó a los 0 minutos, terminando a los 180 minutos. Dentro de la Figura 18 (a) y (b), se observa donde el pico de absorción disminuye

gradualmente, mientras que en la Figura 18 (c), este pico desaparece, indicando una degradación del colorante.

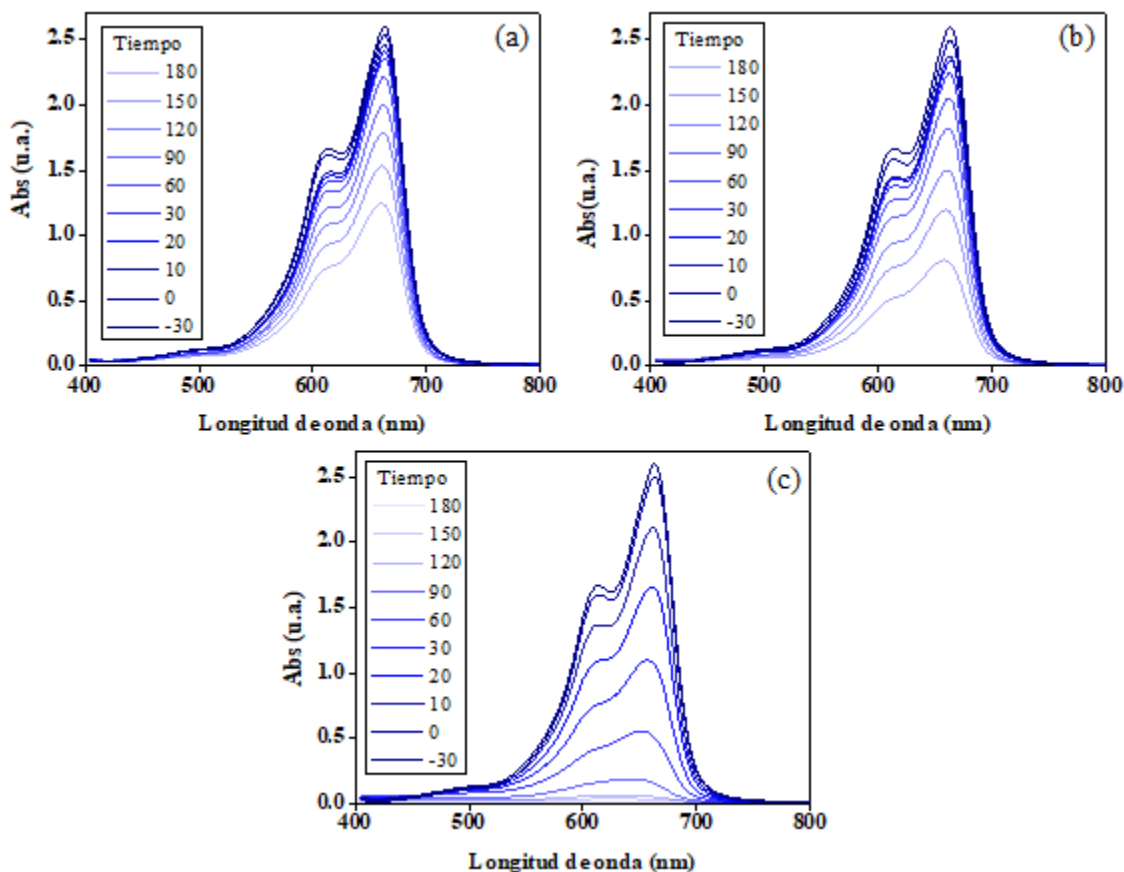


Figura 18. Espectros de absorbancia de MB de NPs ZnO a (a) 1%, (b) 3% y (c) 5%.

En la tabla 4 y Figura 19 se muestran los porcentajes de degradación conforme se realizó el estudio catalítico y los gráficos comparativos de los tres materiales en la degradación de MB. En todos los casos la concentración del colorante es del 0%, debido que aún no ha sido expuesto a la luz ultravioleta. Al paso del tiempo, dentro de la concentración al 1% y 3% p/v, a los 180 minutos se obtuvo una degradación del 52.33% y del 69.55%, respectivamente. Por otro lado, en para las nanopartículas de ZnO con una concentración del 5% p/v de extracto, se obtuvo una degradación casi total ~99.63% a los 180 minutos de estudio, logrando la mejor degradación.

Tabla 4. Porcentajes de degradación de fotocatalisis de azul de metileno con ZnO al 1%, 3% y 5%.

Tiempo	1%	3%	5%
-30	0%	0%	0%
0	2.20%	3.94%	3.58%
10	5.16%	8.65%	18.83%
20	7.23%	9.93%	36.39%
30	9.29%	13.74%	58.99%
60	14.71%	21.12%	80.52%
90	23.03%	30.05%	94.30%
120	31.43%	42.74%	98.21%
150	41.17%	54.55%	99.10%
180	52.33%	69.55%	99.63%

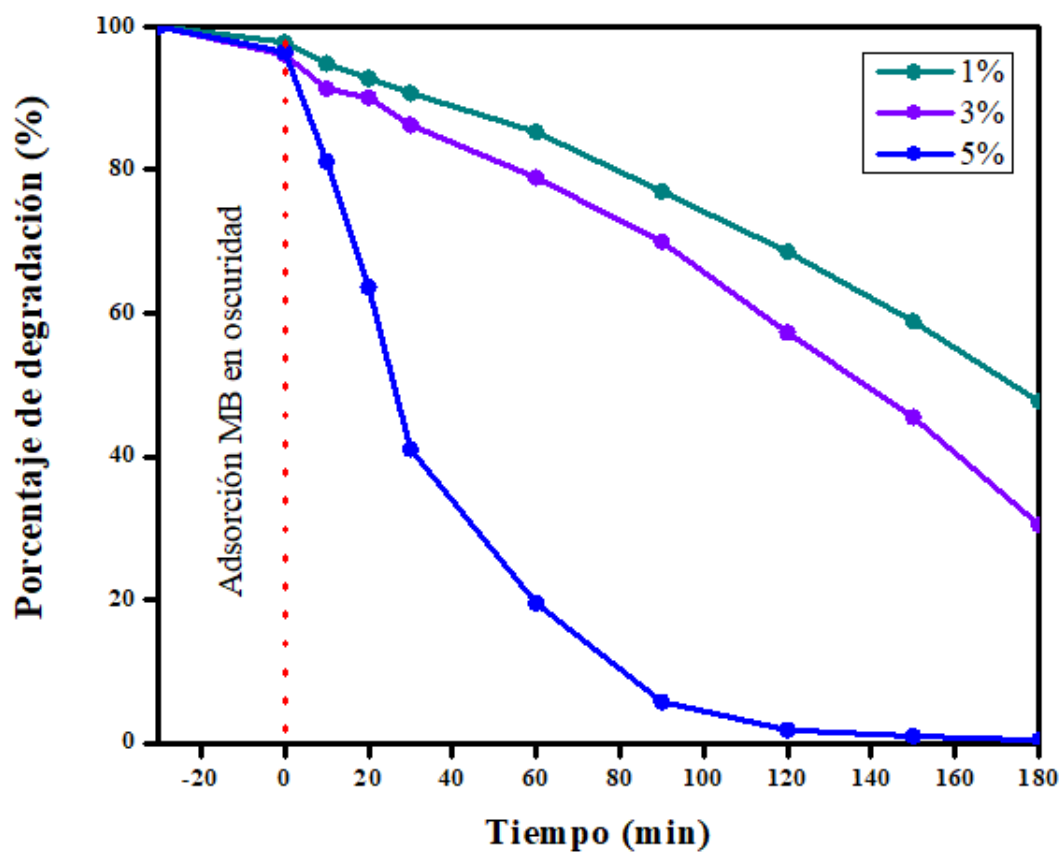


Figura 19. Porcentaje de degradación de MB a diversas concentraciones.

6.3.2 Degradación de naranja de metilo

La degradación de naranja de metilo en presencia de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) redujo la concentración del colorante a lo largo de la toma de alícuotas en intervalos de 0, 10, 20, 30, 60, 120, 150 y 180 minutos. En la Figura 20, se observa la degradación a simple vista de las NPs de ZnO, demostrando una reducción significativa en la intensidad del color, la cual se llevó a cabo de forma paulatina.

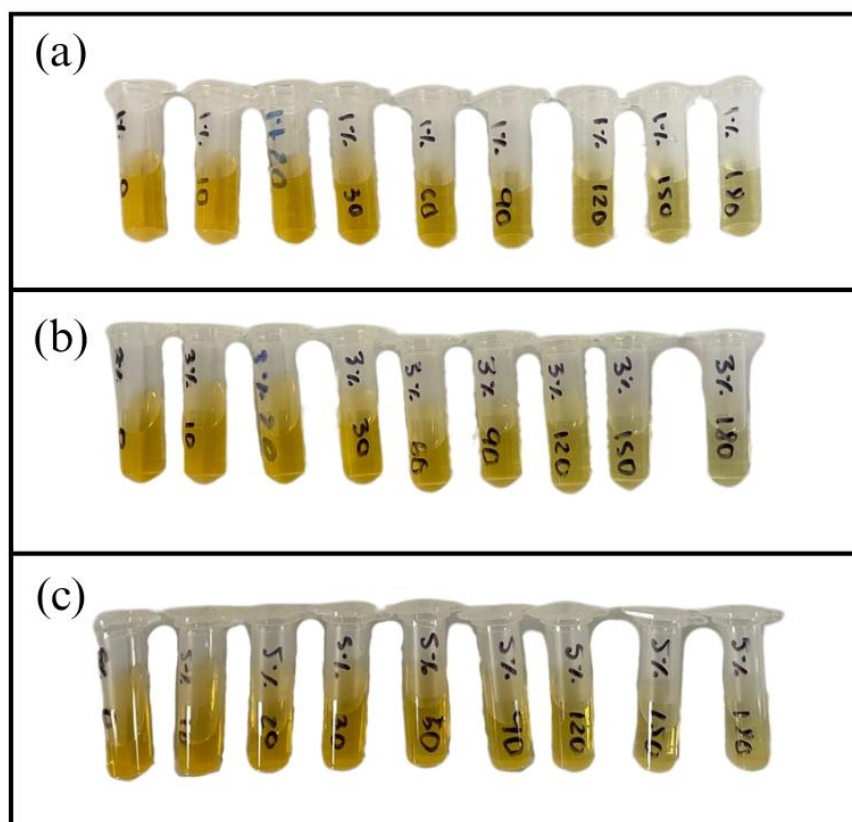


Figura 20. Alícuotas de la degradación de naranja de metilo con NPs de ZnO al (a) 1%, (b) 3% y (c) 5%.

El análisis del colorante naranja de metilo se llevó a cabo en los rangos de 200-600 nm [75]. Con un pico visible de absorción en el rango de longitud de onda de 450-470 nm. En la Figura 21 (a), (b) y (c), los espectros de absorción de naranja de metilo expuesto a luz UV durante los 180 minutos. La etiqueta -30 es considerado el colorante sin exposición, debido a que estuvo 30 minutos en agitación a oscuridad permitiendo el proceso de equilibrio entre las

nanopartículas y el colorante. Posteriormente, la primera toma de muestra comenzó a los 0 minutos, terminando a los 180. Dentro de la Figura 21 (a), (b) y (c), se observa donde el pico de absorción entre los 450-470nm disminuye, lo cual indica una degradación del colorante [76].

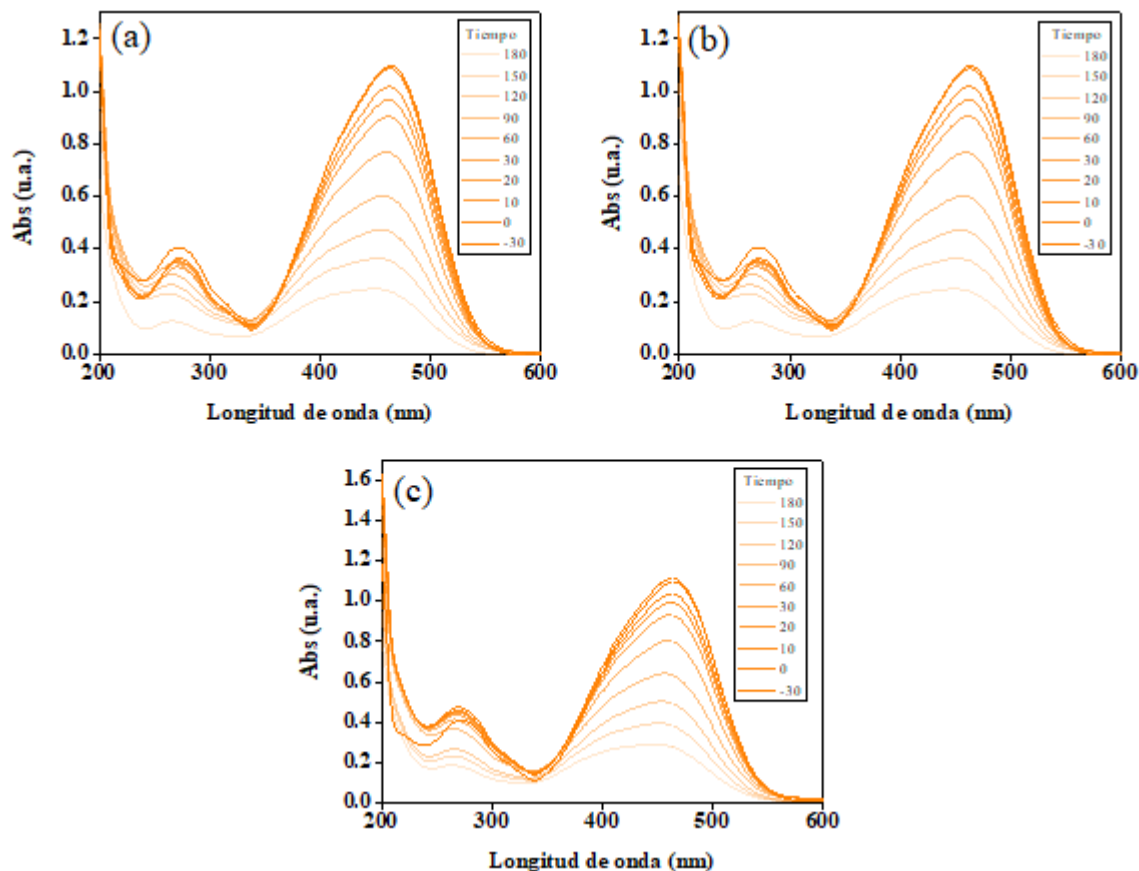


Figura 21. Espectros de absorbancia de MO de NPs ZnO a (a) 1%, (b) 3% y (c) 5%.

En la tabla 5 se muestran los porcentajes de degradación de MO utilizando nanopartículas de ZnO. Se observó una mayor degradación para las NPs de ZnO al 1% y 3% p/v, en comparación con las ZnO 5% p/v. Una de las posibles causas de esto es la aglomeración de nanopartículas, disminuyendo la eficiencia del proceso [77]. Por otro lado, el bajo porcentaje de degradación comparado con la degradación de MB puede atribuirse a una estructura más compleja del MO, lo cual no permite una mayor degradación [78].

Tabla 5. Porcentajes de degradación de fotocatalisis de naranja de metilo con ZnO al 1%, 3% y 5%.

Tiempo	1%	3%	5%
-30	0%	0%	0%
0	1.00%	1.00%	1.62%
10	7.26%	7.26%	5.48%
20	11.94%	11.94%	9.56%
30	17.73%	17.73%	15.21%
60	30.30%	30.30%	27.19%
90	45.70%	45.70%	42.36%
120	57.73%	57.73%	55.28%
150	67.75%	67.75%	65.34%
180	78.37%	78.37%	75%

Con los resultados obtenidos en la tabla 5 se presenta la siguiente Figura 22, mostrando visualmente la misma eficacia en las concentraciones al 1% y 3%, contraste con la concentración al 5%.

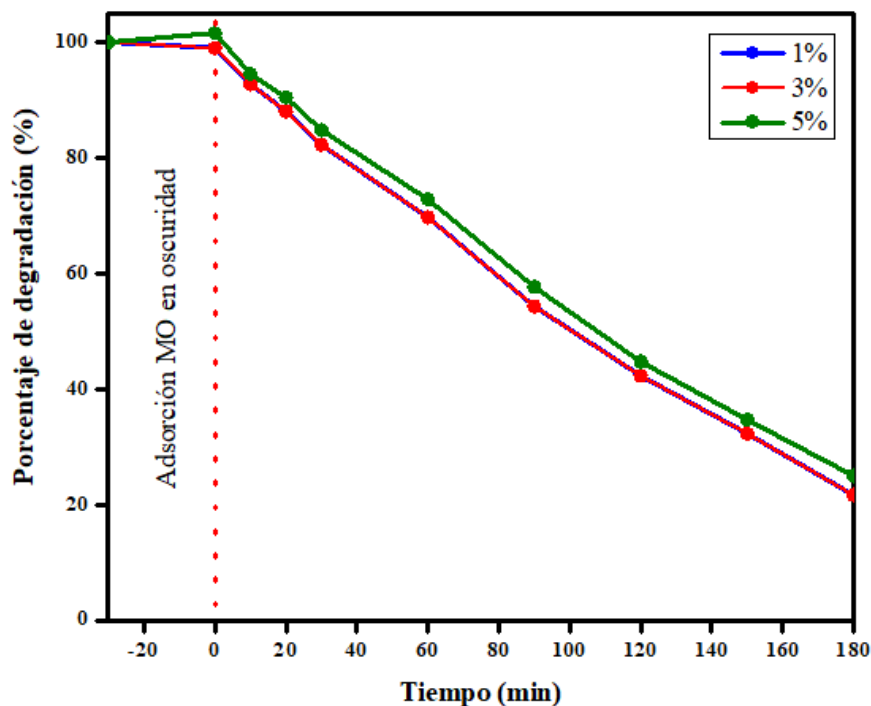


Figura 22. Porcentaje de degradación de MO a diversas concentraciones.

6.3.3 Degradación de rodamina B

La degradación de rodamina B en presencia de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) redujo la concentración del colorante a lo largo de la toma de alícuotas en intervalos de 0, 10, 20, 30, 60, 120, 150 y 180 minutos. En la Figura 23, se observa la degradación de las NPs de ZnO, demostrando una reducción significativa del color, la cual se llevó a cabo constante durante el proceso fotocatalítico.

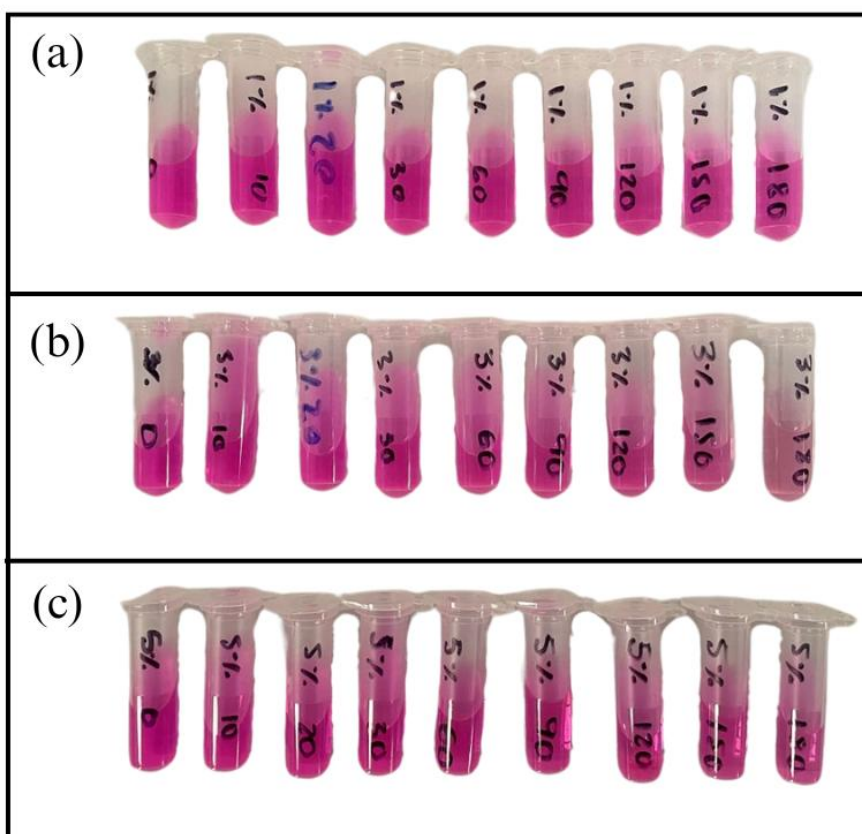


Figura 23. Alícuotas de la degradación de Rodamina B con NPs de ZnO al (a)1%, (b) 3% y (c) 5%.

El análisis del colorante rodamina B se llevó a cabo en los rangos de 300-700nm. Con un de absorción máxima centrada de longitud de 554 [79]. En la Figura 24 (a), (b) y (c), los espectros de absorción de rodamina B expuesto a luz UV durante los 180 minutos. La etiqueta -30 es considerado el colorante sin exposición, debido a que estuvo 30 minutos en agitación a oscuridad, permitiendo el equilibrio entre la absorción de RhB sobre la superficie del material [80]. Posteriormente, la primera toma de muestra comenzó a los 0 minutos,

terminando a los 180. Dentro de la Figura 24 (a), (b) y (c), se observa donde el pico de absorción disminuye lo cual indica una degradación del colorante, en un ataque directo al anillo aromático de radicales $\text{OH}\cdot$. Una vez que la de-etilación se lleva a cabo por completo la molécula orgánica del colorante produce una decoloración completa [79].

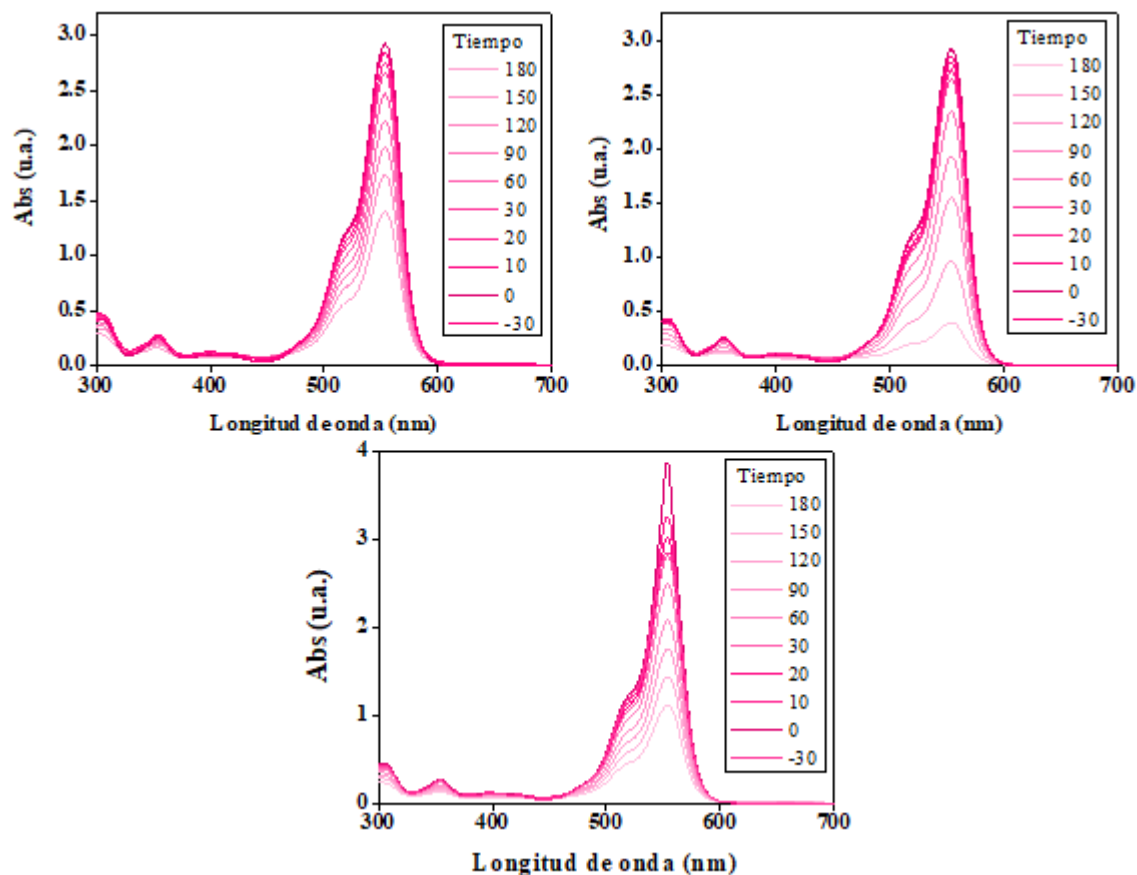


Figura 24. Espectros de absorbancia de RhB de NPs ZnO a (a) 1%, (b) 3% y (c) 5%.

En la tabla 6, se muestran los porcentajes de degradación de RhB utilizando los productos de síntesis. Además, en la concentración al 5% tiene un comportamiento más lento en comparación con la concentración 3%. Donde las nanopartículas sintetizadas con la concentración de ZnO al 3% tiene una degradación del 86.01%, seguido del ZnO al 5% con un porcentaje de degradación de RhB del 60.81%, y por último ZnO al 1% con el menor porcentaje de degradación del 50.93%. En este caso, no existe una relación de la concentración del extracto utilizado con respecto a los resultados de degradación [81].

Tabla 6. Porcentajes de degradación de fotocatalisis de rodamina B con ZnO al 1%, 3% y 5%.

Tiempo	1%	3%	5%
-30	0%	0%	0%
0	-2.79%	-2.79%	-35.73%
10	-0.01%	1.74%	-13.85%
20	3.41%	4.18%	-6.04%
30	6.81%	6.90%	0.86%
60	13.2%	17.63%	12.56%
90	22.22%	32.12%	27.02%
120	30.38%	45.45%	38.42%
150	39.26%	66.18%	49.64%
180	50.93%	86.01%	60.81%

Con los resultados obtenidos en la tabla 6 se presenta la siguiente Figura 25, mostrando visualmente que la de mayor eficacia es la concentración al 3%, mientras que la de 5% tiene una decadencia mayor a la de 1%, al finalizar los 180 minutos.

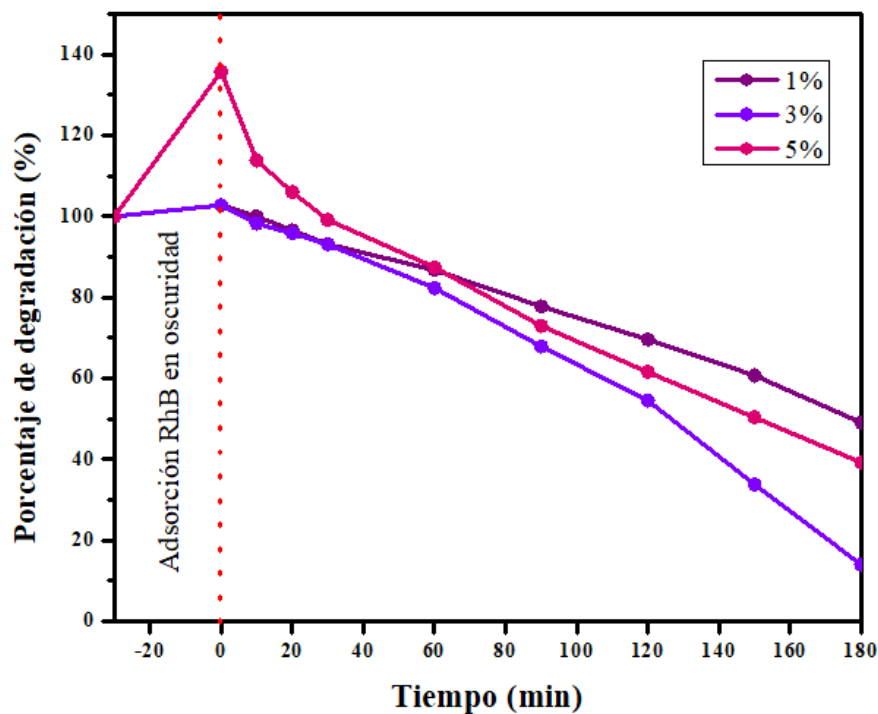


Figura 25. Porcentaje de degradación de RhB a diversas concentraciones.

6.4 Mecanismo de degradación

En la Figura 26 se tiene la propuesta de mecanismo de degradación de los colorantes analizados: rodamina B (RhB), azul de metileno (MB) y naranja de metilo (MO), en orden descendente. Una vez que comienza la adsorción del colorante en la superficie de las NPs, se irradian con luz ultravioleta [67]. Los electrones de la banda de valencia (B.V. en color rojo) se excitan y pasan a la banda de conducción (B.C. en azul), produciendo un hueco en la banda de valencia [82]. Con ello, se generan reacciones redox sobre la superficie, ayudando a la producción de radicales hidroxilo ($\text{HO}\cdot$) e iones de superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), obteniendo como producto dióxido de carbono y agua [83].

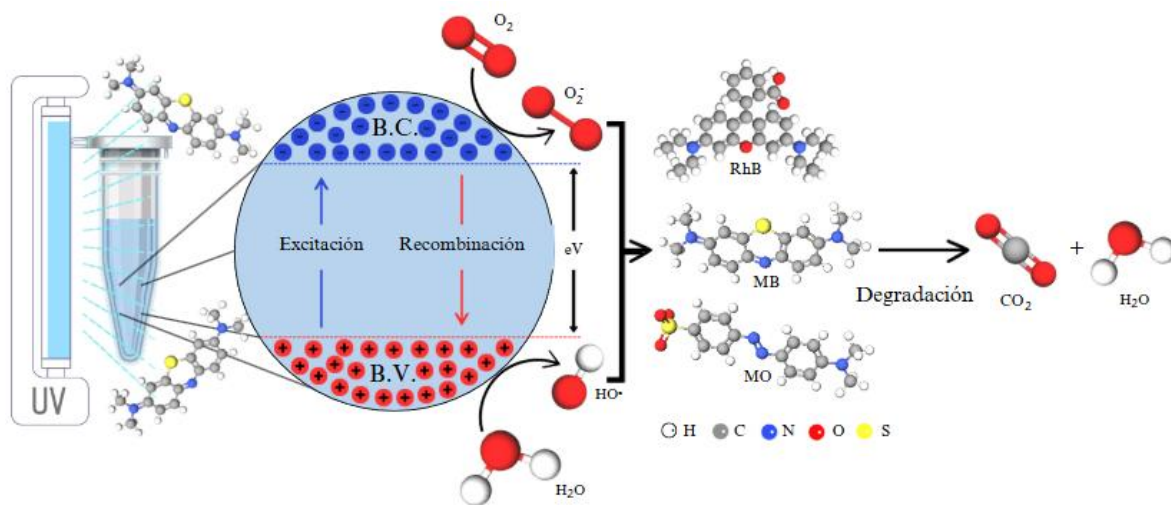


Figura 26. Propuesta de mecanismo de degradación de los colorantes.

7. Conclusión

La presente investigación demuestra la viabilidad de la síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) utilizando extractos naturales de *Ephedra californica* como agentes reductores y estabilizantes. Además, se evidenció que la concentración del extracto vegetal tiene un impacto significativo en el rendimiento de la síntesis y en la eficiencia fotocatalítica. Las nanopartículas obtenidas fueron efectivas en la degradación de tres colorantes orgánicos: azul de metileno, naranja de metilo y rodamina B. La mejor eficiencia se observó en el tratamiento del azul de metileno con ZnO sintetizado al 5%, alcanzando una degradación del 99.63%. Sin embargo, en el caso del naranja de metilo y la rodamina B, la eficiencia fue

mayor con concentraciones intermedias, probablemente debido a la menor aglomeración de partículas y mejor aprovechamiento de los sitios activos.

Estos resultados destacan el potencial del uso de métodos sostenibles para la producción de nanomateriales con aplicaciones ambientales. Asimismo, se enfatiza la importancia de optimizar las condiciones de síntesis para maximizar la actividad fotocatalítica. En conjunto, este estudio ofrece una alternativa ecológica y eficiente para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes.

8. Referencias

- [1] M. San Andrés, N. Sancho, y J. M. De la Roja, «Alquimia: Pigmentos y colorantes históricos», vol. 106, n.º 1, pp. 58-65, 2012.
- [2] A. Cortazar-Martínez, C. A. González-Ramírez, C. Coronel-Olivares, J. A. Escalante-Lozada, J. Castro-Rosas, y J. R. Villagómez-Ibarra, «Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil», *Univ. Cienc.*, vol. 28, n.º 2, pp. 187-199, ago. 2012.
- [3] M. Cardona, J. Osorio, y J. Quintero, «Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos», *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 48, n.º 1, 2009.
- [4] D. López-Rodríguez, B. Micó-Vicent, M. Á. Bonet-Aracil, y E. Bou-Belda, «Recuperación y reutilización de colorantes textiles».
- [5] M. P. Llanos Encalada y Á. D. Salazar Cueva2, «Efectos post pandemia en el desempeño del sector industrial textil ecuatoriano de ropa liviana: periodo 2020-2021», *ECA Sinerg.*, vol. 14, n.º 3, pp. 129-141, sep. 2023, doi: 10.33936/ecasinergia.v14i3.5665.
- [6] E. Montiel, J. Vergara, y C. Torres, «Degradación de colorantes en aguas residuales mediante oxidación», *Inven. Génesis Cult. Univ. En Morelos*, vol. 31, n.º 13, pp. 35-42, 2018.
- [7] K. D. Santos, D. M. E. Á. Álvarez, M. E. Crivello, S. N. Mendieta, y D. O. Labuckas, «Tratamiento de efluentes de aceitunas verdes empleando materiales catalíticos-adsorbentes: diseño y escalado», *AJEA Actas Jorn. Even. Académicos UTN*, n.º 15, Art. n.º 15, oct. 2022, doi: 10.33414/ajea.1099.2022.
- [8] J. A. Villegas, «Biosíntesis de nanopartículas semiconductoras de óxido de zinc para la degradación de contaminantes del agua», Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 2021.
- [9] E. GilPavas, J. Medina, I. Dobrosz-Gómez, y M.-Á. Gómez, «Optimización de los Costos de Operación del Proceso de Electro-oxidación para una Planta de Tratamiento de Aguas Mediante Análisis Estadístico de Superficie de Respuesta», *Inf. Tecnológica*, vol. 27, n.º 4, pp. 73-82, 2016, doi: 10.4067/S0718-07642016000400008.
- [10] M. Gómez-Garzón, «Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde», *Rev. Repert. Med. Cir.*, vol. 27, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2018, doi: 10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191.
- [11] J. Luna Herrera, D. Pérez Martínez, V. M. Barradas Hernández, y R. Zenteno Cuevas, «Nanopartículas como transportadores de fármacos: una herramienta prometedora contra la tuberculosis», *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Pública*, vol. 38, n.º 1, 2008.
- [12] A. P. Galindo-Guzmán *et al.*, «Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*», *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 13, n.º SPE28, pp. 299-308, oct. 2022, doi: 10.29312/remexca.v13i28.3284.
- [13] P. A. Aquino, «Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por el método de precipitación para su aplicación en pintura esmalte comercial», Licenciatura, Universidad Nacional de Lima, Lima, 2016.
- [14] M. Rodríguez, R. Hoffmann, G. Amaya, y P. A. Luque, «Síntesis verde de materiales nanoestructurados de ZnO en la degradación de contaminantes orgánicos por

- medio de la fotocatalisis heterogénea», *Rev. Cienc. Tecnológicas*, vol. 4, n.º 4, pp. 299-313, 2021.
- [15] R. Castelo, «Síntesis de nanopartículas de sulfuro de zinc para la fabricación de nanofibras y su uso en la degradación de azul de metileno», Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, 2024. [En línea]. Disponible en: sitorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/4139/1/tesis_Rodrigo%20Castelo%20Ibarra_11%20ago%202024.pdf
- [16] «Síntesis verde de nanocompositos óxido metálico-grafeno utilizando extracto de *Rubus glaucus* para la degradación fotocatalítica de colorantes sintéticos en medio acu. pdf». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.uas.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/DGB_UAS/452/S%3%adntesis%20verde%20de%20nanocompositos%20%3%b3xido%20met%3%a1lico-grafeno%20utilizando%20extracto%20de%20Rubus%20glaucus%20para%20la%20degradaci%3%b3n%20fotocatal%3%adtica%20de%20colorantes%20sint%3%a9ticos%20en%20medio%20acu.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] N. E. Samboni Ruiz, Y. Carvajal Escobar, y J. C. Escobar, «Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua», *Ing. E Investig.*, vol. 27, n.º 3, pp. 172-181, dic. 2007.
- [18] M. Rodríguez, «La hidrosfera. El ciclo del agua. La contaminación del agua. Métodos de análisis y depuración. El problema de la escasez del agua», 2009, p. 26.
- [19] S. Sharma y A. Bhattacharya, «Drinking water contamination and treatment techniques», *Appl. Water Sci.*, vol. 7, n.º 3, pp. 1043-1067, jun. 2017, doi: 10.1007/s13201-016-0455-7.
- [20] C. F. Pardo, «Water and Human Development», *Ars Medica Rev. Humanidades*, vol. 1, n.º 1, pp. 12-30, 2004.
- [21] R. S. Juan, «LA QUIMICA DEL COLOR EN LOS ALIMENTOS», 2013.
- [22] A. Russell, *Principios básicos del diseño textil*. Editorial GG, 2013.
- [23] G. Soto, «Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas de estructuras tipo espinela por plasma de microondas para degradación de colorante tipo AZO», Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 2021. Accedido: 17 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1U_LJcP6Jqm0Q1UsC84OJaztKMJPzL_W5/view?usp=embed_facebook
- [24] A. Tkaczyk, K. Mitrowska, y A. Posyniak, «Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 717, p. 137222, may 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137222.
- [25] D. Ormart, «Síntesis de nanopartículas magnéticas de ferrita de manganeso recubiertas con ZnO para la degradación fotocatalítica del colorante rojo amaranto», Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 2023. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1M5iiCbqcEongX1ca-dMW1R_1TA7UUGO-/view?usp=embed_facebook
- [26] J. McMurry, *Química Orgánica*, 7.ª ed. México: Cengage Learning, 2008. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/12LTtyZssCbJ_BngJpksGwglSdqR1PLqx/view

- [27] P. Zaruma, J. Proal, I. Chaires, y H. Salas, «Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión», *Rev. Fac. Cienc. Quím.*, n.º 19, pp. 38-47, 2018.
- [28] A. La Rosa Toro y M. Ponce Vargas, «Evaluación de electrodos de espinela de cobalto y de dióxido de plomo en la oxidación electroquímica de colorantes azo», *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 73, n.º 4, pp. 183-196, oct. 2007.
- [29] E. Forgacs, T. Cserhádi, y G. Oros, «Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review», *Environ. Int.*, vol. 30, n.º 7, pp. 953-971, sep. 2004, doi: 10.1016/j.envint.2004.02.001.
- [30] A. A. Valenzuela-Padilla, J. Torres-Pérez, A. A. Valenzuela-Padilla, y J. Torres-Pérez, «Remoción de colorantes azóicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez», *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 21, n.º 3, sep. 2020, doi: 10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.027.
- [31] M. F. Garrote, «Uso de microorganismos como biorremediadores de efluentes textiles contaminados por colorantes azoicos», *Universidad de Coruña*, 2020.
- [32] H. Mansilla, C. Lizama, A. Gutarra, y J. Rodríguez, «TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA Y TEXTIL», *ResearchGate*, pp. 285-294, 2001.
- [33] T. O'Hara y J. Harley, «Marine Vertebrates as Sentinels of Marine Ecosystems Health. Links to Human Wellbeing», *Bioacumulación y transferencia de metales y contaminantes emergentes a través de las cadenas tróficas marinas*, pp. 122-133, 2018.
- [34] L. Churata, «Degradación del colorante azoico textil naranja II por el método de fotocatalisis heterogénea», Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/64776e81-a60b-413b-9d6f-9a2057a91d4c/content>
- [35] L. Castro-Peña y J. E. Durán-Herrera, «Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada», *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 27, n.º 2, p. 40, may 2014, doi: 10.18845/tm.v27i2.1807.
- [36] L. F. G. Giraldo, M. L. H. Ángel, G. A. P. Mesa, A. R. Restrepo, y J. A. S. Palacio, «Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis», *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 2, n.º 1, pp. 15-18, 2005.
- [37] S. E. Pabón *et al.*, «Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión», *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 14, n.º 27, pp. 9-18, jun. 2020, doi: 10.31908/19098367.0001.
- [38] C. J. Ferrusquía-García, «Evaluación de la degradación de metil paratión en solución usando fotocatalisis heterogénea», *Rev. Latinoam. Recur. Nat.*, vol. 4, n.º 2, pp. 285-290, jul. 2008.
- [39] A. Quintero, C. Vargas, y J. Sanabria, «Evaluación de un sistema de fotocatalisis heterogénea y pasteurización para desinfección de aguas lluvias», *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 28, n.º 1, pp. 117-134, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2350>.
- [40] L. C. Calle y M. E. Londoño, «Síntesis verde de nanopartículas de plata mediante el uso del ajo (*Allium sativum*)», *Rev. Soluciones Postgrado*, vol. 6, n.º 12, pp. 129-140, jun. 2014.
- [41] P. H. Díaz, «Síntesis verde de nanopartículas con propiedades antimicrobianas», Licenciatura, Tecnológico Nacional de México, Tianguistenco, Estado de México,

2023. [En línea]. Disponible en:
<http://51.143.95.221/bitstream/TecNM/6023/1/TESIS%20-%20Pablo%20Hern%C3%A1ndez%20D%C3%ADaz.pdf>
- [42] H. Bakdi, N. Lenchi, S. Kebbouche Gana, y N. Eddine, «Obtention of green-synthesized silver nanoparticles and evaluation of its antimicrobial and antifungal activity against skin pathogenic microorganisms», *Biotecnol. Apl.*, vol. 39, n.º 4, pp. 4201-4210, 2022.
- [43] R. Álvarez-Chimal, J. Á. Arenas-Alatorre, R. Álvarez-Chimal, y J. Á. Arenas-Alatorre, «Green Synthesis of Nanoparticles: A Biological Approach», en *Green Chemistry for Environmental Sustainability - Prevention-Assurance-Sustainability (P-A-S) Approach*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.1002203.
- [44] U. Manzoor, F. Tuz Zahra, S. Rafique, M. T. Moin, y M. Mujahid, «Effect of Synthesis Temperature, Nucleation Time, and Postsynthesis Heat Treatment of ZnO Nanoparticles and Its Sensing Properties», *J. Nanomater.*, vol. 2015, n.º 1, p. 189058, 2015, doi: 10.1155/2015/189058.
- [45] J. Izáziga, «Propiedades estructurales y ópticas de nanopartículas de ZnO sintetizadas con diferentes concentraciones de extracto alcohólico de semilla de *Caesalpinia spinosa*», Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, 2023.
- [46] O. Ochoa Vera, «Síntesis y Simulación Molecular de un Nanosistema de Puntos Cuánticos de ZnO Funcionalizados con Teofilina y su Evaluación Hepatoprotectora.», *Nanotecnología.*, nov. 2024, Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://200.57.56.70:8080/xmlui/handle/231104/6002>
- [47] B. Méndez-Argüello *et al.*, «Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc», *Nova Sci.*, vol. 8, n.º 17, pp. 140-156, 2016.
- [48] J. Pumacayo *et al.*, «Estudio de la interacción química y bactericida de las nanopartículas de óxido de zinc frente a *Staphylococcus aureus*», *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geográficas*, vol. 24, pp. 175-180, dic. 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i48.21771.
- [49] A. G. Vega-Poot, G. Rodríguez-Gattorno, O. E. Soberanis-Domínguez, R. T. Patiño-Díaz, M. Espinosa-Pesqueira, y G. Oskam, «The nucleation kinetics of ZnO nanoparticles from ZnCl₂ in ethanol solutions», *Nanoscale*, vol. 2, n.º 12, pp. 2710-2717, 2010, doi: 10.1039/C0NR00439A.
- [50] J. Hunziker y L. Novara, «EPHEDRACEAE», vol. 5, n.º 6, mayo de 2012. Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.natura.unsa.edu.ar/354/1/EPHEDRACEAE.pdf>
- [51] L. Villanueva-Almanza, «REVISIÓN TAXONÓMICA Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE EPHEDRA (EPHEDRACEAE) EN MÉXICO», *Acta Bot. Mex.*, 2011.
- [52] Y.-L. Zhao, Y.-J. Fan, y Y.-C. Yang, «Characteristic and phylogenetic analyses of chloroplast genome for *Ephedra monosperma* (Ephedraceae), an important medicinal species», *Mitochondrial DNA Part B*, vol. 6, n.º 2, pp. 483-484, feb. 2021, doi: 10.1080/23802359.2021.1872440.
- [53] I. Guenaou, I. Nait Irahah, A. Errami, F. A. Lahlou, F. Hmimid, y N. Bourhim, «Bioactive Compounds from *Ephedra fragilis*: Extraction Optimization, Chemical Characterization, Antioxidant and AntiGlycation Activities», *Molecules*, vol. 26, n.º 19, Art. n.º 19, ene. 2021, doi: 10.3390/molecules26195998.

- [54] S. Tang *et al.*, «Ephedrae Herba: A Review of Its Phytochemistry, Pharmacology, Clinical Application, and Alkaloid Toxicity», *Molecules*, vol. 28, n.º 2, Art. n.º 2, ene. 2023, doi: 10.3390/molecules28020663.
- [55] J. Braun, M. Westphal, y C. J. Lortie, «The shrub *Ephedra californica* facilitates arthropod communities along a regional desert climatic gradient», *Ecosphere*, vol. 12, n.º 9, p. e03760, 2021, doi: 10.1002/ecs2.3760.
- [56] N. Gaynor, «Síntesis verde de nanopartículas semiconductoras de ZnO utilizando como extracto *Casimiroa edulis* para degradación de colorantes orgánicos», Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 2024.
- [57] N. T. K. Thanh, N. Maclean, y S. Mahiddine, «Mechanisms of Nucleation and Growth of Nanoparticles in Solution», *Chem. Rev.*, vol. 114, n.º 15, pp. 7610-7630, ago. 2014, doi: 10.1021/cr400544s.
- [58] D. Santana, «Síntesis de nanopartículas semiconductoras de ZnO: Estudio del efecto del extracto en las propiedades ópticas, estructurales y sus aplicaciones.», Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 2023. Accedido: 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/0127a918-8ca9-42cc-8244-e0ff0cce6c7d/content>
- [59] B. Fazeli-Nasab, M. Solouki, y A. Sobhanizadeh, «Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using an *Ephedra sinica* Herb Extract with Antibacterial Properties», vol. 10, n.º 1, pp. 30-47, 2021.
- [60] C. A. Soto-Robles *et al.*, «Study on the effect of the concentration of *Hibiscus sabdariffa* extract on the green synthesis of ZnO nanoparticles», *Results Phys.*, vol. 15, p. 102807, dic. 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102807.
- [61] O. J. Nava *et al.*, «Influence of *Camellia sinensis* extract on Zinc Oxide nanoparticle green synthesis», *J. Mol. Struct.*, vol. 1134, pp. 121-125, abr. 2017, doi: 10.1016/j.molstruc.2016.12.069.
- [62] M. R. Mashar Askar, «Bacterial responses to *Ephedra aphylla* stem extract and green-synthesized Ag-TiO₂ and Ag-SeO₂ core/shell nanocomposites: unveiling antimicrobial and antioxidant properties», *RSC Adv.*, vol. 15, n.º 17, pp. 13152-13171, 2025, doi: 10.1039/D5RA00936G.
- [63] N. Naderi, A. Mohammadgholi, y N. Asghari Moghaddam, «Biosynthesis of Copper Oxide-Silver Nanoparticles from *Ephedra Intermedia* Extract and Study of Anticancer Effects in HepG2 Cell Line: Apoptosis-Related Genes Analysis and Nitric Oxide Level Investigations», *Int. J. Mol. Cell. Med.*, vol. 13, n.º 3, pp. 303-324, 2024, doi: 10.22088/IJMCM.BUMS.13.3.303.
- [64] Dousari, Satarzadeh, y Amirheidari, «Medicinal and Therapeutic Properties of *Ephedra*», *Revista Brasileira de Farmacognosia*, vol. 32, pp. 883-899, 2022.
- [65] D. C. Bouttier-Figueroa, R. E. Robles-Zepeda, C. J. González-Pérez, H. del C. Santacruz-Ortega, y J. L. Pliego-Martínez, «Síntesis Verde de Nanopartículas de ZnO: Aspectos Generales y Actividades Biológicas», *Contactos Rev. Educ. En Cienc. E Ing.*, n.º 134, Art. n.º 134, oct. 2024.
- [66] P. A. Luque, H. E. Garrafa-Gálvez, C. A. García-Maró, y C. A. Soto-Robles, «Study of the optical properties of ZnO semiconductor nanoparticles using *Origanum vulgare* and its effect in Rhodamine B degradation», *Optik*, vol. 258, p. 168937, may 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.168937.

- [67] P. A. Luque-Morales *et al.*, «ZnO Semiconductor Nanoparticles and Their Application in Photocatalytic Degradation of Various Organic Dyes», *Materials*, vol. 14, n.º 24, Art. n.º 24, ene. 2021, doi: 10.3390/ma14247537.
- [68] A. Villegas-Fuentes, H. E. Garrafa-Gálvez, R. V. Quevedo-Robles, M. Luque-Morales, A. R. Vilchis-Nestor, y P. A. Luque, «Síntesis de nanopartículas semiconductoras de ZnO utilizando extracto de *Citrus microcarpa* y la influencia de la concentración en sus propiedades ópticas», *J. Mol. Struct.*, vol. 1281, p. 135067, jun. 2023, doi: 10.1016/j.molstruc.2023.135067.
- [69] A. Villegas-Fuentes, A. Rosillo-de la Torre, A. R. Vilchis-Nestor, y P. A. Luque, «Improvement of the optical, photocatalytic and antibacterial properties of ZnO semiconductor nanoparticles using different pepper aqueous extracts», *Chemosphere*, vol. 339, p. 139577, oct. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139577.
- [70] M. Khan, K. Saeed, A. Gul, A. Khan, A. Zada, y R. Khan, «Barium doped ZnO nanorods fabricated via Piper nigrum leaf extract: A green route for enhanced photocatalytic efficiency.», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, n.º 31, pp. 4621-4635, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29351-2>.
- [71] J. A. Villegas-Fuentes, H. E. Garrafa-Gálvez, R. V. Quevedo-Robles, M. Luque-Morales, A. R. Vilchis-Nestor, y P. A. Luque, «Synthesis of semiconductor ZnO nanoparticles using Citrus microcarpa extract and the influence of concentration on their optical properties.», *J. Mol. Struct.*, p. 1281, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135067>.
- [72] J. Pérez, «Síntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO mediante extracto de Ruta L. (Ruda) y su aplicación fotocatalítica en la degradación de azul de metileno», Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, H. Puebla de Z., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/03cf18c4-7840-40ac-866f-fed1c6b6355b/content>
- [73] C. E. Diaz-Uribe *et al.*, «Degradación de azul de metileno bajo irradiación visible sobre electrodos de TiO₂ sensibilizados con pigmentos de clorofila extraídos de la planta de Spinacia Oleracea», *Prospectiva*, vol. 16, n.º 2, pp. 7-12, dic. 2018, doi: 10.15665/rp.v16i2.1455.
- [74] A. Cervantes, A. Hernández, M. Bautista, y E. Jasso, «Estudio por espectrofotometría UV-Vis de la hetero-asociación de la teofilina con el azul de metileno», 2019, Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://congresos.cio.mx/8_enc_mujer/FE%20DE%20ERRATAS/S3-BYQ19.pdf
- [75] L. Miranda, «Combinación de ZnO o TiO₂ con nanopartículas de oro para la remoción del colorante Naranja de Metilo del agua», Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, 2022. Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3694/3/tesis_Luis%20Gilberto%20Miranda%20Morales_31%20marzo%202022.pdf
- [76] J. M. Hernández, L. A. García, R. García, A. Cueto, y J. A. Carmona, «Estudio cinético de la fotodegradación del naranja de metilo en presencia de TiO₂: Efecto de la fuente de radiación U.V., concentración del azo-colorante y del catakizador.», *Av. En Cienc. E Ing.*, vol. 3, n.º 2, pp. 25-34, 2012.
- [77] D. Nva, G. Cruz Cerro, J. Rimaycuna Ramírez, J. L. Solís, R. Keiski, y M. M. Gómez, «ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO EN MEDIO ACUOSO

EMPLEANDO CARBONES ACTIVADOS Y CARBONES ACTIVADOS MODIFICADOS CON NANOPARTÍCULAS DE ZnO», *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 82, n.º 1, pp. 61-71, mar. 2016, doi: 10.37761/rsqp.v82i1.52.

- [78] J. D. M. Marin, «Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la optimización de la decoloración fotocatalítica con ZnO de agua contaminada con colorante directo», Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2024. [En línea]. Disponible en:
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/12029/T010_46312918_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [79] U. M. G. Pérez, «Síntesis por coprecipitación de BiVO₄ y evaluación de su actividad fotocatalítica en la degradación de rodamina B», *Ingenierías*, vol. XIII, n.º 46, pp. 8-15, 2010.
- [80] M. Juárez, «Síntesis de nanocompositos Au/ZnO: Efecto de la incorporación de NPs de Au en la actividad fotocatalítica», Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, 2014. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/53089d5f-b5cc-47d3-b659-aa1a06c7c927/content>
- [81] P. Gil, «Síntesis, caracterización y estudio de la actividad fotocatalítica de sistemas basados en el óxido de zinc (ZnO)», Licenciatura, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2013.
- [82] P. A. Luque *et al.*, «Mejora de la eficiencia fotocatalítica del SnO₂ Nanopartículas a través de la síntesis verde», *Optik*, vol. 206, p. 164299, mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164299.
- [83] C. A. Soto-Robles *et al.*, «Estudio sobre el efecto de la concentración de extracto de *Hibiscus sabdariffa* en la síntesis verde de nanopartículas de ZnO», *Results Phys.*, vol. 15, p. 102807, dic. 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102807.