

Artículo Científico

Síntesis verde de nanopartículas de ZnO mediante *Lippia alba* y su aplicación en la degradación de contaminantes orgánicos

Castro-Sandoval Mario Mario^{1†}, Montes-Rubio Thalia¹, Garrafa-Gálvez Horacio Edgardo², Orozco-Carmona Victor Manuel³, Perea-Domínguez Xiomara Patricia⁴, Luque-Morales Priscy Alfredo⁵, Chinchillas-Chinchillas Manuel de Jesús⁶

¹Doctorado en Sustentabilidad, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Guasave, C.P. 81048, Guasave Sinaloa, México

²Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México.

³Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), C.P. 31136, Chihuahua, Chihuahua, México.

⁴Departamento de Salud, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Guasave, C.P. 81048, Guasave, Sinaloa, México.

⁵Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

⁶Departamento de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Los Mochis, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México.

Correspondencia: manuel.chinchillas@uadeo.mx - victor.orocho@cimav.edu.mx

Área Temática:
Ciencias Ambientales

Recibido: 03 septiembre 2025

Aceptado: 21 octubre 2025

Publicado: 07 noviembre 2025

Cita: Castro-Sandoval MM, Montes-Rubio T, Garrafa-Gálvez HE, Orozco-Carmona VM, Perea-Domínguez XP, Luque-Morales PA, y Chinchillas-Chinchillas MJ. 2025. Síntesis verde de nanopartículas de ZnO mediante *Lippia alba* y su aplicación en la degradación de contaminantes orgánicos. *Bioc Scientia* 2(1). <https://doi.org/10.63622/RBS.2510>



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Resumen: La contaminación del agua por colorantes orgánicos industriales es un problema que afecta enormemente a las personas, a la flora y a la fauna de los cuerpos de agua. Uno de los métodos más utilizados en los últimos años para disminuir esta problemática es la fotocatalisis. Esta técnica utiliza energía solar o energía UV para provocar reacciones químicas entre nanopartículas (NPs) y las moléculas de los contaminantes. Para sintetizar NPs existen diversos métodos, pero la síntesis verde es una opción muy viable y amigable con el medio ambiente porque reemplaza materiales que son peligrosos o nocivos por opciones naturales como plantas, cáscaras, raíces o microorganismos. En esta investigación se implementó la síntesis verde para obtener NPs de óxido de zinc (ZnO) utilizando la planta *Lippia alba* como agente reductor. Las NPs se caracterizaron mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía de ultravioleta visible (UV-Vis) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Además, las NPs fueron utilizadas para evaluar su efecto en la degradación de cuatro diferentes colorantes orgánicos mediante luz ultravioleta. Los resultados mostraron que las NPs sintetizadas tuvieron un tamaño promedio de 10.1 nm con una forma cuasiesférica, una buena resistencia a la degradación térmica y vibraciones moleculares características del ZnO con compuestos orgánicos funcionalizados. En la degradación fotocatalítica los resultados mostraron una degradación del 98% del azul de metileno (MB) a los 180 min, un 94% del naranja de metilo (MO) a los 180 min, una degradación del 100% del rojo de metileno (MR) a los 100 min y por último una degradación del rojo Congo (CR) del 100% a los 60 min. El uso de *L. alba* permite obtener NPs de ZnO con alta eficiencia en la degradación de contaminantes, lo que favorece su uso a una escala industrial.

Palabras clave: Colorantes orgánicos, fotocatalisis, *Lippia alba*, nanopartículas, síntesis verde.

Abstract: Water pollution by industrial organic dyes is a serious issue that significantly affects humans, as well as the flora and fauna of aquatic ecosystems. One of the most frequently used methods in recent years to address this problem is photocatalysis. This technique employs solar or UV energy to induce chemical reactions between nanoparticles (NPs) and the pollutant molecules. There are various methods for synthesizing NPs, but green synthesis is a highly viable and environmentally friendly alternative, as it replaces hazardous or toxic materials with natural options like plants, peels, roots, or microorganisms. In this study, green synthesis was employed to produce zinc oxide (ZnO) NPs using the plant *Lippia alba* as a reducing agent. The NPs were characterized using transmission electron microscopy (TEM), thermogravimetric analysis (TGA), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Additionally, the NPs were used to evaluate their effectiveness in the degradation of four different organic dyes under ultraviolet light. The results showed that the synthesized NPs had an average size of 10.1 nm and quasi-spherical shape, good resistance to thermal degradation, and exhibited molecular vibrations characteristic of ZnO functionalized with organic compounds. In the photocatalytic degradation tests, 98% of methylene blue (MB) was degraded after 180 minutes, 94% of methyl orange (MO) after 180 minutes, 100% of methylene red (MR) after 100 minutes, and 100% of Congo red (CR) after 60 minutes. The use of *L. alba* enables the production of ZnO NPs with high efficiency in pollutant degradation, supporting their potential application on an industrial scale.

Keywords: Organic dyes, Photocatalysis, *Lippia alba*, Nanoparticles and Green synthesis.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es un problema que está presente en todo el mundo y que ha sido abordado intensivamente por la Organización de las Naciones Unidas. Actualmente, forma parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y se encuentra enmarcado en el ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento (ONU, 2015). A pesar de los esfuerzos mundiales que se han realizado para mitigar este problema, estamos muy lejos de alcanzar esta meta. Existen diferentes fuentes de origen que generan la contaminación del agua, sin embargo, la descarga de aguas residuales de la industria textil representa un grave problema de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas. La contaminación de la industria textil está clasificada dentro de las más contaminantes, debido a su composición química y al volumen que generan (Uddin et al., 2023). La contaminación que generan los colorantes al descargarse en cuerpos de agua naturales representa un severo problema de salud en humanos, animales y el medio ambiente. En las personas, puede causar problemas como irritaciones en la piel, cáncer y problemas intestinales. En el medio ambiente, puede destruir las condiciones vitales de ambientes acuáticos por tener una fuerte tendencia para producir eutrofización (Mehta et al., 2021) y al no permitir que ingrese la luz del sol se entorpece el proceso de fotosíntesis (Mohammad et al., 2023). La eutrofización y la disminución de la fotosíntesis repercute directamente en la cadena trófica y provoca la muerte de peces y otros animales. Por tal motivo, es muy importante aplicar procesos innovadores, amigables con el medio ambiente y económicos para disminuir esta problemática (Ahmed et al., 2023).

Dentro de los procesos utilizados para la degradación de contaminantes orgánicos en el agua, la fotocatálisis es un método adecuado y con proyección. La fotocatálisis ha demostrado ser muy eficiente en la degradación de contaminantes persistentes en el agua, además de ser un método económico y ecológico (Sivaraman et al., 2022). Por otra parte, se ha reportado que el proceso de fotocatálisis mejora significativamente cuando se utiliza como fotocatalizadores a las NPs de óxidos semiconductores. Las NPs de óxidos semiconductores son empleadas en los procesos de fotocatálisis porque presentan muy buenas propiedades ópticas y electrónicas debido a su tamaño (aproximadamente 1 a 100 nm). La capacidad fotocatalítica de las NPs semiconductoras es la capacidad de absorber energía luminosa (energía solar o UV) para generar pares de electrones negativo y huecos positivos (Alahmadi, 2022). Esto provoca que sea posible llevarse a cabo las reacciones químicas necesarias para el proceso de degradación de los contaminantes orgánicos en el agua (Hassaan et al., 2023).

Actualmente, existen diversos métodos ecológicos empleados en la síntesis de nanomateriales y dentro de estos métodos, se encuentra la síntesis verde. Este método es muy prometedor debido que es considerado como un proceso limpio, seguro, rentable y amigable con el medio ambiente ya que se fundamenta en el uso de sustratos a base de bacterias, levaduras, hongos, algas y plantas (Huston et al., 2021). Se han reportado en la literatura algunas investigaciones que muestran la formación de NPs utilizando diversos extractos de plantas. Luque *et.al.* en el 2020a utilizaron cáscaras de *Citrus sinensis* para obtener extractos naturales y utilizarlos en la síntesis de NPs de SnO₂. Los autores lograron una degradación de 94.4% con

luz UV a los 102 min (Luque, Nava, Soto-Robles, Chinchillas-Chinchillas, et al., 2020a). Parvathiraja *et. al.*, en el 2020 utilizaron extracto de *Cyperus pangorei* con una concentración de 1 mol para biosintetizar NPs de Ag y después de dos horas se degradó el tinte arriba del 86% con luz UV (Parvathiraja et al., 2021). Aroob *et. al.* en 2023 utilizaron extractos naturales de hojas de *Seriphidium oliverianum* para crear NPs de CuO, obteniendo una degradación cerca de 65% después de 60 min de irradiación solar (Aroob et al., 2023). Lo que no ha sido reportado en la literatura es el uso de *L. alba* en la síntesis de NPs de óxidos semiconductores, lo cual podría ser un campo para explorar.

Lippia alba es una planta altamente utilizada en el noroeste de México con fines medicinales (Segoviano-Leon et al., 2025) lo que la convierte en una planta endémica de la región. Existen diversas investigaciones sobre su aplicación pero la gran mayoría se enfocan en su uso como agente anticoagulante (Yamari et al., 2024), antiviral (Sobrinho et al., 2021), antibacterial (Santos Filho et al., 2023), entre otros; sin embargo, su aplicación como extracto para síntesis de NPs aún no ha sido analizado, lo cual podría ser prometedor debido a la gran cantidad de compuestos de esta planta, principalmente flavonoides y polifenoles (Borromeo et al., 2024).

En esta investigación se sintetizaron NPs de ZnO mediante síntesis verde utilizando extractos naturales de *L. alba* y se caracterizaron por técnicas especializadas para conocer sus propiedades. Además, estas NPs fueron empleadas para evaluar la degradación fotocatalítica de cuatro colorantes orgánicos bajo radiación ultravioleta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para la síntesis verde de las NPs de ZnO se utilizó como precursor nitrato de zinc hexahidratado $[Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ de Sigma-Aldrich. Se usó agua destilada y hojas secas pulverizadas de 1 mm aproximadamente de *L. alba* como agente reductor.

Obtención del extracto natural

La colecta de la planta se realizó el 25 de noviembre de 2023 en el Río Sinaloa, cerca de la comunidad de Pueblo Viejo (colecta de fragmentos de tallo en la Figura 1a), con las siguientes coordenadas geográficas en Google Maps: 25.605146, -108.428351. Después se cortaron fragmentos de tallos de aproximadamente 30 cm de longitud y se transportaron al Laboratorio de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO) Campus Guasave. Se procedió a lavar los fragmentos de tallo con agua destilada y se dejaron en reposo para dejar escurrir el exceso de agua. Una vez secos, se colocaron sobre una malla metálica y con servilletas de papel (Figura 1b). Los fragmentos de tallo se dejaron en reposo a temperatura ambiente bajo la sombra por una semana. Posteriormente, se separó la hoja de los tallos y se pulverizaron utilizando un molino de café Hamilton Beach modelo 80350R y, por último, las hojas secas fueron almacenadas.

En un vaso de precipitado, se agregaron 50 ml de agua destilada con 2 g de hoja seca de *L. alba* (correspondiente al 4% del volumen de la solución) y se agitó aproximadamente a 1000 rpm durante 2 h a temperatura ambiente. Después, la solución se colocó en baño María a 60 °C por 1 h y se filtró con papel Whatman #1 empleando una bomba de vacío modelo EL-40 de FABELAB para separar el material orgánico del extracto natural. Siguiendo esta metodología se obtuvo aproximadamente 50 ml del extracto de *L. alba*.

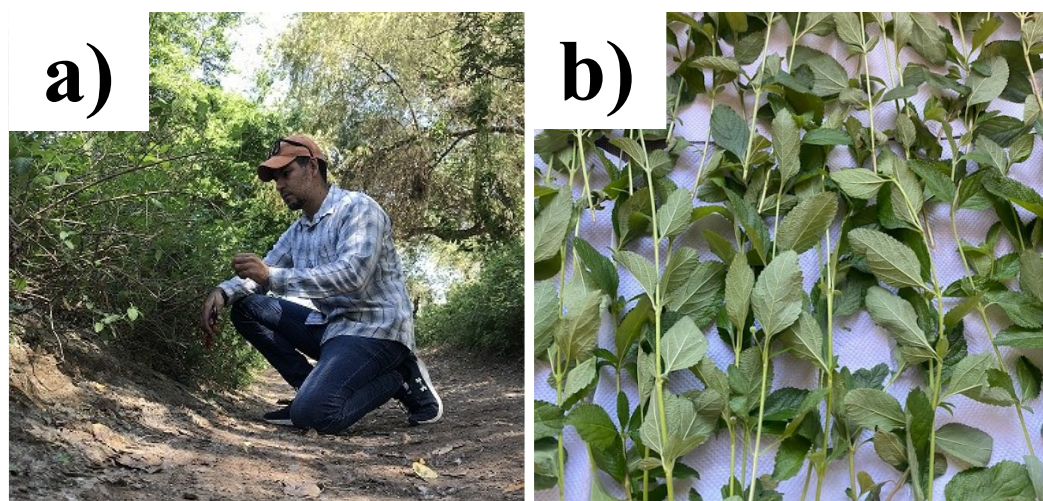


Figura 1. Obtención de la planta *L. alba*. a) Recolección de fragmentos de tallo, b) Proceso de secado.

Síntesis verde de NPs de ZnO

Para la síntesis de NPs de ZnO fue necesario agregar 2 g de nitrato de zinc (4%) a los 50 ml del extracto natural. Posteriormente, la solución se agitó durante dos horas a temperatura ambiente y aproximadamente a 1000 rpm. Transcurrido ese tiempo, las muestras se colocaron en baño María a 60 °C hasta obtener una consistencia plástica (aproximadamente 9 h). El contenido resultante del proceso se colocó en cápsulas de porcelana bien distribuidas en toda la superficie y estas cápsulas se colocaron en una mufla a 400 °C por 60 min (tratamiento térmico). El material resultante se trituró con un mortero de ágata para su almacenamiento en microviales eppendorf. El proceso de la síntesis verde de NPs de ZnO empleando extracto natural de *L. alba* se puede ver en la Figura 2.

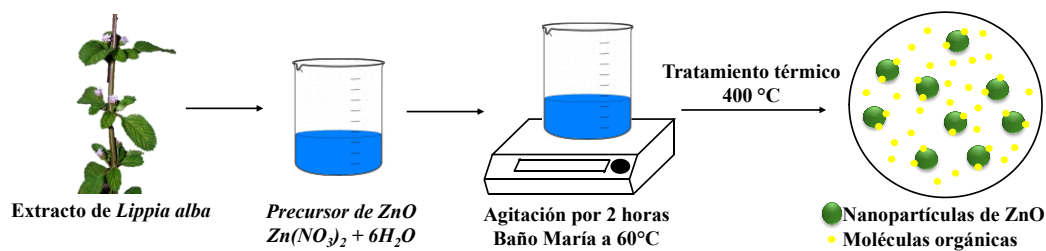


Figura 2. Esquema del proceso de síntesis de NPs de ZnO.

Caracterización de las NPs de ZnO

Para conocer las propiedades y características de las NPs de ZnO sintetizadas en esta investigación se utilizaron técnicas avanzadas de caracterización en los laboratorios del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV-Chihuahua) y de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC-Ensenada). Para analizar la morfología del nanomaterial se empleó un microscopio electrónico de transmisión (TEM) modelo JEOL-JEM-2100 y con una aceleración de 120 kV. El comportamiento térmico se caracterizó mediante un análisis termogravimétrico (TGA) con un equipo TA Instrument-SDT Q600, empleando una rampa de calentamiento de 10 °C/min hasta alcanzar 800 °C. La vibración molecular de los enlaces se evaluó mediante espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) en un equipo de la marca Perkin Elmer, con una resolución de 0.5 cm⁻¹ y un rango de medición de 4500 a 400 cm⁻¹. Para conocer la absorbancia de las nanopartículas se empleó espectroscopia de ultravioleta visible (UV-Vis) con un espectrofotómetro de la marca Perkin Elmer-Lambda 365 con una longitud de onda de 190 a 800 nm con una velocidad de escaneo de 600 nm/min y siguiendo el modelo de TAUC se calculó la banda prohibida o band gap de las nanopartículas (Klein et al., 2023).

Actividad fotocatalítica

La actividad fotocatalítica de las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba* al 4% fue evaluada midiendo la degradación de cuatro colorantes orgánicos MB, MO, RC y RM bajo radiación ultravioleta. Se prepararon soluciones contaminadas de estos colorantes con una concentración de 15 mg/L y se agregaron 50 mg del fotocatalizador (NPs de ZnO) en 50 ml de la solución contaminada. Posteriormente, la solución fue agitada (aproximadamente 1000 rpm) durante 30 min en la oscuridad para asegurar un equilibrio de adsorción-desorción. Luego, la solución se colocó en reactores de luz ultravioleta marca UV Polaris Scientific modelo UVA-2C. Por último, una vez encendida las lámparas se tomó una muestra cada 10 min durante tres horas consecutivas (180 minutos). Posteriormente, las muestras fueron evaluadas por espectroscopia de UV-Vis para evaluar su concentración y el porcentaje de degradación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La morfología de las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba* se analizó mediante TEM y los resultados se presentan en la Figura 3a. Como se puede observar, existe aglomeración y se pueden apreciar las formas y los diferentes tamaños del nanomaterial. Las NPs presentan una forma cuasiesférica y tienen un tamaño promedio de 10.1 nm (Figura 3b). Se visualiza que existen diferentes tamaños de las NPs en la micrografía, las cuales se encuentran en un rango de 7 a 14 nm, teniendo una distribución mayoritaria a los 9 nm. Para obtener la distribución de tamaños y el tamaño promedio, se tomaron 70 mediciones empleando el software ImageJ y descartando las cinco mediciones mayores y las cinco mediciones menores. En la literatura se observa algo similar. En 2023, El Golli y colaboradores obtuvieron NPs de ZnO por medio de biosíntesis utilizando como extracto hojas de

Moringa oleifera, donde se obtuvieron tamaños en un rango de 9 a 18 nm con un tamaño promedio de 14 nm y con una forma denominada por los autores como relativamente esférica (El Golli et al., 2023). El tamaño de partícula y su distribución uniforme se debe a la presencia de compuestos orgánicos presentes en la síntesis, los cuales actúan como recubrimiento en las partículas que evita su aglomeración y crecimiento, comprobando que el proceso de síntesis verde genera un mayor control en el tamaño y distribución de las partículas en comparación de otros métodos (Abdullah et al., 2021). Este resultado indica que emplear extractos de *L. alba* como agentes reductores y estabilizantes en la formación de NPs es exitoso.

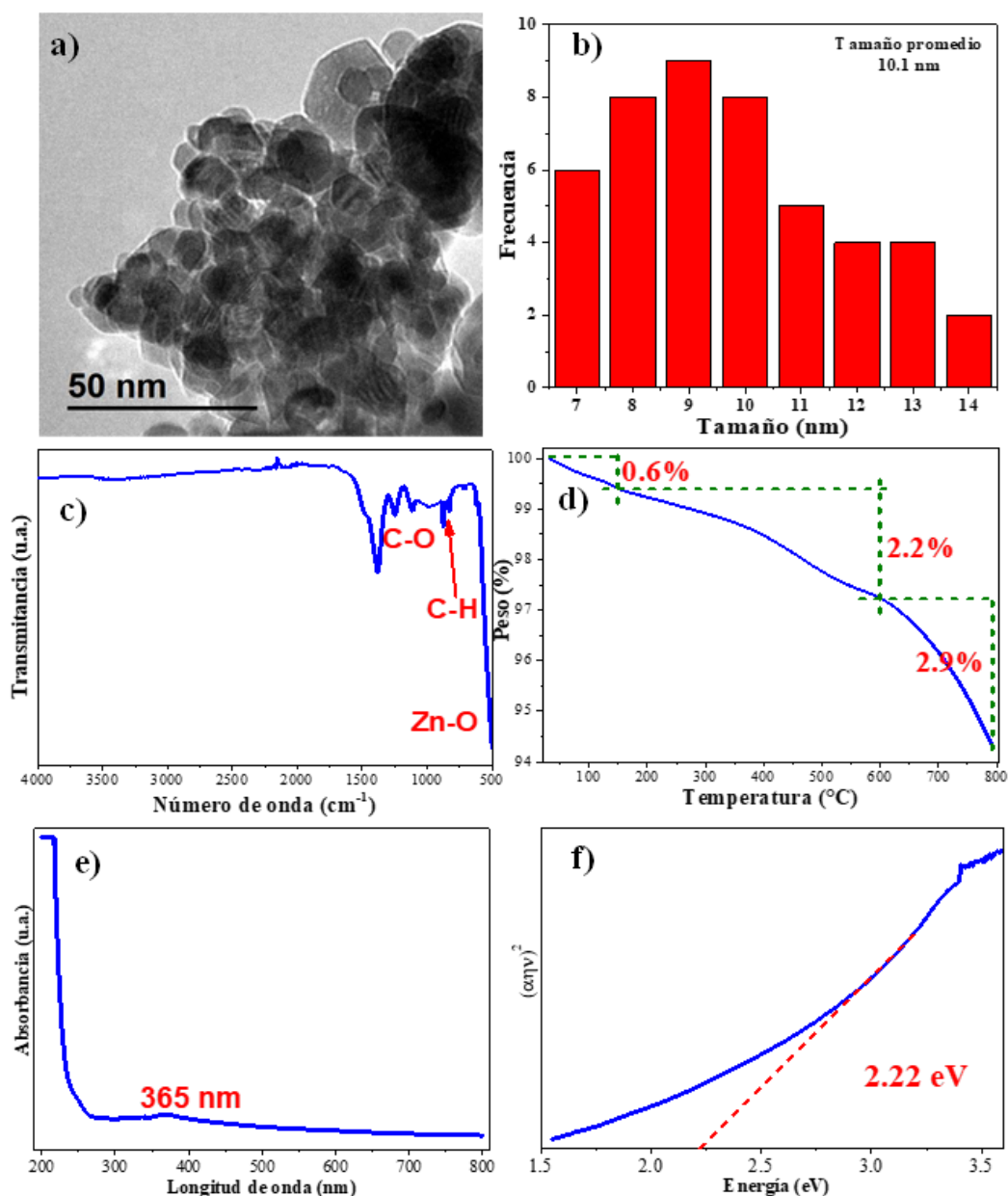


Figura 3. Caracterización de NPs de ZnO. a) Análisis de TEM, b) distribución de tamaños, c) análisis FT-IR, d) análisis TGA, e) análisis UV-Vis y f) cálculo de Band gap.

FTIR

Para determinar si la síntesis de las NPs fue llevada a cabo con éxito, saber si los compuestos orgánicos de *L. alba* se encuentran en el material resultante y si existe contaminación en la muestra se realizó el estudio de FTIR el cual se observa en la figura 3c. En el espectro se observa que se encuentran presentes bandas de absorción a 1381 cm^{-1} , 825 cm^{-1} y 542 cm^{-1} , las cuales son atribuidas a las vibraciones de los enlaces C-O (Motelica et al., 2023), C-H (Srujana y Bhagat, 2022) y Zn-O (Ahmad et al., 2022) respectivamente. Según los reportes previos en la literatura, las bandas de C-O y C-H pertenecen a compuestos orgánicos presentes en extractos de *L. alba* (Rabha et al., 2023), lo cual indica que en las NPs de ZnO, se encuentran presentes moléculas orgánicas del extracto utilizado en su síntesis. La tercera banda (Zn-O) que se observa bastante prominente es asignada al enlace Zn-O, indicando la formación de este compuesto. Esta misma banda vibracional se presenta en el estudio realizado por Algarni *et.al* en el 2022, donde utilizó *Rosmarinus officinalis* para sintetizar NPs de ZnO (Saad Algarni et al., 2022).

Lo encontrado en el estudio de FT-IR indica la obtención exitosa de las NPs de ZnO sin la presencia de contaminantes y, además, indica que las moléculas orgánicas de *L. alba* permanecen en las NPs después del proceso de síntesis. Esto ayuda a que mejoren las propiedades ópticas, térmicas y morfológicas del nanomaterial (Chinchillas-Chinchillas et al., 2024).

TGA

El comportamiento térmico de las NPs de ZnO sintetizadas con *L. alba* se presenta en la Figura 3d. Se puede observar que el termograma obtenido para las NPs se puede dividir en 3 zonas importantes. La primera zona entre temperatura ambiente hasta a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, la segunda zona desde $151\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y, por último, la tercera zona desde $601\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la primera zona se encuentra una pérdida de peso del 0.6 % que se debe al agua superficial y agua físicamente ligada. En la segunda zona se observa una pérdida de peso del 2.2% y se atribuye a la descomposición de los contenidos orgánicos de los extractos de *L. alba* y algunos complejos formados entre el Zn y moléculas orgánicas. Estas moléculas son menos estables térmicamente. La última zona presenta una pérdida de peso del 2.9%, la cual está relacionada con la completa formación de las nanopartículas de ZnO y la degradación de complejos orgánicos más estables (Aldeen et al., 2022; Faisal et al., 2021; Khan et al., 2021). Las pérdidas de peso mostradas por las NPs de ZnO sintetizadas con *L. alba* en todo el estudio son más grandes comparadas con las pérdidas mostradas por el ZnO pristino, el cual presenta una pérdida despreciable hasta los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Khurana et al., 2021). Se puede suponer que efectivamente los contenidos orgánicos de *L. alba* y el ZnO están enlazados, como se observó en el análisis de FTIR.

Análisis óptico

Con el fin de conocer las propiedades ópticas de las NPs de ZnO sintetizadas en este estudio se realizó espectroscopia UV-Vis (Figura 3e) y con los resultados se calculó la energía prohibida o banda gap (Figura 3f). Como se puede visualizar,

el espectro de UV-Vis muestra una banda a 365 nm que es debida a la transición de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción lo cual indica que la obtención de las NPs puede ser confirmada de manera satisfactoria. Este comportamiento de las NPs de ZnO fue reportado en la literatura por Muthu Kathija M., *et al.*, en el 2023 (MuthuKathija et al., 2023). Por otra parte, para determinar el valor de la energía prohibida o band gap se utilizó el modelo de Tauc (Singh et al., 2024) que se denota por la formula siguiente:

$$\alpha\eta\nu = B(\eta\nu - E_g)^n$$

Donde:

α . Es el coeficiente de absorción.

$\eta\nu$. Representa la energía del fotón.

E_g . Band gap.

B. Constante de proporcionalidad.

n. Exponente que se asigna según la naturaleza de la transición electrónica (1/2 para la el ZnO).

La aplicación del modelo de Tauc da como resultado una gráfica de $(\alpha\eta\nu)^2$ vs energía de enlace que se muestra en la figura 3f. El valor de band gap de las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba* fue de 2.22 eV. Este valor es menor que algunos reportados en la literatura empleando métodos similares de síntesis verde (Ramesh et al., 2021). En comparación con el band gap del ZnO puro (3.6 eV) es claro que el valor presentado en este estudio es menor, esto es una gran ventaja que puede ser aprovechada en una gran cantidad de aplicaciones como celdas solares, purificación ambiental, fotocatalisis, entre otros.

Actividad fotocatalítica

El estudio de la degradación fotocatalítica de los colorantes MB, MO, RC y RM bajo radiación UV se muestra en la Figura 4. Se puede observar que todas las muestras presentaron una degradación insignificante en la oscuridad, lo que indica que no existe una gran adsorción de los contaminantes en las NPs. Es muy sobresaliente que las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba* utilizadas como fotocatalizadores presenten muy buenos resultados. Al emplearlas en la degradación del contaminante RC, se puede observar que logró degradarlo en su totalidad (100%) en 60 min. Además, estas NPs permitieron una degradación del 100% del colorante RM a los 100 min de exposición en los reactores UV. Y, por otra parte, permitieron una degradación del 98% y 94% del contaminante MB y MO respectivamente en 180 min. Es importante mencionar que los colorantes orgánicos sin la presencia del fotocatalizador (NPs de ZnO) se degradan muy lentamente. En el 2019, Valerie Ling Er Siong *et al.*, reportaron la degradación del 7.9% de MB en 4 horas de exposición a la luz sin la presencia de fotocatalizador (Siong et al., 2019). Tsung-Mo Tien *et al.*, en el 2022 reportaron la degradación de aproximadamente 4% de MO en 140 min (Tien et al., 2022).

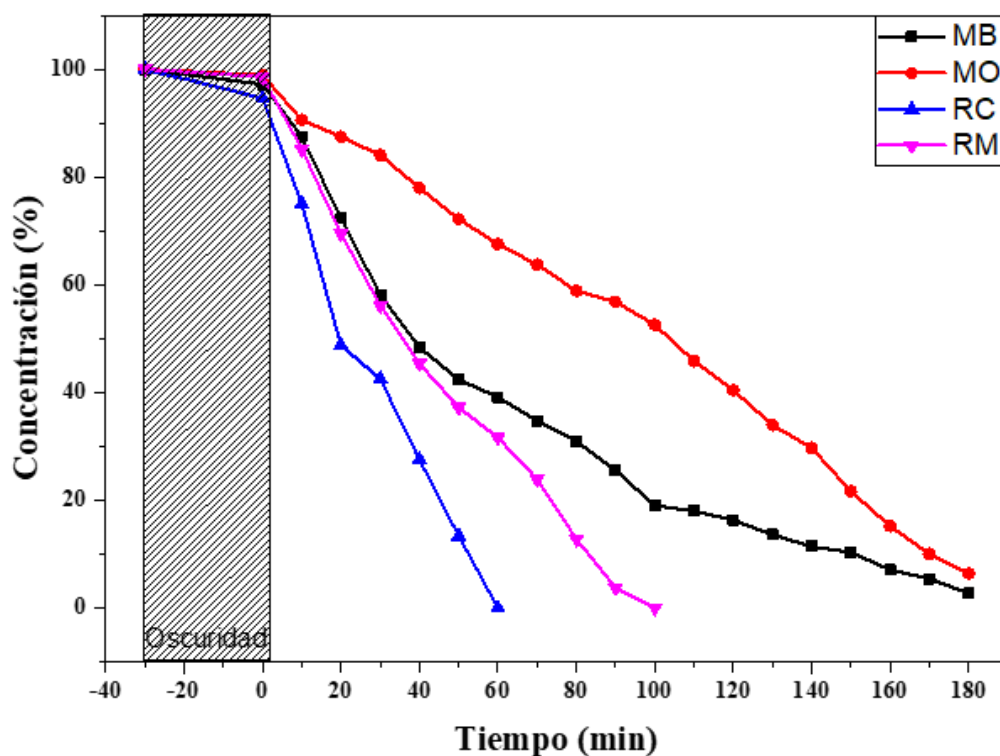


Figura 4. Actividad fotocatalítica de las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba*.

En el estudio publicado por Anjali Rani *et al.*, en el 2022, se reporta que el MR no sufre degradación sin la presencia de un fotocatalizador hasta las 6 horas de exposición a la luz (Rani et al., 2023). Y, por último, Sara Argote-Fuentes *et al.*, en el 2021, presentó la fotólisis del CR, presentando una degradación natural del 8.75% en 4.5 horas sin la presencia de un fotocatalizador (Argote-Fuentes et al., 2021). Estos estudios indican el efecto significativo que tiene adicionar NPs en el proceso de degradación, para acelerar la mineralización de los colorantes orgánicos.

Para poder diferenciar el efecto de las NPs de ZnO sintetizadas con extractos de *L. alba* se presenta la tabla 1, en donde se pueden visualizar el resultado de la degradación fotocatalítica de MB, MO, RC y RM presentes en otros estudios y empleando NPs de ZnO sintetizadas por una ruta ecológica/verde (utilizando extractos naturales). Estos resultados indican que las NPs de ZnO ayudaron a acelerar la degradación de estos contaminantes orgánicos en muy poco tiempo, siendo una alternativa altamente viable para su futuro uso a escala industrial.

Tabla 1. Comparación de la eficiencia fotocatalítica de las NPs de ZnO sintetizadas con extracto de *L. alba* y la literatura.

Año	Colorante	Extracto	NPs	Degradación	Referencia
2025	MB	<i>Lippia alba</i>	ZnO	100% en 180 min	Este trabajo
2025	MO	<i>Lippia alba</i>	ZnO	94% en 180 min	Este trabajo
2025	MR	<i>Lippia alba</i>	ZnO	100% en 100 min	Este trabajo
2025	CR	<i>Lippia alba</i>	ZnO	100% en 60 min	Este trabajo
2025	MB	<i>Gomphrena serrata</i>	ZnO	90.5% en 180 min	(Ramasubramanian et al., 2023)
2022	MR	<i>Stoechospermum marginatum</i>	ZnO	92% en 180 min	(Anjali et al., 2022)

2022	MO	<i>Mimosa tenuiflora</i>	ZnO	62% en 180 min	(Quevedo-Robles et al., 2022)
2024	CR	<i>Ambrosia ambrosioides</i>	ZnO	90% en 60 min	(Medina-Acosta et al., 2024)

Mecanismo de reacción.

El posible mecanismo de reacción fotocatalítico de las NPs de ZnO sintetizadas con extracto de *L. alba* en la degradación de colorantes orgánicos se puede observar en la figura 5. Cuando las NPs son irradiadas con luz UV y esta energía es igual o mayor que la energía de la banda prohibida o band gap provoca que se promuevan electrones de la capa de valencia a la capa de conducción, generando pares electrón (e^-) - hueco (h^+) y se inicia el proceso fotocatalítico. Estas dos especies producen reacciones redox en el medio acuoso oxidando al agua y reduciendo el oxígeno. En estas reacciones redox se produce el radical hidroxilo ($\bullet OH$) y el radical superóxido ($O_2^{\bullet -}$) respectivamente (Silva et al., 2024). Estas dos especies reactivas buscan su estabilidad formando reacciones en cadena e interactuando con las moléculas de los colorantes orgánicos hasta degradar estos compuestos y convertirlos en moléculas estables como H_2O y CO_2 (Luque, Nava, Soto-Robles, Garrafa-Galvez, et al., 2020b).

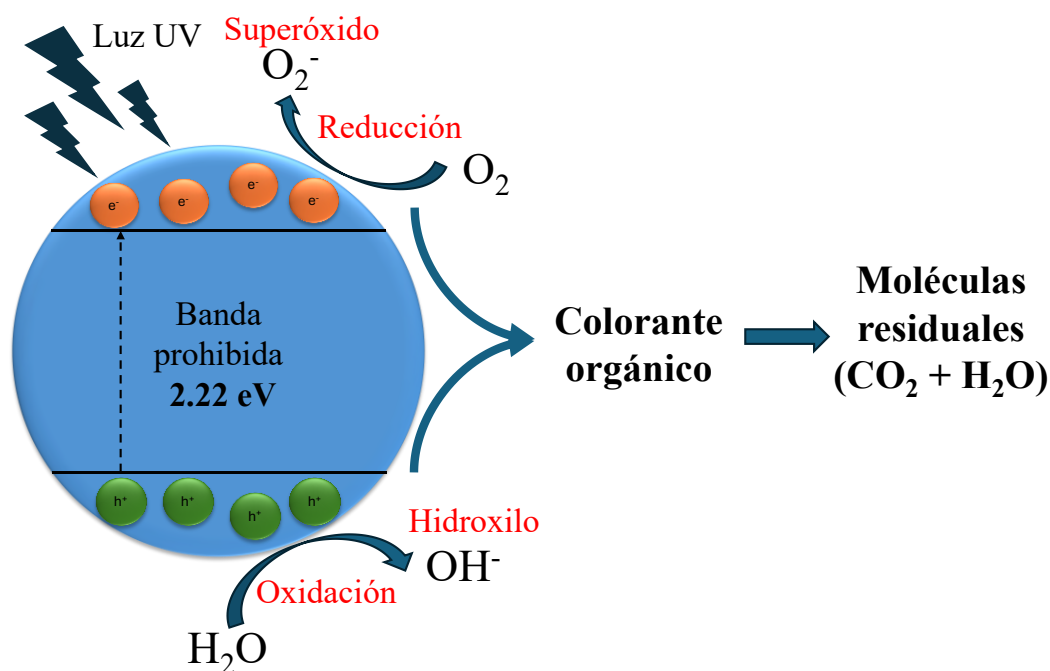


Figura 5. Propuesta del mecanismo de reacción de la actividad fotocatalítica.

CONCLUSIONES

La síntesis verde de nanopartículas de ZnO utilizando extracto natural de *L. alba* demostró ser una estrategia eficaz para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos en agua bajo radiación UV. Las NPs de ZnO obtenidas en esta investigación presentaron características morfológicas, estructurales, térmicas y ópticas que favorecieron su desempeño, como un tamaño promedio de 10.1 nm, una forma cuasiesférica y una banda prohibida reducida a 2.22 eV, lo que permitió

una mayor eficiencia en el proceso de fotocatalisis. Además, la presencia de moléculas orgánicas del extracto natural en la superficie del nanomaterial sugiere una posible funcionalización que podría potenciar su actividad. Estos hallazgos son relevantes porque evidencian el potencial de las NPs de ZnO sintetizadas por métodos verdes para el tratamiento de aguas contaminadas por tintes orgánicos, con resultados prometedores en la degradación de MB, MO, MR y CR en menos de 180 minutos. Sin embargo, es importante mencionar que existen ciertas limitaciones, como la necesidad de evaluar otras variables y condiciones experimentales más específicas para garantizar su viabilidad a escala industrial, el cual es uno de los objetivos para trabajos futuros. Por lo tanto, en investigaciones futuras se busca optimizar el proceso y explorar su aplicación en escenarios reales, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

REFERENCIAS

- Abdullah, F. H., Bakar, N. H. H. A., y Bakar, M. A. (2021). Comparative study of chemically synthesized and low temperature bio-inspired Musa acuminata peel extract mediated zinc oxide nanoparticles for enhanced visible-photocatalytic degradation of organic contaminants in wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124779.
- Ahmad, T., Pandey, V., Saddam Husain, M., Adiba, y Munjal, S. (2022). Structural and spectroscopic analysis of pure phase hexagonal wurtzite ZnO nanoparticles synthesized by sol-gel. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1694–1697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.456>
- Ahmed, F., Johnson, D., Hashaikeh, R., y Hilal, N. (2023). Barriers to innovation in water treatment. *Water*, 15(4), 773.
- Alahmadi, N. (2022). Recent progress in photocatalytic removal of environmental pollution hazards in water using nanostructured materials. *Separations*, 9(10), 264.
- Aldeen, T. S., Ahmed Mohamed, H. E., y Maaza, M. (2022). ZnO nanoparticles prepared via a green synthesis approach: Physical properties, photocatalytic and antibacterial activity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 160, 110313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110313>
- Anjali, K. P., Raghunathan, R., Devi, G., y Dutta, S. (2022). Photocatalytic degradation of methyl red using seaweed mediated zinc oxide nanoparticles. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43, 102384.
- Argote-Fuentes, S., Feria-Reyes, R., Ramos-Ramírez, E., Gutiérrez-Ortega, N., y Cruz-Jiménez, G. (2021). Photoelectrocatalytic Degradation of Congo Red Dye with Activated Hydrotalcites and Copper Anode. *Catalysts*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/catal11020211>
- Aroob, S., Carabineiro, S. A. C., Taj, M. B., Bibi, I., Raheel, A., Javed, T., Yahya, R., Alelwani, W., Verpoort, F., y Kamwilaisak, K. (2023). Green synthesis and photocatalytic dye degradation activity of CuO nanoparticles. *Catalysts*, 13(3), 502.
- Borromeo, I., De Luca, A., Domenici, F., Giordani, C., Rossi, L., y Forni, C. (2024). Antioxidant properties of Lippia alba essential oil: A potential treatment for oxidative stress-related conditions in plants and cancer cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(15), 8276.
- Chinchillas-Chinchillas, M. J., Garrafa-Gálvez, H. E., Castro-Beltran, A., y Luque, P. A. (2024). Turnera diffusa and its novel application in the synthesis of ZnO semiconductor nanoparticles with high photocatalytic power. *Applied Physics A*, 130(10), 710.
- El Golli, A., Contreras, S., y Dridi, C. (2023). Bio-synthesized ZnO nanoparticles and sunlight-driven photocatalysis for environmentally-friendly and sustainable route of synthetic petroleum refinery wastewater treatment. *Scientific Reports*, 13(1), 20809.
- Faisal, S., Jan, H., Shah, S. A., Shah, S., Khan, A., Akbar, M. T., Rizwan, M., Jan, F., Wajidullah, y Akhtar, N. (2021). Green

- synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of *Myristica fragrans*: their characterizations and biological and environmental applications. *ACS Omega*, 6(14), 9709–9722.
- Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., Niculescu, V.-C., y El Nemr, A. (2023). Principles of photocatalysts and their different applications: a review. *Topics in Current Chemistry*, 381(6), 31.
- Huston, M., DeBella, M., DiBella, M., y Gupta, A. (2021). Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/nano11082130>
- Khan, M., Ware, P., y Shimpi, N. (2021). Synthesis of ZnO nanoparticles using peels of *Passiflora foetida* and study of its activity as an efficient catalyst for the degradation of hazardous organic dye. *SN Applied Sciences*, 3(5), 528. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04436-4>
- Khurana, N., Arora, P., Pente, A. S., Pancholi, K. C., Kumar, V., Kaushik, C. P., y Rattan, S. (2021). Surface modification of zinc oxide nanoparticles by vinyltriethoxy silane (VTES). *Inorganic Chemistry Communications*, 124, 108347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108347>
- Klein, J., Kampermann, L., Mockenhaupt, B., Behrens, M., Strunk, J., y Bacher, G. (2023). Limitations of the Tauc plot method. *Advanced Functional Materials*, 33(47), 2304523.
- Luque, P. A., Nava, O., Soto-Robles, C. A., Chinchillas-Chinchillas, M. J., Garrafa-Galvez, H. E., Baez-Lopez, Y. A., Valdez-Núñez, K. P., Vilchis-Nestor, A. R., y Castro-Beltrán, A. (2020a). Improved photocatalytic efficiency of SnO₂ nanoparticles through green synthesis. *Optik*, 206, 164299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164299>
- Luque, P. A., Nava, O., Soto-Robles, C. A., Garrafa-Galvez, H. E., Martínez-Rosas, M. E., Chinchillas-Chinchillas, M. J., Vilchis-Nestor, A. R., y Castro-Beltrán, A. (2020b). SnO₂ nanoparticles synthesized with *Citrus aurantifolia* and their performance in photocatalysis. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(19), 16859–16866. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04242-5>
- Medina-Acosta, M., Chinchillas-Chinchillas, M. J., Garrafa-Gálvez, H. E., Garcia-Maró, C. A., Rosas-Casarez, C. A., Lugo-Medina, E., Luque-Morales, P. A., y Soto-Robles, C. A. (2024). Photocatalytic Degradation of Four Organic Dyes Present in Water Using ZnO Nanoparticles Synthesized with Green Synthesis Using *Ambrosia ambrosioides* Leaf and Root Extract. *Processes*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/pr12112456>
- Mehta, M., Sharma, M., Pathania, K., Jena, P. K., y Bhushan, I. (2021). Degradation of synthetic dyes using nanoparticles: a mini-review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 49434–49446.
- Mohammad, R. E. A., Birniwa, A. H., Abdullahi, S. S., y Jagaba, A. H. (2023). Decolourization of textile dyes using CNT-based hybrid materials. In *Nanohybrid Materials for Treatment of Textiles Dyes* (pp. 119–156). Springer.
- Motelica, L., Vasile, B.-S., Ficaí, A., Surdu, A.-V., Ficaí, D., Oprea, O.-C., Andronescu, E., Mustăţea, G., Ungureanu, E. L., y Dobre, A. A. (2023). Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles Loaded with Essential Oils. In *Pharmaceutics* (Vol. 15, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102470>
- MuthuKathija, M., Sheik Muhideen Badhusha, M., y Rama, V. (2023). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Pisonia Alba* leaf extract and its antibacterial activity. *Applied Surface Science Advances*, 15, 100400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100400>
- ONU, O. de las N. U. (2015). *Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*.
- Parvathiraja, C., Shailajha, S., Shanavas, S., y Gurung, J. (2021). Biosynthesis of silver nanoparticles by *Cyperus pangorei* and its potential in structural, optical and catalytic dye degradation. *Applied Nanoscience*, 11(2), 477–491.
- Quevedo-Robles, R. V., Vilchis-Nestor, A. R., y Luque, P. A. (2022). Study of optical and morphological properties of nanoparticles semiconductors of zinc oxide synthesized using *Mimosa tenuiflora* extract for photodegradation of methyl orange. *Optical Materials*, 128, 112450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112450>
- Rabha, S., Devi, B., Goswami, M., Das, E., Sarma, N., y Devi, A. (2023). Ecologically Safe Removal of Lead Ions and Basic Fuchsin Dye from an Aqueous Solution Using *Lippia alba* Leaves. *ChemistrySelect*, 8(43), e202302149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.202302149>

- Ramasubramanian, A., Selvaraj, V., Chinnathambi, P., Hussain, S., Ali, D., Kumar, G., Balaji, P., y Sagadevan, S. (2023). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue from aqueous solution using green synthesized ZnO nanoparticles. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(18), 17271–17282. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04992-2>
- Ramesh, P., Saravanan, K., Manogar, P., Johnson, J., Vinoth, E., y Mayakannan, M. (2021). Green synthesis and characterization of biocompatible zinc oxide nanoparticles and evaluation of its antibacterial potential. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 31, 100399. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100399>
- Rani, A., Singh, K., Patel, A. S., y Sharma, P. (2023). Factors affecting photocatalytic degradation of methyl red by MoS₂ nanostructures prepared by hydrothermal technique. *Bulletin of Materials Science*, 46(2), 94.
- Saad Algarni, T., Abduh, N. A. Y., Al Kahtani, A., y Aouissi, A. (2022). Photocatalytic degradation of some dyes under solar light irradiation using ZnO nanoparticles synthesized from Rosmarinus officinalis extract. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 15(2), 460–473. <https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2089059>
- Santos Filho, L. G., Resis, R. B., Souza, A. S. Q., Canuto, K. M., Brito, E., Castro, K. N. C., Pereira, A. M. L., y Diniz, F. M. (2023). Chemical composition and biological activities of the essential oils from Lippia alba and Lippia origanoides. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 95, e20220359.
- Segoviano-Leon, J. P., Valdez-Morales, M., Leyva-Morales, J. B., Soto-Montoya, D. G., de Leon, F. I.-D., y Perea-Dominguez, X. P. (2025). Metabolites profile, DPPH and ABTS scavenging and myoglobin protection ratio of aqueous infusion and methanolic extracts of Mexican Lippia alba. *Food Chemistry*, 467, 142259.
- Silva, M. C. R., Castro-Lopes, S., Jerônimo, A. G., Barbosa, R., Lins, A., Trigueiro, P., Viana, B. C., Araujo, F. P., Osajima, J. A., y Peña-Garcia, R. R. (2024). Green synthesis of Er-doped ZnO nanoparticles: an investigation on the methylene blue, eosin, and ibuprofen removal by photodegradation. *Molecules*, 29(2), 391.
- Singh, S., Gade, J. V., Verma, D. K., Elyor, B., y Jain, B. (2024). Exploring ZnO nanoparticles: UV–visible analysis and different size estimation methods. *Optical Materials*, 152, 115422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115422>
- Siong, V. L. E., Lee, K. M., Juan, J. C., Lai, C. W., Tai, X. H., y Khe, C. S. (2019). Removal of methylene blue dye by solvothermally reduced graphene oxide: a metal-free adsorption and photodegradation method. *RSC Advances*, 9(64), 37686–37695.
- Sivaraman, C., Vijayalakshmi, S., Leonard, E., Sagadevan, S., y Jambulingam, R. (2022). Current developments in the effective removal of environmental pollutants through photocatalytic degradation using nanomaterials. *Catalysts*, 12(5), 544.
- Sobrinho, A. C. N., de Moraes, S. M., Marinho, M. M., de Souza, N. V., y Lima, D. M. (2021). Antiviral activity on the Zika virus and larvicidal activity on the Aedes spp. of Lippia alba essential oil and β -caryophyllene. *Industrial Crops and Products*, 162, 113281.
- Srujana, S., y Bhagat, D. (2022). Chemical-based synthesis of ZnO nanoparticles and their applications in agriculture. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 7(1), 269–275. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00224-6>
- Tien, T.-M., Chen, C.-H., Huang, C.-T., y Chen, E. L. (2022). Photocatalytic Degradation of Methyl Orange Dyes Using Green Synthesized MoS₂/Co₃O₄ Nanohybrids. *Catalysts*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/catal12111474>
- Uddin, M. A., Begum, M. S., Ashraf, M., Azad, A. K., Adhikary, A. C., y Hossain, M. S. (2023). Water and chemical consumption in the textile processing industry of Bangladesh. *PLOS Sustainability and Transformation*, 2(7), e0000072.
- Yamari, I., Abchir, O., Siddique, F., Zaki, H., Errougui, A., Talbi, M., Bouachrine, M., ElKouali, M., y Chtita, S. (2024). The anticoagulant potential of Lippia Alba extract in inhibiting SARS-CoV-2 Mpro: Density functional calculation, molecular docking analysis, and molecular dynamics simulations. *Scientific African*, 23, e01986.