

**DESARROLLO, ANÁLISIS Y APLICACIÓN DEL
COMPOSITO $\text{Zn(OH)}_2 - \text{ZNO}$, EN FOTOCATÁLISIS, UNA
ALTERNATIVA PARA LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS**

**DEVELOPMENT, ANALYSIS AND APPLICATION OF THE
COMPOSITE $\text{Zn(OH)}_2 - \text{ZNO}$, IN PHOTOCATALYSIS, AN
ALTERNATIVE FOR WATER POLLUTION**

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

Vicencio Garrido, Marco Antonio¹

UVP Universidad del Valle de Puebla

marco.vicencio@uvp.edu.mx

ORCID: 0000-0002-2139-9597

Pacio Castillo, Abraham²

Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco

pacio1904@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7771-398X

Antonio Hernández, Claudia³

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

claudianhz@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6592-0834

Pacio Castillo, Mauricio⁴

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

mauricio.pacio@correo.buap.mx

ORCID: 0000-0002-4053-9962

Recibido el 26 de diciembre de 2024. Aceptado el 15 de abril de 2025. Publicado el 30 de abril de 2025.

Reseña de Autor ¹

Estudió Ingeniería Química en la BUAP, Maestro en Gestión en la Industria del Petróleo y Gas y Doctorado en Dispositivos Semiconductores, trabaja en conjunto con el cuerpo académico del Dr. Héctor Juárez – Dr. Mauricio Pacio denominado (BUAP-CA-316) denominado Materiales Semiconductores para la obtención de dispositivos fotónicos (BUAP-ICUAP), donde se desarrolla en el estudio, obtención y aplicación de dispositivos semiconductores con aplicación en fotocatalisis y celdas solares, por medio de la ruta química verde CBD; donde su objetivo es el obtener nanomateriales que puedan ser reutilizables en celdas solares y fotocatalisis.

Reseña de Autor ²

Mi formación es Licenciado en Electrónica en la BUAP, realizó la Maestría y Doctorado en el Posgrado de Dispositivos Semiconductores (PDS) del ICUAP, realizó estancias de investigación sobre celdas solares en la Universidad del Litoral en Santa Fe Argentina, así como estancias en IER-UNAM Temixco Morelos, realiza

colaboración con grupos de trabajo del PDS-ICUAP y de la UAM-Azcapotzalco. Las líneas de investigación con las que trabaja es obtención de materiales para la aplicación en celdas solares, sensores, baterías o acumuladores de carga (capacitores o super capacitores) y fotocatalisis. Actualmente, se encuentra realizando estancia posdoctoral en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Azcapotzalco) con un proyecto que se enfoca en la obtención de materiales tipo perovskita para la aplicación en celdas solares.

Reseña de Autor ³

Formación en Ingeniera en Electrónica egresada por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Ver. Maestría y Doctorado en Dispositivos Semiconductores egresada del Posgrado en Dispositivos Semiconductores del Instituto de Ciencias BUAP, trabaja en colaboración con la Universidad de Quintana Roo campus Chetumal, UAM-Azcapotzalco y UVP. Las líneas de investigación son sobre fabricación de materiales porosos; membranas de Alúmina y Silicio poroso, además de la síntesis de carbón activado a partir de materia orgánica (sargazo) y el desarrollo de prototipos de dispositivos de almacenamiento de energía como los supercapacitores o EDLC por sus siglas en inglés. Actualmente, Investigadora Posdoctorante en el Instituto de Ciencias BUAP.

Reseña de Autor ⁴

Dr. Mauricio Pacio Castillo, Profesor Investigador del Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores del Instituto de Ciencias de la BUAP desde el 2010. Miembro del SNII Nivel I. Pertenece al Cuerpo Académico BUAP-CA-316 Materiales Semiconductores para la obtención de Dispositivos Fotónicos. Los

temas que desarrolla son la obtención y caracterización de diversos materiales semiconductores para su potencial aplicación en dispositivos semiconductores como en celdas solares, acumuladores de carga, sensores, entre otros. Además, ha participado en la dirección y codirección de 35 tesis (20 de maestría y 15 de doctorado), y responsable de investigadores de Posdoctorado.

Resumen

El problema de la contaminación del agua por tintes industriales ha impulsado la investigación de nuevos materiales para mitigar este grave problema ambiental. Este estudio se enfoca en el desarrollo y aplicación de nanocompuestos de ZnO-Zn(OH)_2 obtenidos mediante la técnica de baño químico (CBD), un método de síntesis verde y de bajo costo. Se analizan las propiedades estructurales, morfológicas y ópticas del material mediante difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y espectroscopía UV-Vis.

Los resultados muestran la formación exitosa del compuesto con un tamaño de nanopartícula de ~ 16.1 nm y una morfología adecuada para la fotocatalisis. La aplicación fotocatalítica del material en la degradación del colorante azul de metileno demuestra una eficiencia de degradación cercana al 90% bajo luz solar. Este estudio destaca el potencial del composito ZnO-Zn(OH)_2 como una alternativa eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas.

Palabras clave: Compositos, Fotocatálisis, Química Verde, Contaminación, Baño Químico.

Abstract

The problem of water pollution with industrial waste dyes worldwide has drawn the attention of researchers to develop new materials capable of eliminating these chemicals that can cause respiratory problems, stomach diseases, and the development of chronic diseases such as cancer. One of the methods that have given the best results is the implementation of nanoparticles obtained by chemical methods, such as chemical bath (CBD), which is friendly to the environment and allows the development of nanomaterials for their photocatalytic application, for the degradation of dyes as industrial waste through the absorption of sunlight. The development of the photocatalytic field has employed a great variety of nano materials, as oxides, calcogenides, hydroxides, or composites, being these, materials allow us to maximize the properties of two materials in one, so they have had a new boom of application and research in the field of photocatalysis, as is the case of $ZnO-ZnOH$, which allows us to apply the properties of a highly used material such as ZnO and $ZnOH$, where ions (OH^-) presents in the composite, will enable us to have good degradation activity for polluting dyes present in contaminated water.

Keywords: Composites, Photocatalysis, ChemistryGreen, Pollution, Chemical Bath

Introducción

El problema de la contaminación del agua con colorantes de residuos industriales en todo el mundo ha llamado la atención de los investigadores para desarrollar nuevos materiales que sean capaces de eliminar estas sustancias químicas que pueden causar problemas respiratorios, enfermedades estomacales, así como el

desarrollo de enfermedades crónicas como el cáncer. Uno de los métodos que han dado mejores resultados es la implementación de nanopartículas obtenidas por métodos químicos, como el baño químico (por sus siglas en inglés CBD), que es una técnica amigable con el medio ambiente y que permite el desarrollo de nanomateriales para su aplicación fotocatalítica, en la degradación de colorantes como residuos industriales a través de la absorción de la luz solar. El desarrollo del campo fotocatalítico ha empleado una gran variedad de nanomateriales, como óxidos, calcogenuros, hidróxidos, o compositos, siendo estos, materiales que permiten maximizar las propiedades de dos materiales en uno, por lo que han tenido un nuevo auge de aplicación e investigación en el campo de la fotocatalisis, como es el caso de $ZnO-ZnOH$, lo que permite aplicar las propiedades de un material altamente utilizado como ZnO y, para el caso del $ZnOH$, altamente utilizado por los iones (OH^-) presentes en el compuesto, para tener una buena actividad de degradación en tintes contaminantes presentes en agua contaminada.

Planteamiento del problema

El problema de la contaminación del agua con tintes de desechos industriales a nivel mundial, ha ido gradualmente en aumento, lo que ha llamado la atención de los investigadores, por los efectos que pueden llegar a causar en todos los seres vivos, como: problemas respiratorios, enfermedades estomacales, así como el desarrollo de enfermedades crónicas respiratorias e, incluso, desarrollo de cáncer. Además, el problema de la contaminación del agua se agudiza, debido al incremento de las altas temperaturas causadas por efecto invernadero, por lo que provoca la escasez de los mantos acuíferos de todo el mundo, para ello,

la implementación de mecanismos de fotocatalisis para la purificación del agua con un bajo costo y altamente eficientes son sumamente importantes hoy en día.

La fotocatalisis es un proceso de purificación del agua, el cual puede ser implementado con nanomateriales semiconductores, que absorben y aprovechan la energía de la luz solar para generar pares de electrón-hueco, que promueven la degradación de los contaminantes orgánicos en el agua.

Revisión bibliográfica

El desarrollo, análisis y síntesis de nanopartículas han tenido gran éxito con el paso del tiempo, por el método Sol-gel (de acuerdo con Wang et al., 2013), vapor-sólido (Donthu et al., 2005), y síntesis coloidal, pero la técnica de deposición de baño químico (CBD), permite tener un claro control sobre el proceso, así como la obtención de los nano-compuestos que se obtienen paso a paso (Moreno et al., 2017). El proceso de obtención de materiales como hidróxidos, sulfuros, óxidos o compositos con amplia aplicación para contrarrestar contaminación del agua en todo el mundo, ha despertado gran interés para los investigadores por las propiedades morfológicas, ópticas, estructurales y eléctricas que presentan estos nanomateriales (Boltenkoy et al., 2018). Para obtener una descomposición catalítica óptima, siempre será necesario que el material tenga una superficie específica entre 1 y 1000 mm^2 , que garantice una buena dispersión, así como una importante actividad catalítica (Applerot et al., 2012). Entre los materiales que han atraído una atención significativa por sus propiedades intrínsecas, es el ZnO (Chatterjee, & Dasgupta, 2005), ZnOH (Huang et al., 2008) o mejor aún, como un composito ZnO-ZnOH (Mirzaei & Darroudi., 2017), estos materiales nanométricos han sido investigados ampliamente por Chiu et al. (2010), y ofrecen la oportunidad de modificar la Banda prohibida a un valor deseado (Evstropiev et

al., 2017), para contribuir a una banda con mayor foto respuesta en fotocátalisis (Kiselev et al., 2017).

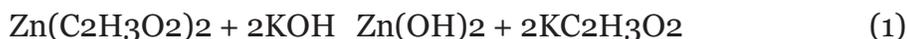
Por estas razones, el método CBD se ha desarrollado como un método que permite obtener nanomateriales en condiciones de química verde, a temperatura ambiente, en presencia de oxígeno, y que permite tener el control de los nanomateriales en el proceso desarrollo/metodología/síntesis, de tal forma que puedan ser aplicados en el proceso de catálisis, como una alternativa viable para contrarrestar la contaminación del agua (Rajendran et al., 2016). En este trabajo, se muestra la obtención y el estudio de la formación del composito ZnO- ZnOH obtenido por la técnica CBD, por ser una técnica amigable con el medio ambiente. Además, el análisis y medición de la actividad fotocatalítica de los nanomateriales se obtiene utilizando azul de metileno como contaminante orgánico, siendo este uno de los desechos en la industria textil que contaminan los ríos, lagos y mantos acuíferos.

Método y Metodología

La técnica de baño químico (CBD) es un método eficiente y económico que permite obtener nanomateriales de manera rápida y de bajo costo (Portillo et al., 2020). Además de aplicarse como Química Verde, es decir, que es amigable con el medio ambiente, además proporciona un control adecuado de las fases que intervienen en la obtención de los subproductos, como se demuestra en trabajos anteriores (Garrido et al., 2023). La técnica del baño químico es una síntesis capaz de obtener una fase sólida dispersa en una solución, correspondiente a los iones del complejo de coordinación (Hone & Abza, 2019). Esta técnica implica los siguientes pasos que rigen la producción de los nanomateriales: (a) el primer paso se caracteriza por el cambio de color observado en la mezcla generada por el fenómeno de nucleación. Este paso es fundamental, ya que las propiedades ópticas del material

y el tamaño del cristal dependen de este proceso (Vekilov, 2010). (b) La generación de pequeños cristales diluidos en la solución indica un crecimiento cristalográfico, y finalmente (c), la formación de la fase sólida que se requerirá en la solución.

Para desarrollar este trabajo se utilizó como material precursor al acetato de zinc con la fórmula química $Zn(O_2CCH_3)_2(H_2O)_2$, el cual es diluido en agua desionizada a temperatura ambiente, con una concentración de 0.2 M con agitación constante, este paso es una etapa primordial para tener el acetato de Zinc 100% diluido. En seguida, se agrega el KOH (hidróxido de sodio), el cual proporciona los iones (OH), que son necesarios para poder tener un PH idoneo de ~8, esto para promover la nucleación y formación de los nano compositos, en esta fase, se tiene la siguiente reacción química:



Posteriormente, se deja en agitación constante por 48 hrs., a temperatura ambiente, para finalmente realizar el proceso de filtración, utilizando papel filtro para separar los nano compositos obtenidos de la solución, finalmente, se dejan secar los polvos por 48 hrs. Una vez obtenidos los polvos son utilizados en el proceso de fotocatalisis, para realizar este análisis se toman muestras de agua con azul de metileno como contaminante, cada 10 minutos.

Resultados

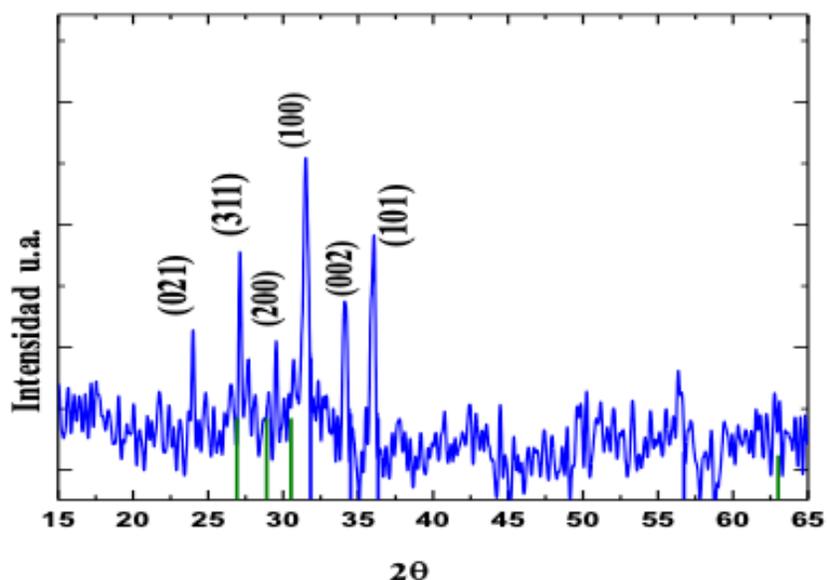
Difracción de Rayos X (RDX)

De los espectros de RDX, se observa el tipo de estructura cristalina de los materiales obtenidos a partir de la técnica CBD, las difracciones encontradas en los ángulos 24, 27 y 29 nm pertenecen a los planos (021), (311), (200) respectivamente, las cuales corresponden para el $Zn(OH)_2$ con una estructura ortorrómbica (wulfenita),

), y (100), (002), (101), correspondientes el ZnO con una estructura hexagonal (wurtzita), mostrados en la Figura 1.

Figura 1

Espectro de XRD del composito el $Zn(OH)_2 - ZnO$



Aplicando la siguiente ecuación de Sherrer, se logró obtener el tamaño aproximado de las nanopartículas obtenidas del composito $Zn(OH)_2 - ZnO$, $D=(K \lambda)/\beta \cos\theta$.

Donde tenemos que D es el tamaño aproximado de la nanopartícula, k, es la constante del factor dimensional, λ es la longitud de onda de los rayos X, β es el FWHM del plano cristalino y θ es el ángulo de difracción de Bragg. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, donde se observa un tamaño de ~ 16.1 nm de la nanopartícula.

Tabla 1

Tamaño de grano del composito $Zn(OH)_2 - ZnO$.

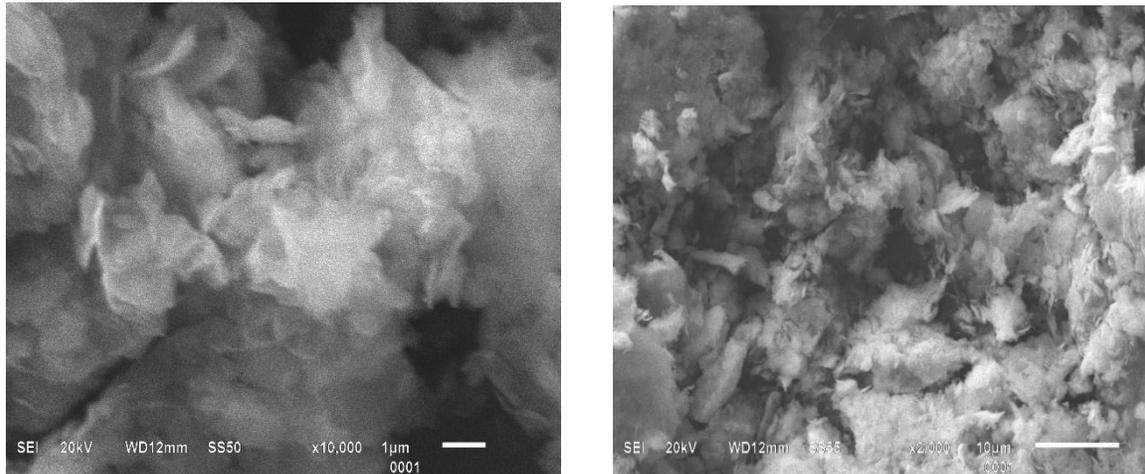
<i>Muestra</i>	<i>Tamaño de grano (nm)</i>	<i>FWHM</i>
<i>$Zn(OH)_2-ZnO$.</i>	<i>16.1</i>	<i>0.54</i>

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías de SEM ayudan a conocer la morfología superficial que tienen los nanocompositos ($Zn(OH)_2 - ZnO$), esto sirve para poder determinar el tipo de aplicación que se le puede dar a los nanocompuestos. En la Figura 2 a) y b), se pueden observar los SEM de los nanocompositos obtenidos ($Zn(OH)_2 - ZnO$), a 1μ y 10μ respectivamente, presenta una morfología completamente desordenada en forma de capas u hojuelas al azar conformando estructuras conglomeradas, este tipo de morfologías son idóneas para poder aplicar las nanoestructuras en fotocatalisis, ya que esas capas desordenadas sirven de trampas para los contaminantes, tal y como se explicará más adelante.

Figura 2

(a) SEM de 1μ $Zn(OH)_2 - ZnO$, (b) SEM de 10μ $Zn(OH)_2 - ZnO$



a)

b)

Espectroscopia de energía dispersa EDS

La espectroscopía de energía dispersa es una herramienta de caracterización que nos permitirá conocer los porcentajes de los materiales presentes en las muestras, lo que nos ayudará a reafirmar los tipos de materiales obtenidos con la técnica CBD. En la Figura 3 y Tabla 2, se observan los porcentajes de los materiales encontrados en la muestra analizada de oxígeno (O) y Zinc (Zn).

Figura 3

a) y b) EDS de la muestra $Zn(OH)_2 - ZnO$

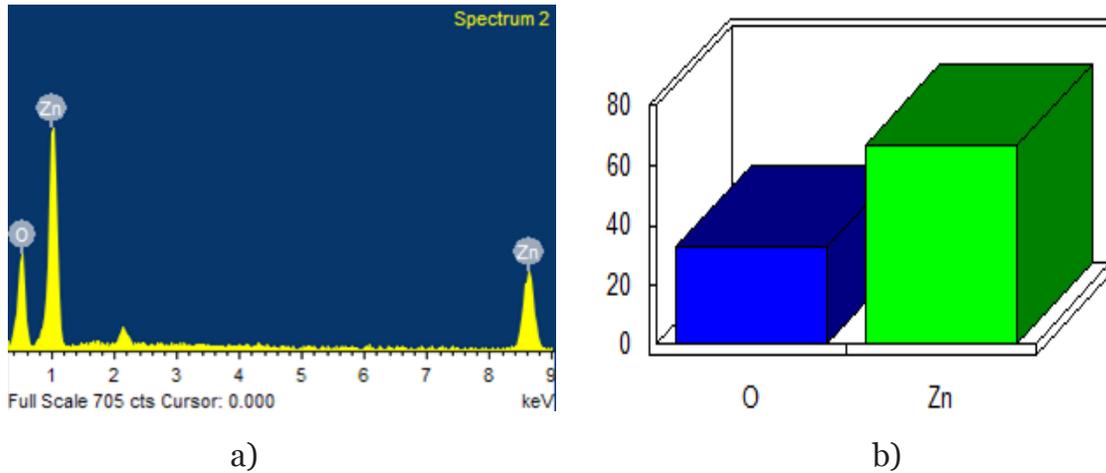


Tabla 2

Porcentajes de materiales del EDS de $Zn(OH)_2 - ZnO$

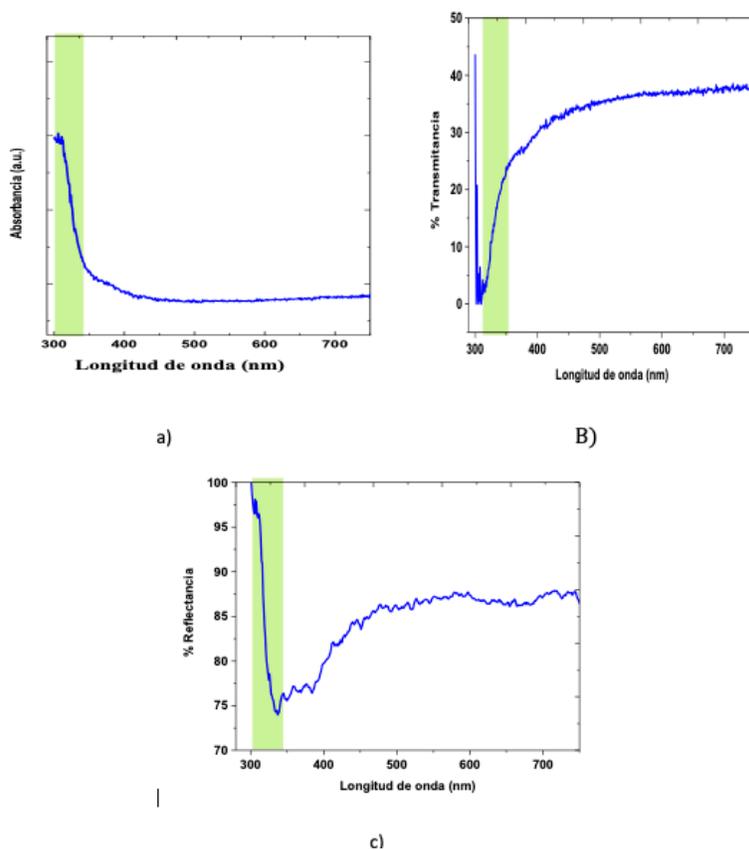
<i>Muestra</i>	<i>% Oxígeno</i>	<i>% Zinc</i>
<i>$Zn(OH)_2 - ZnO$.</i>	32	68

Pruebas ópticas UV-vis

Por medio de la caracterización Uv-Vis es posible obtener las propiedades ópticas como la absorbancia, transmitancia y reflectancia de los nanocompuestos $Zn(OH)_2 - ZnO$. En la Figura 4 se observa que en la longitud de onda de aproximadamente a 320 nm los nanocompositos absorben, transmiten y reflectan respectivamente, en el rango del ultravioleta.

Figura 4

UV-Vis del nanocomposito $Zn(OH)_2 - ZnO$ a) Absorbancia, b) Transmitancia y c) Reflectancia



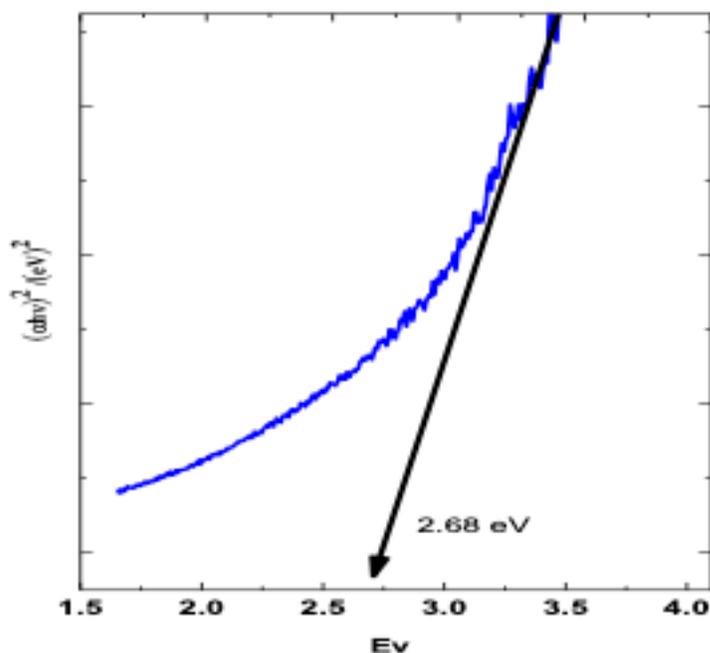
A partir del gráfico de absorbancia se puede realizar el cálculo de la Banda prohibida de los nanocompositos, aplicando la siguiente ecuación de Tauc :

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)^x \quad (2)$$

Donde A es una constante, $h\nu$ son consideradas con la energía de los fotones incidentes, α es el coeficiente de absorción y $X = 0.5$ para la Banda prohibida de este tipo de semiconductor. El resultado se muestra en la figura 5.

Figura 5

Banda Prohibida del composito $\text{Zn}(\text{OH})_2 - \text{ZnO}$

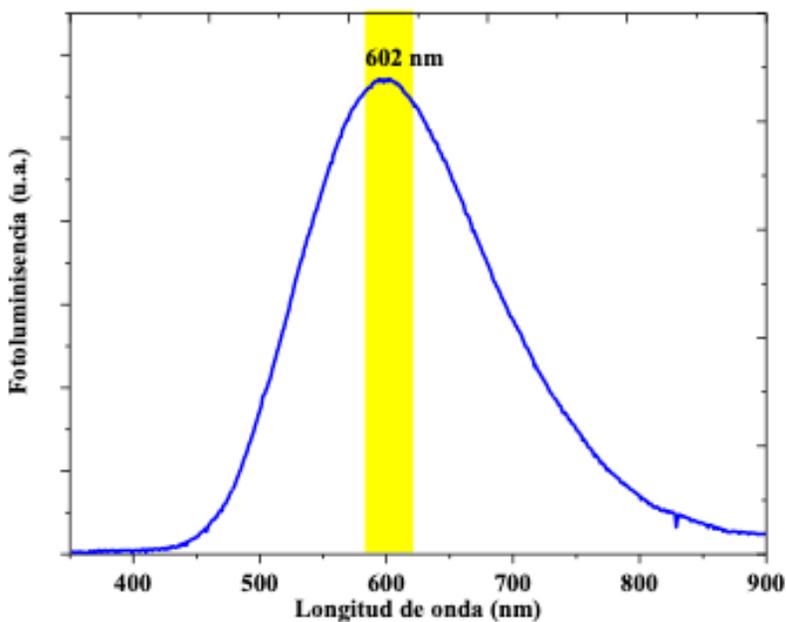


Fotoluminiscencia

Por medio de la fotoluminiscencia, es posible observar los tipos de defectos estructurales e intrínsecos que poseen los nanocompositos. En la Figura 6 se muestra la respuesta fotoluminiscente de los nanocompositos desde aproximadamente ~415 nm hasta ~900 nm, alcanzando un pico máximo aproximadamente en 602 nm, mostrando una fuerte luminiscencia en el rango del amarillo, lo cual es atribuido a la emisión de defectos intersticiales profundos de oxígeno, lo que promueve la recombinación de electrones cercanos a la banda de conducción del semiconductor, así como de trampas profundas favoreciendo la fotocatalisis.

Figura 6

Fotoluminiscencia del composito $\text{Zn}(\text{OH})_2 - \text{ZnO}$ con un máximo en 602 nm



Fotocatálisis

La fotocatalisis es una técnica que se usa en los procesos de tratamiento de agua, para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, aplicando materiales semiconductores, como por ejemplo el composito $\text{Zn}(\text{OH})_2 - \text{ZnO}$ por medio de la luz solar. Es importante señalar que para poder tener un buen rendimiento fotocatalítico es necesario que el material posea un ancho de banda

prohibida lo más bajo posible para poder aprovechar al máximo el espectro solar (~1.6 eV).

El proceso de la fotocatalisis es el siguiente:

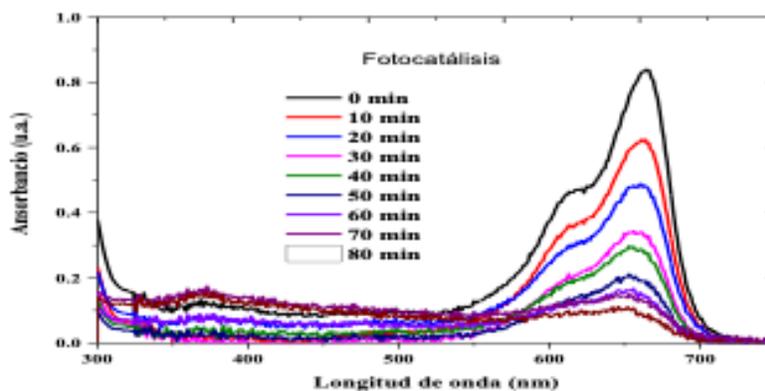
- a) La reacción fotocatalítica inicia, una vez que el espectro solar irradia al nanocomposito, para absorber la energía fotónica que sea mayor al ancho de banda prohibido del material.
- b) Los fotones que irradian sobre el material generan el fenómeno de la energía excitónica en los electrones (e^-) encontrados en la banda de valencia, es decir si los fotones tienen la energía suficiente para poder arrancar electrones de la banda de valencia y saltar a la banda de conducción, se generará un enlace excitónico con su respectivo hueco (h^+) que se encontrará en la banda de valencia debido a la ausencia del electrón, mejor conocido como generación de par electrón-hueco.
- c) Da inicio la reacción redox donde los pares de electrones participarán, siendo transferidos a la superficie de fotocatalizador, para la formación del H_2 .
- d) Los huecos generados quienes tienen carga positiva (h^+), reaccionan con el agua generando iones (OH^-), los cuales son claves para poder degradar el contaminante orgánico (azul de metileno).
- e) Por otra parte, los electrones quienes tienen carga negativa (e^-), reaccionan con el oxígeno presente, para generar radicales de superóxido y finalmente peróxido de hidrógeno generando iones (OH^-), los cuales observarán los contaminantes presentes, generando compuestos como CO_2 , H_2O y minerales.

Aplicación fotocatalítica

El nanocomposito $Zn(OH)_2 - ZnO$ sintetizado se aplicó en un proceso de la fotocatalisis para degradar azul de metileno como contaminante orgánico, así como la luz solar para la generación de enlaces exitónicos de los pares electrón – hueco en el nanocomposito . El proceso se realizó de la siguiente forma: en un recipiente se dispersaron 50 ml de azul de metileno en agua destilada, posteriormente se agregan 20 mg del composito $Zn(OH)_2 - ZnO$ el cual se coloca bajo la radiación de a la luz solar por un tiempo de 80 minutos, manteniendo la solución en constante agitación. Para observar la degradación del azul de metileno se toman muestras cada 10 minutos de la solución que se encuentra en el proceso fotocatalítico. En la figura 7 se muestra la evolución de la degradación de azul de metileno , alcanzando un porcentaje de degradación de casi el 90% del contaminante orgánico azul de metileno a los 80 minutos, como lo podemos ver en la Figura 7.

Figura 7

Respuesta fotocatalítica del composito $Zn(OH)_2 - ZnO$



Conclusiones y discusión

Se obtuvieron compositos de $\text{Zn(OH)}_2 - \text{ZnO}$ por medio de la ruta o síntesis de química verde de (CBD), por difracción de rayos X se mostró la presencia cristalográfica del ZnO y del Zn(OH)_2 , se calculó del tamaño de grano utilizando la ecuación de Sherrer obteniendo un tamaño promedio de 16.1 nm. Por medio de imágenes SEM, se observó la superficie del nanocomposito $\text{Zn(OH)}_2 - \text{ZnO}$ encontrando una superficie desordenada en forma de escamas (lo que sirve como trampas para el contaminante favoreciendo a su degradación). A partir de los espectros de EDS se obtuvieron los porcentajes de Zinc y oxígeno presentes en el material (que nos favorece para determinar el tipo de molécula obtenida), se obtuvieron las propiedades ópticas de absorbancia, transmitancia y reflectancia por medio de UV-Vis encontrando una respuesta en el rango de ~320 nm del material sintetizado, por medio de la ecuación de Tauc, se calculó el ancho de banda prohibida de 2.68 eV, lo que lo hace ser un material con una gran diversidad de aplicaciones como fotovoltaicas y fotocatalíticas, se desarrolló fotoluminiscencia correspondiente al rango de 415 a 900 nm correspondientes a defectos intersticiales profundos de oxígeno. Finalmente, se realizó el proceso de fotocátalisis los polvos para la degradación del azul de metileno, obteniendo una eficiencia del ~90%, esto es debido a que tener una banda ancha prohibida de 2.68 eV aprovecha muy bien el espectro solar, promoviendo así la degradación del contaminante.

Referencias

Applerot, G., Lellouche, J., Perkas, N., Nitzan, Y., Gedanken, A., & Banin, E. (2012). ZnO nanoparticle-coated surfaces inhibit bacterial biofilm formation and increase antibiotic susceptibility. *RSC Advances*, 2(6), 2314–2321. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ra/c2ra00602b>

- Boltenkov, I. S., Kolobkova, E. V., & Evstropiev, S. K. (2018). Synthesis and characterization of transparent photocatalytic ZnO-Sm₂O₃ and ZnO-Er₂O₃ coatings. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 458–464. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603018309997>
- Chatterjee, D., & Dasgupta, S. (2005). Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 6(2–3), 186–205. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389556705000316>
- Chiu, W. S., Khiew, P. S., Cloke, M., Isa, D., Tan, T. K., & Radiman, S. (2010). Photocatalytic study of two-dimensional ZnO nanopellets in the decomposition of methylene blue. *Chemical Engineering Journal*, 158(2), 345–352. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894710000872>
- Donthu, S. K., Pan, Z., Shekhawat, G. S., Dravid, V. P., Balakrishnan, B., & Tripathy, S. (2005). Near-field scanning optical microscopy of ZnO nanopatterns fabricated by micromolding in capillaries. *Journal of Applied Physics*, 98(2). <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/98/2/024304/350259/Near-field-scanning-optical-microscopy-of-ZnO?redirected-From=fulltext>
- Evstropiev, S. K., Karavaeva, A. V., Dukelskii, K. V., Kiselev, V. M., Evstropiev, K. S., & Nikonorov, N. V., (2017). Transparent bactericidal coatings based on zinc and cerium oxides. *Ceramics International*, 43(16), 14504–14510. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884217315249>
- Garrido, M. V., Araiza, O. P., Portillo, M. C., Portillo, O., & Espinoza, M. L. (2023). Crystalline native defects in ZnO analyzed by photoluminescence applying Maxwell-Boltzmann statistics in the visible region. *Revista Mexicana De Física*, 69(2 Mar-Apr), 021304-1. <https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf/article/view/6588>
- Hone, F. G., & Abza, T. (2019). Short review of factors affecting chemical bath deposition method for metal chalcogenide thin films. *Technology*, 8(2), 3. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/cgi/viewcontent.cgi?article=1075&context=ijfst>

- Huang, Z., Zheng, X., Yan, D., Yin, G., Liao, X. y Kang, Y. (2008). Toxicological effect of ZnO nanoparticles based on bacteria. *Langmuir*, 24(8), 4140–4144. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la7035949>
- Kiselev, V. M., Evstrop'ev, S. K., & Starodubtsev, A. M. (2017). Photocatalytic degradation and sorption of methylene blue on the surface of metal oxides in aqueous solutions of the dye. *Optics and Spectroscopy*, 123, 809–815. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0030400X17090168>
- Mirzaei, H., & Darroudi, M. (2017). Zinc oxide nanoparticles: Biological synthesis and biomedical applications. *Ceramics International*, 43(1), 907–914. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884216318144>
- Moreno, O. P., Pérez, R. G., Merino, R. P., Téllez, G. H., Portillo, M. C., & Especia, M. M., (2017). Growth of NdOHCO_3 nanocrystals by chemical bath and its thermal annealing treatment in air atmosphere. *Optik*, 130, 1045–1052. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402616314462>
- Portillo, M. C., Gutiérrez, R. V., Ramírez, M. M., Téllez, V. C., Santiesteban, H. J., & Santiago, A. C., (2020). Structural properties of sulfur copper (CuS) nanocrystals grown by chemical bath deposition. *Optik*, 208. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402620303521>
- Rajendran, S., Khan, M. M., Gracia, F., Qin, J., Gupta, V. K., & Arumainathan, S. (2016). Ce^{3+} -ion-induced visible-light photocatalytic degradation and electrochemical activity of ZnO/CeO_2 nanocomposite. *Scientific Reports*, 6*(1), 31641. <https://www.nature.com/articles/srep31641>
- Vekilov, P. G. (2010). The two-step mechanism of nucleation of crystals in solution. *Nanoscale*, 2, 2346–2357. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/nr/conr00628a>
- Wang, F., Wu, M. Z., Wang, Y. Y., Yu, Y. M., Wu, X. M., & Zhuge, L. J. (2013). Influence of thickness and annealing temperature on the electrical, optical, and structural properties of AZO thin films. *Vacuum*, 89, 127–131. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0042207X12001200>