

Capítulo 5

Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc para aplicada agrícolas

*Alexahandra Judith Valenzuela Rubio*²⁶

*Ricardo Torres Ramos*²⁷

*Aurelia Mendoza Gómez*²⁸

*Mary Triny Beleño Cabañas*²⁹

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE26000237>



²⁶ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México.

²⁷ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México, ricardo.torres26@uabc.edu.mx.

²⁸ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México.

²⁹ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería. Nuevo León 21705, Baja California, México.

Resumen

La nanotecnología aplicada a la agricultura representa una estrategia prometedora para enfrentar el estrés abiótico, especialmente la salinidad, que limita el desarrollo y la productividad de los cultivos. En ese estudio se sintetizaron partículas de óxido de zinc (ZnO), mediante el método químico de precipitación, utilizando sulfato de zinc e hidróxido de sodio como precursores, seguido de procesos de secado y calcinación. La caracterización fisicoquímica se realizó mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). El análisis de FTR confirmó la formación de ZnO cristalino, evidenciado por la presencia de la banda característica del enlace Zn-O y la ausencia de señales asociadas a compuestos orgánicos residuales, lo que indica una alta pureza del material obtenido. La micrografía reveló una morfología granular e irregular con aglomeración micrométrica, formada por nanopartículas primarias y superficies porosas. Estas características se asocian a la elevada energía superficial del ZnO y a la ausencia de agentes estabilizantes durante la síntesis. En conjunto, los resultados sugieren que las Zn-NPs obtenidas representan propiedades adecuadas para su aplicación en sistemas agrícolas, particularmente la mitigación de los efectos del estrés salino en plantas.

Introducción

En los últimos años, la incorporación de la nanotecnología en los sistemas agrícolas se ha posicionado como una estrategia innovadora para enfrentar problemas asociados al estrés abiótico, particularmente la salinidad, la cual limita de manera considerable el desarrollo y la productividad de numerosos cultivos. En este contexto, el uso de nanopartículas representa una alternativa emergente para fortalecer la sostenibilidad agrícola, ya que su aplicación permite mejorar la eficiencia nutrimental, aumentar

la tolerancia de las plantas frente a condiciones adversas y reducir la dependencia de agroquímicos convencionales que deterioran la calidad del suelo (Meng et al., 2025).

Entre las nanopartículas más estudiadas destacan las de óxido de zinc, cuyo desempeño ha sido ampliamente documentado debido a su capacidad para influir positivamente en diversos procesos fisiológicos de las plantas. De acuerdo con Dogan et al. (2025), las nanopartículas de óxido de zinc presentan elevada estabilidad, biodisponibilidad y comportamiento catalítico, lo que favorece rutas bioquímicas esenciales como la síntesis de fitohormonas, la activación de enzimas clave, la regulación del metabolismo del nitrógeno y la preservación de la integridad de las membranas celulares. Su reducido tamaño facilita, además, su ingreso a través de estomas y poros foliares, lo que mejora su movilidad interna y potencia funciones fisiológicas fundamentales, especialmente bajo condiciones de estrés salino.

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en plantas sometidas a estrés salino ha mostrado efectos positivos relacionados con la mejora de la actividad antioxidante, la estabilidad de las membranas celulares y la eficiencia fotosintética. Estos beneficios se atribuyen a que el zinc, en su forma nanoestructurada, presenta una mayor disponibilidad, lo que favorece procesos metabólicos esenciales y la síntesis de proteínas asociadas a la respuesta frente a especies reactivas de oxígeno. Asimismo, las nanopartículas no solo actúan como una fuente eficiente de zinc, sino que también exhiben interacciones químicas directas con nutrientes clave, mejorando su retención, movilidad y aprovechamiento dentro de los sistemas agrícolas. Esto permite un suministro nutrimental más eficiente bajo condiciones adversas como la salinidad, apoyando la recuperación del crecimiento vegetal y reduciendo los daños fisiológicos asociados al exceso de sales (Li et al., 2025).

La presente investigación tiene como objetivo analizar el proceso de síntesis de nanopartículas de óxido de zinc mediante el método químico de precipitación y evaluar su potencial aplicación en sistemas agrícolas para la mitigación de los efectos del estrés salino (Li et al., 2025).

Materiales

La síntesis de nanopartículas de óxido de zinc se llevó a cabo mediante el método de precipitación química, utilizando como precursor una solución de sulfato de zinc a una concentración de 0.5 M y como agente precipitante una solución de hidróxido de sodio a 1.0 M. Ambas soluciones se prepararon con agua destilada y se mantuvieron bajo agitación constante a temperatura ambiente. La solución de hidróxido de sodio se adicionó de manera gradual a la solución de sulfato de zinc hasta alcanzar un pH de 14, lo que favoreció la formación de un precipitado blanco correspondiente al hidróxido de zinc. El sistema se mantuvo en agitación durante cinco minutos adicionales con el fin de asegurar la completa reacción y la homogeneidad del precipitado. Posteriormente, el sólido obtenido se separó por decantación y se lavó sucesivamente con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. El material resultante se sometió a un proceso de secado en estufa a 80 °C durante 24 horas para eliminar la humedad residual. Una vez seco, el sólido fue calcinado en una mufla a 440 °C durante dos horas, promoviendo la transformación del hidróxido de zinc en óxido de zinc cristalino. Finalmente, las nanopartículas obtenidas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se almacenaron en recipientes herméticos para su posterior caracterización fisicoquímica y evaluación.

La caracterización fisicoquímica incluye análisis FTIR para verificar los grupos funcionales o tipos de enlaces presentes en el precipitado. También, se realizó un análisis de microscopia utilizando un microscopio electrónico de barrido.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, mostrados en la Figura 1, confirman la formación exitosa de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas mediante el método de precipitación química. La presencia de una banda característica alrededor de 510 cm^{-1} se atribuye a las vibraciones de estiramiento del enlace Zn–O, lo cual es indicativo de la formación del óxido metálico. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Chauhan y Bithel

(2025), quienes identificaron señales similares en el intervalo de 561-620 cm^{-1} para nanopartículas de ZnO, independientemente de la ruta de síntesis empleada. Asimismo, diversos estudios previos sobre ZnO obtenido por métodos químicos de precipitación señalan que la aparición de bandas en la región de baja frecuencia del espectro infrarrojo constituye un indicador confiable de la cristalización del ZnO tras procesos adecuados de secado y calcinación controlada.

En contraste con los sistemas de síntesis verde reportados por Chauhan y Bithel (2025), en los que se observan bandas intensas en el rango de 3000-3500 cm^{-1} asociadas a grupos hidroxilo, amidas y compuestos fenólicos provenientes de extractos vegetales, el espectro FT-IR obtenido en este estudio no presenta picos significativos en dicha región. Esta ausencia sugiere una eliminación eficiente de residuos orgánicos y agentes precipitantes durante las etapas de lavado, secado y calcinación. Lo anterior coincide con lo reportado por otros autores para nanopartículas de óxido de zinc obtenidas mediante métodos químicos de precipitación y calcinadas a temperaturas superiores a 400 °C, condiciones que favorecen la obtención de materiales con mayor pureza superficial y mínima interferencia orgánica (Qu. et al., 2025).

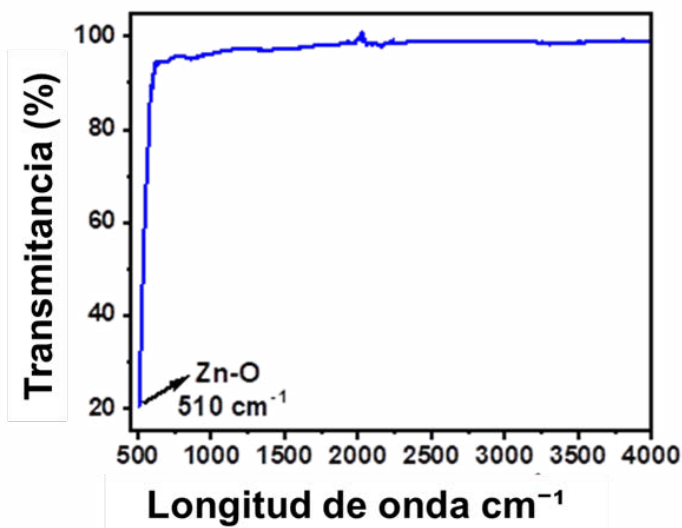
Desde un punto de vista comparativo, Mim et al. (2025) señalan que la presencia de grupos funcionales residuales en las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas mediante rutas verdes puede contribuir a su estabilización coloidal; sin embargo, también puede modificar la química superficial del material. En este sentido, los resultados del presente estudio indican que el método químico empleado favorece la obtención de nanopartículas de óxido de zinc con una superficie predominantemente inorgánica, característica que puede resultar ventajosa para aplicaciones agrícolas, donde se busca una liberación controlada de Zn^{2+} y una interacción directa con los tejidos vegetales sin interferencias de compuestos orgánicos externos.

En conjunto, la concordancia entre la banda característica Zn-O observada en el espectro FT-IR y la ausencia de señales orgánicas intensas respalda la efectividad del método de precipitación química y del tratamiento térmico aplicado para la obtención de nanopartículas de óxido de zinc con alta pureza estructural. Estos resultados se encuentran en

línea con lo reportado en estudios previos sobre ZnO-NPs destinadas a aplicaciones tecnológicas y agroambientales.

Figura 1

Espectro FT-IR de NPs ZnO obtenidas por precipitación.



La micrografía mostrada en la Figura 2 reveló una morfología granular e irregular, con partículas micrométricas formadas por la aglomeración de nanopartículas primarias y una distribución heterogénea de tamaños. Este comportamiento es característico de partículas de óxido de zinc sintetizadas mediante métodos de precipitación química y sometidas a procesos de secado y calcinación, donde la elevada energía superficial del ZnO favorece la atracción interparticular y la formación de agregados compactos. Resultados similares fueron reportados por Mohan y Renugadevi (2016), quienes observaron una marcada aglomeración en ZnO-NPs obtenidas sin el uso de agentes estabilizantes, atribuyendo este fenómeno a la acción de fuerzas físicas débiles y a la sinterización parcial inducida por el tratamiento térmico.

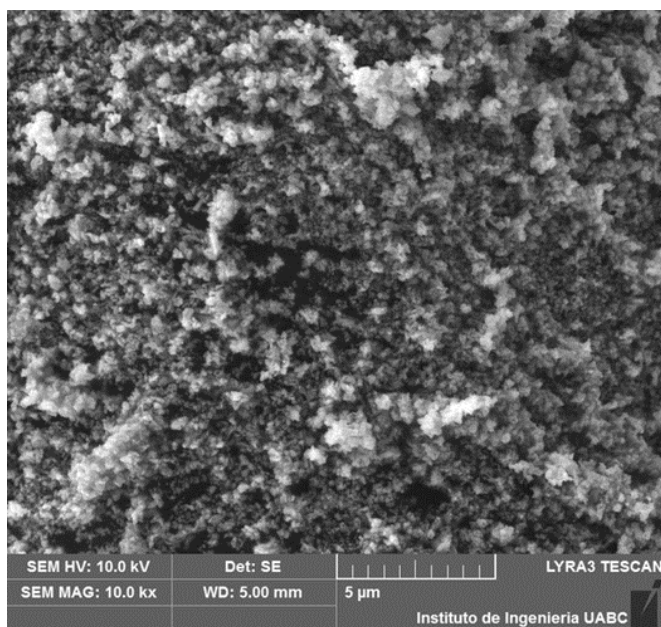
De manera comparable, Hussain et al. (2025) describieron morfologías irregulares, aglomeradas y superficies rugosas en ZnO-NPs sintetizadas

mediante rutas verdes, asociadas a la elevada energía superficial del material y a las interacciones interparticulares durante los procesos de nucleación y crecimiento. En este sentido, la ausencia de agentes estabilizantes durante la síntesis favorece la formación de agregados, sin que ello limite necesariamente su funcionalidad.

Desde una perspectiva aplicada, la presencia de superficies rugosas y agregados compactos puede considerarse favorable para aplicaciones agrícolas, ya que incrementa el área superficial efectiva y puede facilitar la liberación gradual de iones Zn^{2+} , así como una mayor interacción con los sistemas biológicos. Este comportamiento ha sido previamente señalado para ZnO-NPs con morfologías similares en estudios orientados a aplicaciones agroambientales.

Figura 1

Imágenes SEM de nanopartículas de ZnO.



Conclusión

La síntesis de las partículas de óxido de zinc por precipitación química permitió obtener un material con propiedades físico-químicas adecuadas para su potencial aplicación agrícola. La caracterización por FT-IR confirmó la formación de Zn o cristalino y una alta pureza del material, mientras que el análisis evidenció una morfología granular e irregular con aglomeraciones, micrométrica y superficies rugosas, atribuibles a la elevada energía superficial del ZnO y a la ausencia de agentes estabilizantes. En conjunto, estas características respaldan el potencial de las ZnO-NPs como una alternativa prometedora para la mitigación del estrés salino en plantas y para futuras evaluaciones biológicas en sistemas agrícolas.

Referencias

- Meng, Y., Feng, Y., Bai, X., Yu, Q., Zhou, J., & Wang, J. (2025). Application of nanotechnology in agricultural sustainability: Absorption, translocation, and challenges of nanoparticles. *Current Plant Biology*, 100492.
- Dogan, Y., Alam, P., Sultan, H., Sharma, R., Soysal, S., Baran, M. F., & Faizan, M. (2025). Zinc oxide nanoparticles for sustainable agriculture: A tool to combat salinity stress in rice (*Oryza sativa*) by modulating the nutritional profile and redox homeostasis mechanisms. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101598.
- Li, M., Zhao, X., Cheng, Y., Wu, M., Dong, C., Xiang, H., ... & Yu, B. (2025). Zinc oxide nanoparticles coupled biochar-based slow-release fertilizer for enhanced nutrient efficiency and sustainable agriculture. *Industrial Crops and Products*, 232, 121265.
- Chauhan, C., & Bithel, N. (2025). Phytogenic Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Lepidium sativum* Leaf Extract: Evaluation of Antibacterial and Cytotoxic Properties. *Next Research*, 100860.
- Noei, H., Wöll, C., Muhler, M., & Wang, Y. (2011). The interaction of carbon monoxide with clean and surface-modified zinc oxide nanoparticles: A UHV-FTIRS study. *Applied Catalysis A: General*, 391(1-2), 31-35.

- Mim, J. J., Sarker, M. A. H., Rahman, S. M., Hasan, M. J., Alom, M. S., Islam, S., & Hossain, N. (2025). Green Synthesis, Characterization, and in Vitro Biomedical Applications of Diospyros blancoi Synthesized Copper and Zinc Oxide Nanoparticles. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100656.
- Sharmila, S., Shandhiya, M., Riyas, Z. M., Saranya, A., Muthu, S. E., Muthusami, S., ... & Faiyazuddin, M. (2025). From waste to value through sustainable synthesis of zinc oxide and nickel oxide Nanoparticles using Selenicereus undatus Peel extract: Anticancer activity against pancreatic Cancer cell line (PANC-1). *Results in Chemistry*, 102900.
- Mohan, A. C., & Renjanadevi, B. J. P. T. (2016). Preparation of zinc oxide nanoparticles and its characterization using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). *Procedia Technology*, 24, 761-766.
- Mohammed, F. S., Uysal, I., Sevindik, E., & Sevindik, M. S. (2023). Genus ocimum in terms of mineral, nutrient, chemical contents and biological activity. *Journal Of Microbiology Biotechnology And Food Sciences*, e9781. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.9781>
- Qu, B., Xiao, Z., & Luo, Y. (2025). Sustainable nanotechnology for food preservation: Synthesis, mechanisms, and applications of zinc oxide nanoparticles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101743.

