

Evaluación de las propiedades de ZnO dopado con metales alcalinos (Na, K) obtenido a través del extracto de la naranja agria

Jazmín María Gamboa Sosa*, Irving Josué González Chan, Durcy Verenice Ruiz Ciau, Miguel Arcadio Rosado Mendoza.

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México 97069

Fecha de recepción: 20 de enero de 2026 - Fecha de aceptación: 24 de agosto de 2026

Resumen

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor con una energía de banda prohibida entre 3.36 y 3.44 eV a temperatura ambiente, el cual destaca por sus propiedades ópticas y estabilidad química. Frente a las limitaciones y toxicidad de los métodos convencionales para obtenerlo, la síntesis verde con *Citrus aurantium L.* ofrece una alternativa sostenible para controlar su crecimiento cristalino. Aunado a ello, el dopaje mejora sus propiedades al favorecer la generación de pares electrón-hueco y reducir la recombinación de cargas, lo que aumenta la sensibilidad del material hacia el espectro visible. Esta modificación estructural incrementa la eficiencia del ZnO en aplicaciones como fotocátalisis y celdas solares. En el presente trabajo se sintetizaron nanopartículas de ZnO dopadas con sodio (Na) y potasio (K) al 10% en masa siguiendo una ruta sol-gel modificada. Las muestras fueron caracterizadas mediante espectroscopía infrarroja, espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía ultravioleta-visible. Los resultados demostraron la formación de la fase hexagonal wurtzita con tamaños de cristalito de ~39 nm e incorporaciones atómicas de 4.96% para Na y 1.51% para K. Se observó una morfología de nanobarras compactas para el dopado con sodio y de estructuras tipo coral para el dopado con potasio. El dopaje indujo una reducción de la energía de banda prohibida a 3.18 eV. Este estudio demuestra que esta metodología permite modular las propiedades del ZnO mediante la elección del dopante alcalino, facilitando su adaptación para aplicaciones en celdas solares, sensores y remediación ambiental.

Palabras clave: Óxido de zinc, dopado, metales alcalinos, naranja agria, sodio y potasio.

Evaluation of the properties of alkali metal (Na, K) doped ZnO synthesized using sour orange extract.

Abstract

Zinc oxide (ZnO) is a semiconductor material with a bandgap energy ranging from 3.36 to 3.44 eV at room temperature, distinguished by its optical properties and chemical stability. To overcome

*A15004062@alumnos.uady.mx

the limitations and toxicity associated with conventional synthesis methods, green synthesis mediated by *Citrus aurantium* L. extracts provides a sustainable alternative for controlling crystalline growth. Furthermore, doping enhances its properties by promoting electron-hole pair generation and reducing charge recombination, which increases the material's sensitivity to the visible spectrum. This structural modification improves ZnO efficiency in applications such as photocatalysis and solar cells. In the present work, ZnO nanoparticles doped with 10 wt% sodium (Na) and potassium (K) were synthesized via a modified sol-gel route. The samples were characterized using infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and ultraviolet-visible spectroscopy. Results demonstrated the formation of the hexagonal wurtzite phase with crystallite sizes of approximately 39 nm and atomic incorporations of 4.96% for Na and 1.51% for K. A morphology of compact nanorods was observed for Na-doping, while coral-like structures were identified for K-doping. Doping induced a reduction in the bandgap energy to 3.18 eV. This study demonstrates that the methodology allows for the modulation of ZnO properties through the selection of the alkali dopant, facilitating its adaptation for applications in solar cells, sensors, and environmental remediation.

Keywords: Zinc oxide, doped, alkali metal, sour orange, sodium and potassium.

Introducción

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor de tipo n con una energía de banda prohibida directa que oscila entre 3.36 y 3.44 eV a temperatura ambiente. Batra et al (2022) señala que este material destaca por su alta estabilidad térmica y mecánica, además de poseer una naturaleza no tóxica y bajo costo de producción. Debido a su estructura electrónica, el ZnO presenta una alta fotosensibilidad y movilidad electrónica, cualidades que permiten su integración en sectores como la cosmética, farmacéutica y electrónica. La obtención de nanopartículas de ZnO se ha realizado tradicionalmente mediante métodos físicos como la evaporación-condensación y métodos químicos como la reducción. Sin embargo, Naiel et al. (2022) señalan que los métodos físicos requieren equipos sofisticados y un alto consumo energético. Por su parte, González et al. (2025) menciona que los métodos químicos suelen emplear precursores volátiles y tóxicos, como el amoníaco, generando residuos de difícil tratamiento y exigiendo procesos térmicos posteriores que elevan los costos operativos. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de alternativas sustentables mediante

la química verde, donde se propone el aprovechamiento de subproductos orgánicos para la síntesis de nanomateriales, priorizando la seguridad ecológica y la viabilidad económica. Esta ruta permite un control versátil sobre la morfología de las partículas, facilitando la obtención de diversas estructuras como esferas o barras de escala nanométrica (Castro et al., 2025). Por su parte, la naranja agria (*Citrus aurantium* L.) posee una relevancia cultural importante en la Península de Yucatán, puesto que según la Secretaría de agricultura y desarrollo social (2025) se registran más de 20,000 hectáreas dedicadas al cultivo de cítricos; de esta superficie, el 70% corresponde a la producción de variedades de naranja. Si bien el jugo de este fruto es un pilar de la economía y la identidad gastronómica regional, componentes como la cáscara suelen descartarse, generando volúmenes considerables de residuos orgánicos, los cuales son ricos en fitoquímicos como flavonoides, limonoides y carotenoides. Estos compuestos actúan como agentes quelantes que coordinan los iones de zinc, controlando la cinética de nucleación y estabilizando las nanoestructuras durante la síntesis. Para optimizar las propiedades del ZnO, el dopaje con metales

alcalinos es una estrategia fundamental. Elangovan et al. (2015) indican que el sodio (Na) mejora la generación de pares electrón-hueco debido a su bajo potencial de ionización. Asimismo, Bhaviya et al. (2016) reportan que el potasio (K), al poseer un radio iónico mayor, genera una separación de cargas eficiente en la superficie, reduciendo la recombinación de portadores. Estas modificaciones amplían la sensibilidad del material hacia el espectro visible, permitiendo aplicaciones avanzadas en fotocatalisis y dispositivos optoelectrónicos como celdas solares. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del dopaje con sodio y potasio sobre las propiedades ópticas, estructurales, morfológicas y composicionales de nanopartículas de ZnO obtenidas mediante síntesis verde asistida por extractos de naranja agria.

Metodología

La síntesis de las nanopartículas de ZnO dopadas se basó en la metodología de González et al. (2025). Se recolectó exocarpo de *Citrus aurantium L.*, se secó a 120 °C por 2 horas y se trituró hasta obtener un polvo fino. Se preparó una mezcla de 3 g de polvo en 50 mL de una solución agua-etanol (50:50 v/v), sometiéndola a un baño de ultrasonido (20 kHz) durante 15 minutos. Tras filtrar, se añadieron 20 mL de jugo de naranja agria y se calentó la mezcla a 60 °C. Al alcanzar la temperatura, se agregaron 3 g de acetato de zinc. La modificación principal consistió en la adición simultánea de sales dopantes: NaCl para la muestra ZnO:Na 10 y KCl para la muestra ZnO:K 10, en una proporción del 10% respecto a la masa del precursor (0.3 g cada una). La mezcla se mantuvo en agitación entre 60 y 70 °C por una hora. El precipitado obtenido se filtró, se secó a 110 °C y finalmente se calcinó a 800 °C durante una hora en mufla.

Todas las caracterizaciones se aplicaron tanto a la muestra de referencia (ZnO puro) como a las

muestras dopadas (ZnO:Na 10 y ZnO:K 10). La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) se realizó en un espectrómetro FTIR Thermo Scientific Nicolet iS5 con accesorio ATR iD7 (cristal de diamante), y se analizaron en el rango de 4000-500 cm^{-1} , con resolución de 8 cm^{-1} y 32 escaneos. Para la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) se empleó un equipo K-alpha Thermo Scientific. Las muestras fueron preparadas mediante una erosión de 15 segundos para eliminar cualquier tipo de contaminación superficial. Se realizó un barrido de alta resolución utilizando una fuente de aluminio $\text{K}\alpha$, en un rango de 0 a 1350 eV. Para la difracción de rayos X (DRX) se utilizó un difractómetro Bruker D8-ADVANCE en modalidad de Bragg (polvos). El equipo operó con un tiempo de paso de 0.1 segundos y un tamaño de paso de 0.02°, irradiando a 40 kV con un tubo de cobre $\text{K}\alpha 1$. El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido FESEM-JEOL. Las muestras se colocaron en un soporte metálico, adheridas con cinta de carbono de doble cara y cubiertas con una aleación de Au/Pd para mejorar la conductividad. Las imágenes de la morfología de las nanopartículas fueron obtenidas con un voltaje de aceleración de 10 kV y un aumento de 5,000x. Para la espectroscopía de Ultravioleta visible (UV-Vis) se utilizó un equipo Jasco V-750 equipado con esfera de integración. Este análisis se realizó en un rango de 190 a 900 nm.

Resultados y discusiones

Espectroscopía Infrarroja (FTIR)

El análisis por FTIR reveló una banda intensa a $\sim 510 \text{ cm}^{-1}$ asignada a la vibración del enlace Zn-O, confirmando la formación de la red cristalina (Fig. 1). Se observaron desplazamientos en esta banda para las muestras dopadas (508.62 cm^{-1} para Na y

501.05 cm^{-1} para K), lo que indica tensiones en la red por la incorporación iónica. Adicionalmente, persistieron bandas en ~ 880 y ~ 1040 cm^{-1} que corresponden al estiramiento del enlace C-O, siendo esta última atribuida al complejo Zn-Feofitina, el cual protege y estabiliza la materia orgánica residual en la superficie del ZnO incluso a temperaturas

elevadas (Pettersson et al. 2022). El complejo forma una capa superficial que no se descompone completamente a 800 °C, manteniendo la huella molecular de sus vibraciones C-O firmemente ancladas a la superficie del ZnO, lo que explica la persistencia de materia orgánica después de la calcinación.

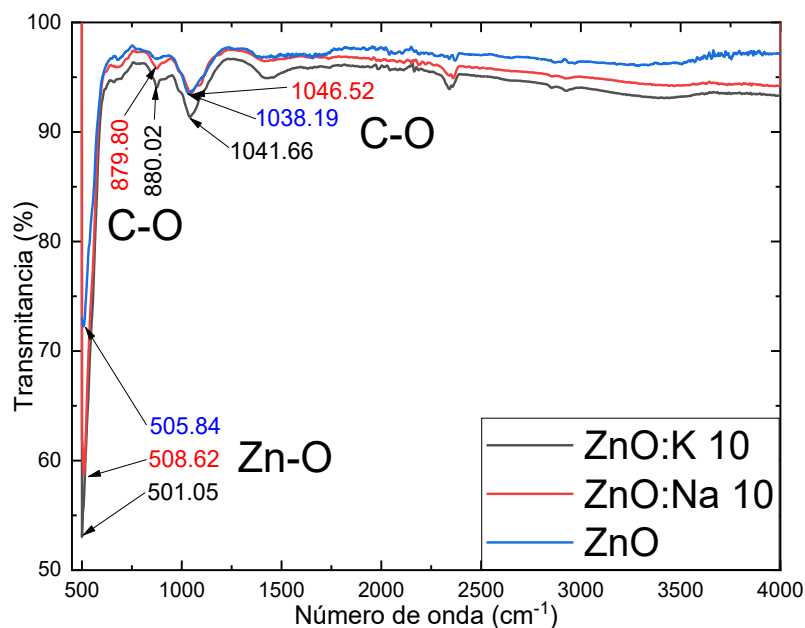


Figura 1. Espectro de las nanopartículas de ZnO sin dopar (línea azul) y dopadas con sodio (línea roja) y potasio (línea negra).

Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS)

El XPS permitió identificar los estados de oxidación y cuantificar la incorporación de los metales. Los espectros del Zn 2p muestran un doblete característico para los orbitales Zn 2p_{3/2} y Zn 2p_{1/2}, con una separación de aproximadamente 23.0 eV en todas las muestras (Fig. 2). Este valor indica el estado de oxidación Zn²⁺, por lo que el zinc se encuentra enlazado con el oxígeno (Saaédi & Yousefi, 2017). Complementariamente, la deconvolución del espectro asimétrico del O 1s revela dos componentes principales. El pico

más intenso, a una baja energía de enlace de ~ 529.8 eV, se atribuye al oxígeno de la red cristalina (O²⁻), es decir, a los enlaces Zn-O que constituyen la estructura wurtzita (González et al. 2025). Esta es la señal dominante en todas las muestras (Fig. 3). El segundo componente del espectro O 1s, a una energía de enlace mayor (~ 531 eV), se asigna a especies de oxígeno superficial, principalmente carbonatos (CO₃²⁻) y/o hidroxilos (-OH). La presencia de estos grupos se justifica por la adsorción de CO₂ y humedad atmosférica sobre la superficie activa de las nanopartículas (Rjeb et al. 2004). Asimismo, las posiciones de las señales

principales tanto en los espectros de Zn 2p (doblete centrado en ~ 1022.3 eV y ~ 1045.3 eV) como en el componente principal del O 1s (~ 529.8 eV) permanecen prácticamente invariables en todas las muestras dopadas, dentro del margen de error experimental (Fig. 3). Esta consistencia en las energías de enlace

indica que la incorporación de los dopantes no induce cambios químicos significativos en los estados de oxidación del Zn^{2+} ni en los enlaces Zn-O fundamentales de la red cristalina. Los dopantes, por tanto, se integran en la estructura sin alterar químicamente la naturaleza del óxido de zinc base.

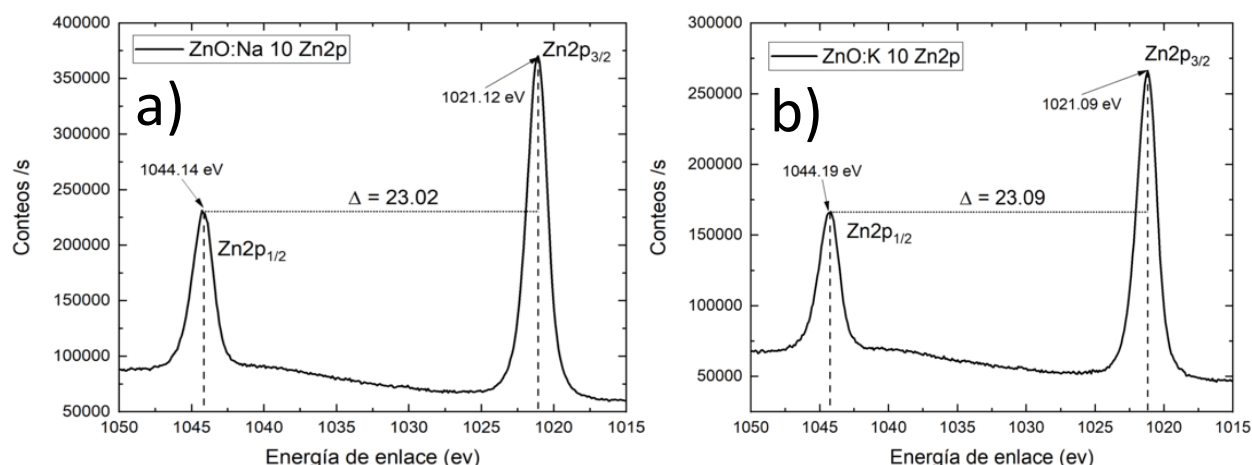


Figura 2. Espectros de XPS de Zn2p para las muestras ZnO:Na 10 (a) y ZnO:K 10 (b).

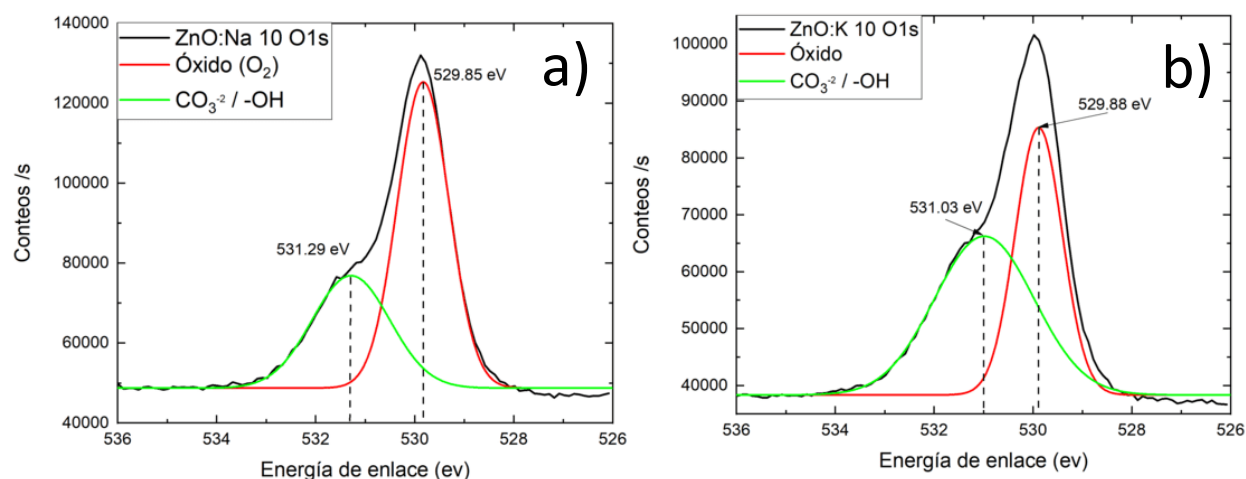


Figura 3. Espectros de XPS de O 1s para las muestras ZnO:Na 10 (a) y ZnO:K 10 (b).

En las muestras dopadas con sodio, se detecta un pico único y simétrico para el orbital Na 1s a ~ 1071 eV, lo que indica que el sodio se incorpora en un único estado químico (Fig. 4a).

Por otro lado, los espectros del K 2p en las muestras dopadas con potasio muestran un doblete claro K 2p_{3/2} y K 2p_{1/2} (Fig. 4b). Este hallazgo es consistente con el estudio de Saaédi

& Yousefi (2017), quienes también identificaron K^+ en ambas posiciones en sus nanobarras de ZnO.

La coexistencia de K^+ en sitios sustitucionales e intersticiales es un mecanismo conocido para la generación de defectos, como vacancias de oxígeno, lo que explica por qué el componente de oxígeno superficial (~ 531 eV) es más prominente en las muestras dopadas con potasio. La mayor concentración de estos defectos, como lo sugieren los resultados de Saaédi, A. et al. (2017) es una característica muy deseable, ya que estos sitios actúan como centros activos para aplicaciones en catálisis. El análisis cuantitativo revela la presencia de

4.96% atómico de sodio en la muestra ZnO:Na 10 y 1.51% atómico de potasio en las muestras ZnO:K 10 (Tabla 1). Se observó una mayor incorporación por parte del sodio en comparación con el potasio, ya que el porcentaje atómico de Na en la muestra final es más del triple que el de K. Esta diferencia se puede explicar por la diferencia molar entre ellos, por lo que al añadir la misma masa de precursores (NaCl y KCl), se introduce una cantidad molar mayor de sodio (masa atómica ~ 23 g/mol) que de potasio (masa atómica ~ 39 g/mol); por lo tanto, desde el inicio hay más átomos de Na disponibles en la solución para ser incorporados (Bharathi et al., 2014; Kumari et al., 2023).

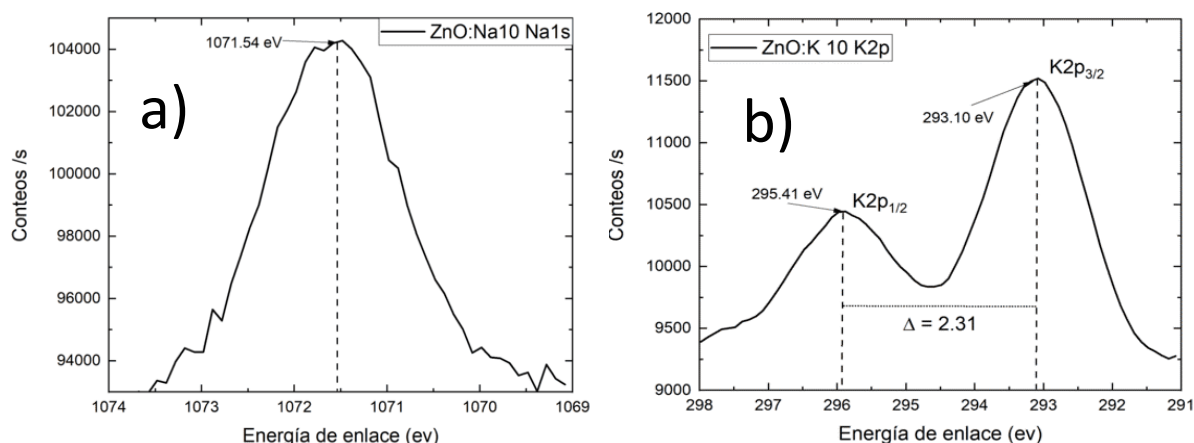


Figura 4. Espectros de XPS de Na 1s para las muestras ZnO:Na 10 (a) y de K 2p para la muestra ZnO:K 10 (b).

Tabla 1. Comparación de composición atómica porcentual de Zn, O, Na, K y Cl de las muestras analizadas.

Muestra	Zn (%)	O (%)	Zn/O	Na (%)	K (%)	Cl (%)
ZnO:Na 10	42.32	52.72	0.80	4.96	-	-
ZnO:K 10	41.51	56.98	0.73	-	1.51	-

Difracción de rayos X (XRD)

Los difractogramas de todas las muestras sintetizadas muestran un patrón de difracción

dominante que se corresponde de manera inequívoca con la fase hexagonal wurtzita del ZnO (JCPDS No. 36-1451). Los picos de difracción intensos y bien definidos

correspondientes a los planos cristalinos (100), (002) y (101), son una clara evidencia de la alta cristalinidad del material. Esta cristalinidad es un resultado directo del proceso de calcinación a 800 °C, que permite la completa descomposición de los precursores y la consolidación de la estructura. En las muestras dopadas se observa que, tanto en el caso del

ZnO:Na 10 como en el del ZnO:K 10, los difractogramas son similares al del ZnO puro, y no se detectan picos correspondientes a contaminantes (Fig. 5). La ausencia de señales de óxidos como Na₂O o K₂O, o de sales como NaCl y KCl, evidencia que a esta concentración los iones Na⁺ y K⁺ no están formando los compuestos antes mencionados.

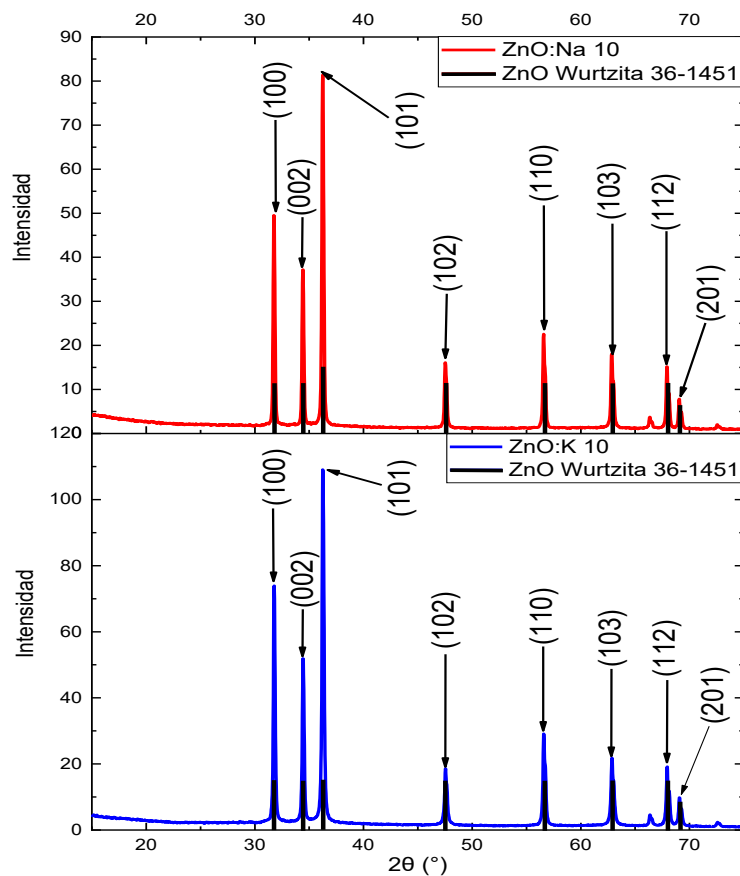


Figura 5. Difractogramas de DRX de las muestras ZnO:Na 10 (línea roja) y ZnO:K 10 (línea azul).

Por su parte, las muestras dopadas exhiben tamaños de cristalito promedio de 39.9 ± 1.1 nm para ZnO:Na 10 y 38.5 ± 2.5 nm para ZnO:K 10 (Tabla 2). Un mayor tamaño de cristalito está directamente relacionado con una estructura más ordenada y con menos fronteras de grano, lo cual es deseable para muchas

aplicaciones electrónicas y ópticas (Khorsand, 2017). En estudios previos, se ha reportado que el tamaño de los cristalitos de ZnO puede variar típicamente entre 20 nm y 80 nm dependiendo del método de síntesis y los precursores (Sumaya et al. 2023).

Tabla 2. Tamaño del cristalito para los picos principales del ZnO dopado con Na y K.

Muestra	100 (nm)	002 (nm)	101 (nm)	Promedio (nm)
ZnO:Na 10	41.2	39.2	39.4	39.9 ± 1.1
ZnO:K 10	41.2	38.0	36.2	38.5 ± 2.5

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes obtenidas permiten observar la formación de estructuras nanométricas complejas, cuya morfología es notablemente distinta en función del ion dopante empleado. En las micrografías de las muestras dopadas con potasio (Fig. 6a) se puede observar una morfología similar a la de un coral. Estas estructuras tridimensionales están compuestas por una multitud de nanoláminas o pétalos densamente interconectados desde un núcleo común, creando un material con una elevada porosidad y una vasta área superficial. Esta formación es sumamente favorable para aplicaciones en donde se requiere maximizar el contacto con el entorno.

La formación de estas morfologías complejas es indicativa del efecto del dopante. El estudio de Manivannan, N. et al. (2022) también

reportó una transición de morfologías de tipo flor a varilla dependiendo del dopante alcalino utilizado, lo que respalda nuestra observación de que el potasio promueve la formación de estas estructuras. En contraste, las muestras dopadas con sodio exhiben una morfología diferente (Fig. 6b). Las imágenes revelan que las partículas primarias que componen estos aglomerados son nanobarras cortas densamente empaquetadas, formando cúmulos compactos sin la estructura abierta y porosa observada en el caso del potasio. Este fenómeno de aglomeración en presencia de sodio es consistente con los hallazgos de Elangovan, S. et al. (2015), quienes reportaron que el dopaje con Na en ZnO resultaba en una mayor aglomeración y crecimiento del grano. Los resultados obtenidos demuestran que, en el sistema estudiado, este crecimiento se manifiesta en la formación de nanobarras que posteriormente se compactan.

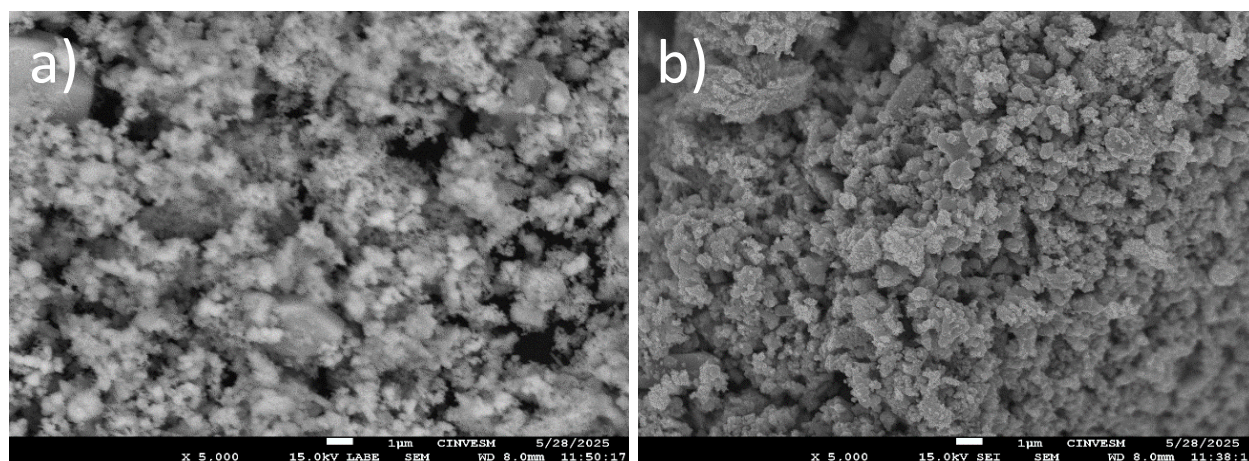


Figura 6. Micrografías SEM de nanopartículas de ZnO dopadas con potasio (a) y sodio (b) a 5000x.

En cuanto a las nanopartículas de ZnO sin dopar, el estudio de González *et. al.* (2025) establece que, al ser calcinado a 800°C, sufre una completa transformación morfológica que resulta en la formación de cristales prismáticos, grandes y bien definidos (Fig. 7). Esta es la

morfología termodinámicamente estable que se espera para el ZnO con alta cristalinidad. Lo que indica que existe un importante impacto de los iones alcalinos en los mecanismos de crecimiento y cristalización del ZnO a 800°C.

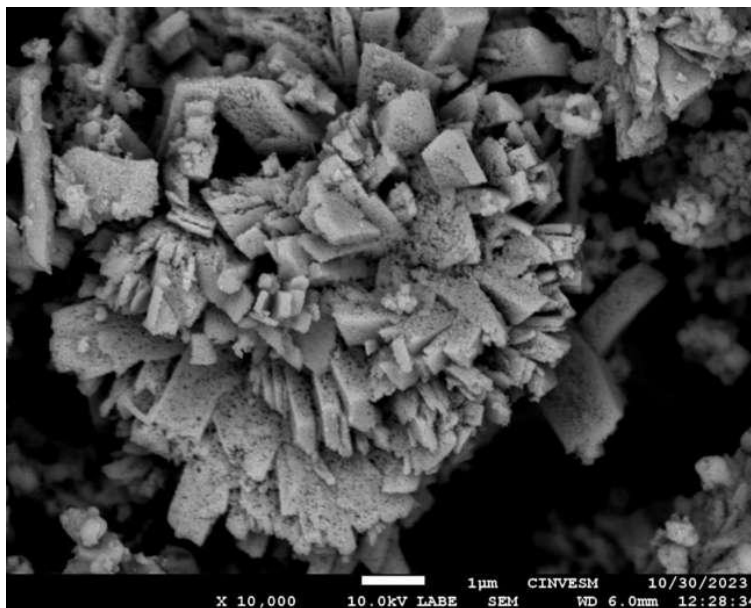


Figura 7. Micrografías SEM de NPs de ZnO a 10000x, tomada de González, et al. (2025).

La diferencia morfológica entre la formación abierta y porosa tipo coral del ZnO:K y los aglomerados densos de nanobarras del ZnO:Na demuestra la importancia del ion dopante en los procesos de nucleación y crecimiento del ZnO. El ion K^+ , de mayor radio iónico, claramente favorece un crecimiento anisotrópico que da lugar a las complejas nanoláminas que forman el coral. Por otro lado, el ion Na^+ también promueve un crecimiento anisotrópico, pero en forma de nanobarras que tienden a compactarse.

Espectroscopía de Ultravioleta visible (UV-Vis)

El análisis de la energía de banda prohibida (band gap o E_g), calculada mediante las gráficas de Tauc, demuestra que el dopaje al 10% logra reducir el del band gap hasta 3.18 eV (Fig. 8) sin comprometer la alta pureza cristalina y calidad estructural del material, balance que según Elangovan, S. et al. (2015) permite a los portadores de carga mantener una vida media extendida, maximizando su participación en reacciones superficiales, de igual manera, Saaédi, A. et al. (2017) menciona que la capacidad de generar niveles energéticos beneficiosos sin comprometer la integridad del cristal es una característica ideal para aplicaciones fotocatalíticas prácticas.

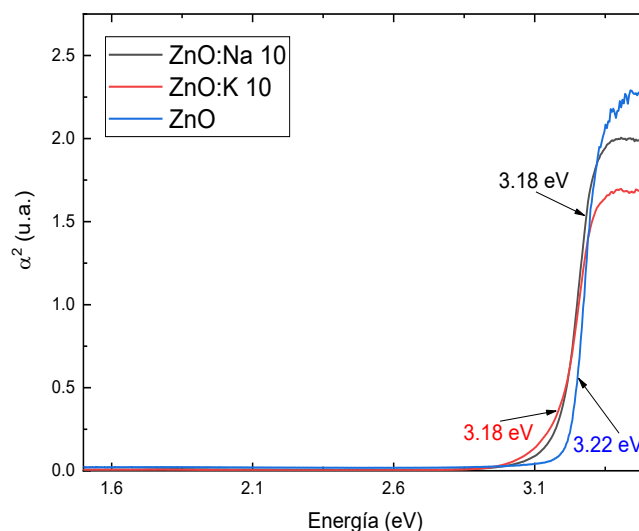


Figura 8. Gráfica de Tauc de las muestras de ZnO dopadas con Na y K al 10% en relación con la masa del acetato

Para contextualizar este estudio, la Tabla 3 resume y compara los métodos de obtención, propiedades y aplicaciones de investigaciones recientes sobre ZnO, donde se resalta el uso de

extractos naturales y dopantes alcalinos para mejorar el rendimiento del ZnO en aplicaciones ambientales y tecnológicas.

Tabla 3. Comparativa de estudios de obtención de ZnO, sus propiedades fisicoquímicas y aplicaciones.

Estudio	ZnO dopado	Método de obtención	Propiedades fisicoquímicas	Aplicaciones
Este trabajo	Sodio y potasio	Síntesis verde con <i>Citrus aurantium L.</i>	Fase hexagonal wurtzita, alta cristalinidad, tamaño de cristalito de 38-40 nm y defectos superficiales.	Membranas, celdas solares y fotocátalisis.
Manivannan et al. (2022)	Potasio, rubidio y cesio	Método solvothermal.	Variaciones morfológicas de flores a varillas según el radio atómico del dopante.	Adsorción selectiva de iones de Níquel
Tabib et al. (2016)	Sodio	Sol-gel con ácido cítrico.	Estructura hexagonal, distorsión de red (estrés) y alta densidad de vacancias de oxígeno.	Fotocátalisis de Rodamina B bajo irradiación solar.

Bharathi et al. (2013)	Potasio	Método químico húmedo.	Aumento de parámetros de red, volumen de celda y mejora en la emisión azul.	LEDs y sensores químicos/biológicos.
Elamin et al (2021)	Cromo	Sol-gel.	Mejora en el rendimiento bajo luz visible frente al ZnO puro.	Fotodegradación de Rojo Congo
Elangovan et al. (2015)	Sodio	Método químico húmedo.	Incorporación exitosa de Na en la red sin alterar la fase wurtzita.	Decoloración fotocatalítica de Azul de Metileno

Conclusiones

El presente estudio se estableció una ruta para la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) dopadas con sodio y potasio empleando el método sol-gel con extractos de la cáscara y el jugo de *Citrus aurantium L.* El análisis FTIR confirmó la formación del enlace vibracional Zn-O alrededor de 510 cm^{-1} , y detectó la presencia de residuos orgánicos termoestables asociados al complejo Zn-Feofitina a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que sugiere la alta estabilidad de esta capa superficial protectora. El XPS comprobó la presencia del enlace Zn-O y la incorporación de los dopantes Na y K. El análisis mediante DRX confirmó la obtención de una fase wurtzita pura y altamente cristalina, con un tamaño promedio de cristalito entre 39 nm y 40 nm. El estudio SEM indicó que el dopaje influyó en la morfología, generando desde nanobarras aglomeradas con Na hasta estructuras porosas tipo coral de alta área superficial con K. Ópticamente, la espectroscopía UV-Vis mostró una reducción del band gap de energía de 3.22 a 3.18 eV, lo que indica una mejora en la capacidad de absorción de luz visible. Esta metodología permite controlar las propiedades del ZnO mediante la elección del dopante

alcalino, permitiendo así adaptar el material a aplicaciones específicas como el desarrollo de membranas de filtración, sensores de radiación UV, celdas solares y procesos de fotodegradación de contaminantes industriales.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECHITI) por el apoyo otorgado mediante la beca con número de folio 4041553, la cual ha permitido el desarrollo de este proyecto de investigación. Al laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Química por el equipamiento e instrumentación. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO), CINVESTAV-IPN. Agradecemos a la Dra. Patricia Quintana por el acceso a LANNBIO, al M.C. Daniel Aguilar por la obtención de los difractogramas, al Ing. Wilian Cauich por el Mediciones XPS, al Dr. Víctor Rejón para las imágenes SEM y al Dr. Santiago González por los espectros FTIR.

Referencias

- Batra, V., Kaur, I., Pathania, D., Sonu, & Chaudhary, V. (2022). Efficient dye degradation strategies using green synthesized ZnO-based nanoplateforms: A review. *Applied Surface Science Advances*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100314>
- Bharathi, V., Sivakumar, M., Udayabhaskar, R., Takebe, H., & Karthikeyan, B. (2014). Optical, structural, enhanced local vibrational and fluorescence properties in K-doped ZnO nanostructures. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 116(1), 395–401. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8139-8>
- Bhaviya Raj, R., Umadevi, M., Poornima Parvathi, V., & Parimaladevi, R. (2016). Effect of potassium on structural, photocatalytic and antibacterial activities of ZnO nanoparticles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/2043-6262/7/4/045008>
- Castro-Sandoval, M. M., Montes-Rubio, T., Garrafa-Gálvez, H. E., Orozco-Carmona, V. M., Perea-Domínguez, X. P., Luque-Morales, P. A., & Chinchillas-Chinchillas, M. de J. (2025). Síntesis verde de nanopartículas de ZnO mediante *Lippia alba* y su aplicación en la degradación de contaminantes orgánicos. *Bioc Scientia Universidad Autónoma De Occidente*, 2(1). <https://doi.org/10.63622/RBS.2510>
- Elamin, N., Modwi, A., Aissa, M. A. B., Taha, K. K., Al-Duaij, O. K., & Yousef, T. A. (2021). Fabrication of Cr–ZnO photocatalyst by starch-assisted sol–gel method for photodegradation of congo red under visible light. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(2), 2234–2248. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04988-y>
- Elangovan, S. V., Chandramohan, V., Sivakumar, N., & Senthil, T. S. (2015). Synthesis and characterization of sodium doped ZnO nanocrystals and its application to photocatalysis. *Superlattices and Microstructures*, 85, 901–907. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.07.004>
- Gonzalez-Chan, I. J., Rosado-Mendoza, M. A., Perez-Palma, M., Gamboa-Sosa, J., & Quej-Aké, C. (2025). Synthesis of ZnO nanoparticles through the use of sour orange (*Citrus aurantium L.*) and the study of its physicochemical properties at different calcination temperatures. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06775-9>
- Khorsand Zak, A. (2017). Cytotoxicity effects of synthesized ZnO and Zn_{0.97}X_{0.03}O (X=Li, Na, and K) nanoparticles by the gelatin-based sol-gel method. *Nanomed. J.*, 4(3), 170–176. <https://doi.org/10.22038/nmj.2017.8958>
- Kumari, H., Sonia, Suman, Ranga, R., Chahal, S., Devi, S., Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Kumar, A., & Parmar, R. (2023). A Review on Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06359-9>
- Manivannan, N., Sycheva, A., Kristály, F., Muránszky, G., & Baumli, P. (2022). Structural differences and adsorption behaviour of alkaline metals doped zinc oxide nanoparticles. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06092-z>
- Naiel, B., Fawzy, M., Halmy, M. W. A., & Mahmoud, A. E. D. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (*Limonium pruinosum L. Chaz.*) extract: characterization,

evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. Scientific Reports, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24805-2>

Petterson, A. R., de Lima, V. A., & Anaissi, F. J. (2022). Clorofila extraída de residuo industrial da erva-mate (*Ilex paraguaiensis*) uma possibilidade de economia circular. Quimica Nova, 45(7), 767–776. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170877>

Rjeb, M., Labzour, A., Rjeb, A., Sayouri, S., Chafik, M., Massey, S., Adnot, A., & Roy, D. (2004). Contribution to the study by X-ray photoelectron spectroscopy of the natural aging of the polypropylene. M. J. Condensed Matter, 5(2), 168–172. <https://www.researchgate.net/publication/2915266>

Saaédi, A., & Yousefi, R. (2017). Improvement of gas-sensing performance of ZnO nanorods by group-I elements doping. Journal of Applied Physics, 122(22). <https://doi.org/10.1063/1.5009249>

Secretaria de agricultura y desarrollo social. <https://www.gob.mx/agricultura/yucatan/articulos/naranja-agria-maravilla-de-nuestra-tierra>

Sumaya, M. U., Maria, K. H., Toma, F. T. Z., Zubair, M. A., & Chowdhury, M. T. (2023). Effect of stabilizer content in different solvents on the synthesis of ZnO nanoparticles using the chemical precipitation method. Heliyon, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20871>

Tabib, A., Bouslama, W., Sieber, B., Addad, A., Elhouichet, H., Férid, M., & Boukherroub, R. (2017). Structural and optical properties of Na doped ZnO nanocrystals: Application to solar photocatalysis. Applied Surface Science, 396, 1528–1538. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.204>