

Aplicaciones Emergentes de Nanopartículas de ZnO en Procesos de Fotodegradación, Review.

Emerging Applications of ZnO Nanoparticles in Photodegradation Processes, Review.

Edson Edgardo Guipzot Sánchez¹, Víctor Hugo Martínez Landeros¹,
Luis Alfonso García Cerda², Sergio García Villarreal¹, Marco Arturo
García Rentería¹, Lázaro Abdiel Falcón Franco¹

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carr. 57, km. 5, C.P.
25710,
Monclova, Coahuila, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Herosillo
#140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: Edson Edgardo Guipzot Sánchez.
Universidad Autónoma de Coahuila.
edson_guipzot@uadec.edu.mx

Resumen

Hasta el día de hoy, la preocupación por la contaminación ha alcanzado niveles alarmantes en todo el mundo. A pesar de los esfuerzos por implementar regulaciones ambientales más estrictas y promover prácticas sostenibles, los niveles de contaminación siguen en aumento. Las emisiones industriales, la deforestación, la agricultura intensiva y el uso excesivo de plásticos son solo algunas de las actividades humanas que contribuyen significativamente a este problema global. Estos factores han llevado a un deterioro continuo de la calidad del aire, agua y suelo en muchos lugares del mundo. Una de las alternativas que se ha puesto en práctica para contrarrestar este problema es el desarrollo de fotocatalizadores. Dentro de este campo de investigación el óxido de zinc (ZnO) ha cobrado relevancia gracias a su eficacia en procesos de fotodegradación, factores como alta actividad fotocatalítica, estabilidad química en condiciones ambientales, fácil manipulación, bajo costo y nula toxicidad, son unas de las propiedades físicas y estructurales que hacen tan llamativo este metal. El presente artículo de divulgación examina las ventajas y criterios de aplicar este compuesto en la mineralización de contaminantes orgánicos en sistemas acuosos, proceso que consiste en disminuir la concentración de compuestos nocivos contenidos en soluciones mediante reacciones fotodegradantes; contribuyendo así en la mejora de la calidad del agua y protección del medio ambiente. La degradación fotocatalítica constituye una técnica sostenible y sobre todo amigable con el entorno, que emplea la energía solar para descomponer contaminantes mediante reacciones químicas, transformándolos en compuestos menos perjudiciales. El ZnO se destaca por sus propiedades semiconductoras y su capacidad para generar pares de electrones y huecos cuando es irradiado con luz solar. Estos electrones y vacíos responden a los contaminantes existentes en el entorno, descomponiéndolos en sustancias que no representan riesgos.

Palabras clave. Fotocatálisis, nanopartículas, ZnO, mineralización, sustentabilidad.

Abstract

To this day, concern about pollution has reached alarming levels around the world. Despite efforts to implement stricter environmental regulations and promote sustainable practices, pollution levels continue to rise. Industrial emissions, deforestation, intensive agriculture and excessive use of plastics are just some of the human activities that contribute significantly to this global problem. These factors have led to a continuous deterioration of air, water and soil quality in many parts of the world. One of the alternatives that has been implemented to counteract this problem is the development of photocatalysts. Within this field of research, zinc oxide (ZnO) has gained relevance thanks to its effectiveness in photodegradation processes. Factors such as high photocatalytic activity, chemical stability in environmental conditions, easy handling, low cost and no toxicity are some of the physical and structural properties that make this metal so attractive. This article examines the advantages and criteria of applying this compound in the mineralization of organic pollutants in aqueous systems, a process that consists of reducing the concentration of harmful compounds contained in solutions by means of photodegradation reactions, thus contributing to the improvement of water quality and environmental protection. Photocatalytic degradation is a sustainable and, above all, environmentally friendly technique that uses solar energy to decompose pollutants through chemical reactions, transforming them into less harmful compounds. ZnO stands out for its semiconducting properties and its ability to generate electron-hole pairs when irradiated with sunlight. These electrons and vacancies respond to existing pollutants in the environment, decomposing them into substances that do not represent risks.

Keywords. Photocatalysis, nanoparticles, ZnO, mineralization, sustainability.

Introducción

Hasta la fecha, los contaminantes a base de compuestos orgánicos han emergido como la principal preocupación para el ser humano y la biodiversidad (Shanmugam y col., 2016); esto a raíz del rápido y desmedido crecimiento industrial, generando desechos vertidos en canales de agua como consecuencia de las actividades de la industria textil, alimentaria, petrolera y cosmética (Kumar y col., 2015 a), residuos los cuales son extremadamente nocivos, pudiendo causar daños severos en la salud de las personas que llegan a inhalarlos o beber de estos sitios contaminados (Chen y col., 2017).

Ante este problema, se han implementado técnicas que, al interactuar con las moléculas del tinte, rodamina B, naranja de metilo o azul de metileno, por mencionar algunos, pueden lograr descomponer o por lo menos, un decremento en la concentración de la sustancia nociva.

Los catalizadores biológicos, como las enzimas, son las que se encargan de regular toda interacción química en los organismos vivos, resaltando la gran importancia de los procesos catalíticos (Lacombe y col., 2012), sin embargo, las alternativas más empleadas para la purificación del agua pueden incluir principios de, adsorción, biodegradación, electrocoagulación, nanofiltración, cloración, ozonización y oxidación avanzada (Pawar y col., 2013); cada uno de ellos vienen ligados con ventajas y desventajas, estas últimas pudiendo originarse por el costoso equipo de trabajo, reactivos difíciles de manipular o simplemente dificultad al llevar estos procesos a escalas mayores. La fotocatalisis heterogénea sigue siendo una tecnología promisoría en cuestiones energéticas y medioambientales, ya que es económica con condiciones de manipulación cómoda y factible (Lacombe y col., 2012). Entre los fotocatalizadores a base de semiconductores, el ZnO se ha posicionado como el principal contendiente gracias a su ancho de banda energético, bajo costo y notable resistencia a las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, lo más crucial es su capacidad para captar una significativa porción del espectro solar, superando en este aspecto al dióxido de titanio (TiO₂) (Kannan y col., 2021).

Es bien sabido que el ZnO es un material luminiscente y es idóneo para emplear en

aplicaciones optoelectrónicas. Se trata de un semiconductor de la familia II-VI con un ancho de banda energética de aproximadamente 3.3 eV cuando se encuentra a temperatura ambiente, y además, es posible fabricar películas de ZnO que sean transparentes en todo el espectro visible de la luz (Caglar y col., 2009). Debido a estas características notables, el ZnO ha atraído una considerable atención en virtud de estas propiedades únicas y su adaptación en diversas áreas (Cheong y col., 2002). Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran los detectores de humedad y gas, dispositivos fotoeléctricos y emisores de luz, varistores, dispositivos de ondas acústicas superficiales, láseres ultravioleta, guías de ondas ópticas, células fotovoltaicas, visualizadores y pantallas táctiles (Ramos y col., 2013).

1. Óxido de zinc

1.1 Generalidades

En la actualidad, la implementación de materiales nanoestructurales como el ZnO y TiO₂ (por mencionar algunos), muestran numerosas aplicaciones en ámbitos relacionados con la tecnología (Agustín, 2023).

El ZnO es un compuesto inorgánico que se encuentra relativamente en gran cantidad en la naturaleza, químicamente estable, sencillo de elaborar y no presenta riesgos tóxicos. Aunque no se disuelve en agua, puede disolverse en ácidos y bases débiles (Mosqueda, 2011). Cuenta con un punto de ebullición muy elevado, de 1975 °C (Rivera y col., 2021); tiene 5 isótopos estables, sin embargo los más comunes son el zinc 64 (48.89%), zinc 66 (27.81 %), y el zinc 68 (18.57%) mientras que el oxígeno se presenta casi únicamente en el isótopo de oxígeno 16 (99.76%) (Zaera, 2004).

El ZnO es un óxido metálico que forma parte de los materiales semiconductores. Estos óxidos son conocidos por su habilidad para desencadenar reacciones fotocatalíticas y actuar como agentes foto-oxidantes contra sustancias químicas y biológicas. Por lo tanto, este óxido metálico se destaca por su valor en aplicaciones relacionadas con la biología, donde se utiliza como un agente antibacteriano (Borrego, 2021).

1.2 Estructura cristalina del ZnO

Por su gran aplicación, es bien sabido que el ZnO se puede encontrar en una estructura de a) sal gema, b) wurzita o c) cúbica (blenda de zinc), Figura 1. La wurzita es la estructura cristalina más frecuente que puede presentar este metal, esto a raíz de su gran estabilidad térmica (Tokumoto y col., 2003).

Dicha estructura mencionada anteriormente, pertenece al grupo espacial $P6_3mc$ (C^4_{6v}) y se describe como una disposición alternada de capas de átomos de oxígeno y capas de átomos de zinc, dispuestas en forma de pilas a lo largo del eje vertical c . Existe un desplazamiento entre estas capas, que equivale al 0.38 veces el parámetro de red c . En condiciones normales de presión y temperatura, los valores de los parámetros de red para este material son $a = 3.253 \text{ \AA}$ y $c = 5.213 \text{ \AA}$ (Chung, 1997).

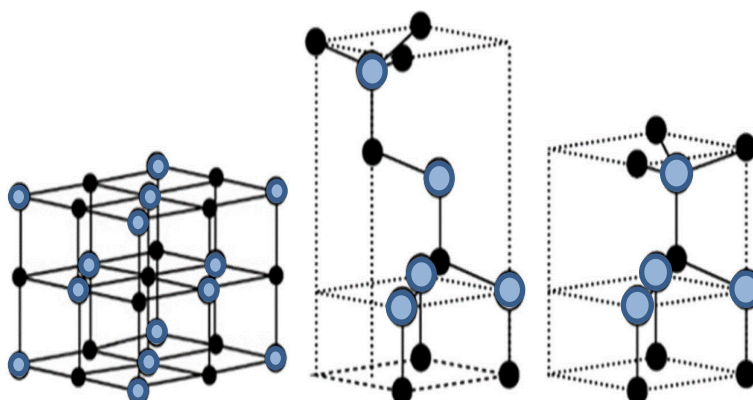


Figura 1. Modelo de estructuras de ZnO a) sal gema (cúbica), b) blenda de zinc (cúbica), y c) wurzita (hexagonal).

Fuente: Elaboración propia, en referencia a (Tokumoto y col., 2003)

Gracias a esta peculiar estructura, se es posible el obtener diversas nanoestructuras de ZnO (Figura 2), siendo utilizadas extensamente en aplicaciones optoelectrónicas y de detección, principalmente porque son fáciles de depositar, pudiéndose producir mediante simples métodos de elaboración comúnmente basados en soluciones, técnicas como sol-gel, SILAR, baño químico, etc. (Hewlett y McLachlan, 2016). Las nanoestructuras de ZnO se pueden presentar en nanopartículas (NP), nanobarras (NR), nanocables (NW), nanotubos, y estructuras macroporosas ordenadas en 3D (3DOM) (Illy y col., 2011).

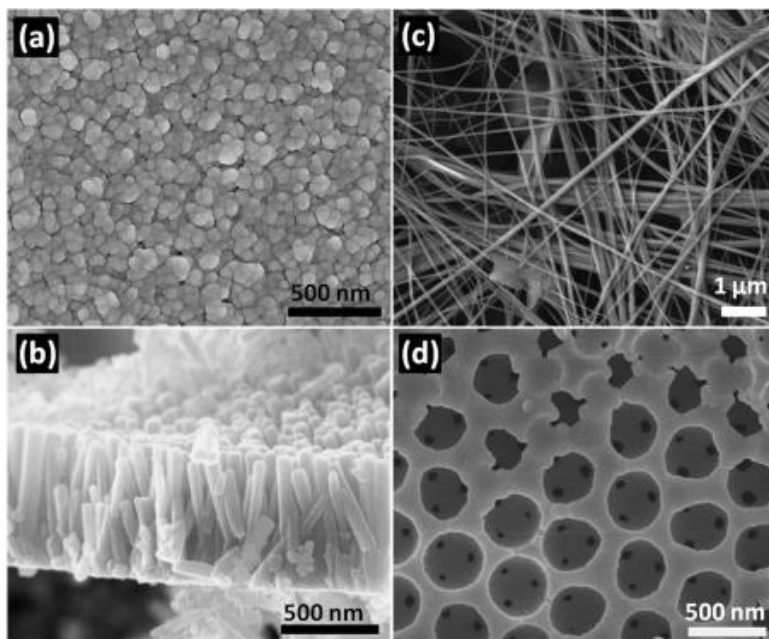


Figura 2. Nanoestructuras de ZnO, a) nanopartículas (NP), b) nanobarras (NR), c) nanocables (NW), y d) est. macroporosas (3DOM).

Fuente: (Gao y Li, 2009).

En base a estudios del autor Ramón Zaera y col., quienes desarrollaron nanopartículas con propiedades ópticas únicas, como diversos índices de refracción, alta transparencia, fotoluminiscencia novedosa y resonancia de plasmones. Estas propiedades hacen que estas nanopartículas sean prometedoras en aplicaciones como catalizadores, portadores de medicamentos, sensores, pigmentos, materiales magnéticos y ópticos, así como en bioimagen (Wang, 2004).

1.3 Propiedades ópticas y eléctricas

El ZnO presenta un ancho de banda energética de 3,3 eV y una fuerte unión de excitones de 60 meV a temperatura ambiente, lo que lo convierte en un semiconductor con excelentes propiedades electroópticas y estabilidad electroquímica (Khodja y col., 2001). Este material es químicamente estable, resistente al calor y a la radiación de alta energía. El tipo n de ZnO exhibe una amplia brecha de energía directa, alta

movilidad de electrones, altos voltajes de ruptura y una intensidad de campo de ruptura superior (Hannachi y col., 2023). Estas propiedades han llevado a su aplicación en dispositivos electrónicos de alta potencia, como dispositivos de emisión de campo, y como electrodos conductores transparentes en dispositivos optoelectrónicos diversos. La recombinación de electrones y huecos en ZnO genera luz ultravioleta/azul, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en emisores de luz azul/UV (Vanathi y col., 2014). Estas características han convertido al ZnO en un material fundamental para optoelectrónica de longitud de onda corta (Gao y Li, 2009). Las propiedades ópticas y eléctricas detalladas de la wurzita monocristalina se presentan en la Tabla 1.

1.4 Propiedades de luminiscencia y dinámica reticular del ZnO

Las propiedades lumínicas del ZnO pueden ser analizadas mediante fotoluminiscencia (PL). Los espectros típicos de PL de las nanoestructuras de ZnO constan de dos partes distintas, la región de emisión ultravioleta (UV) y una emisión visible amplia. Sabiendo esto, la emisión UV, también conocida como emisión de nivel profundo, se atribuye a la recombinación de excitones, es decir, el nuevo acomodo de pares de electrones (Garcia y Nu, 2011). La emisión UV es dependiente de la cristalinidad del ZnO (Ruiz, 2008). La emisión visible está vinculada con la combinación de electrones y huecos de oxígeno, así como con huecos que han sido excitados por la luz en la banda de valencia. En consecuencia, el incremento de la intensidad está asociado con la cantidad de imperfecciones presentes (Onna, 2017).

Partiendo de una estructura cristalina de wurzita, la dinámica de red se puede calcular mediante el análisis de espectroscopía RAMAN. En un cristal de ZnO perfecto, los 4 átomos de cada celda unitaria dan lugar a los 12 modos de fonones. Un fonón es un modo cuantizado vibratorio que se encuentra en redes cristalinas de un sólido (Oslen y col., 2018). Estudios reportados por el autor Martínez Eduardo y colaboradores identificaron los modos de vibración para cristales de ZnS, CdS, BeO y ZnO, donde exponen que las vibraciones pueden ser producto del tamaño nanométrico del material, defectos y esfuerzos en la red (Martínez, 2013) (Tabla 1).

Tabla 1. Frecuencias de los modelos normales de vibración activos en RAMAN para el ZnO.

Modelos fonónicos	Frecuencia (cm ⁻¹)	Tamaño (nm)	Muestra
E ₂ (low)	101, 102	8.5 nm y 4.0 nm	Cristales de ZnO
E ₂ (high)	444, 438, 464		Películas delgadas
A ₁ (TO)	380, 380, 393		Nanopartículas
E ₁ (TO)	413, 409		
A ₁ (LO)	579		
E ₁ (LO)	591, 587, 588, 584		

Adaptado de fuente: (Ruiz, 2012)

1.5 Propiedades térmicas

Factores como el coeficiente de expansión térmica, calor específico y conductividad térmica, integran las propiedades térmicas del ZnO. El valor de expansión térmica de un material se conoce como la deformación de la red cristalina con respecto a las fluctuaciones de temperatura; este valor para el ZnO en el eje "a" corresponde $\alpha = 4.31 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, en el eje "c" $\alpha = 2.49 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a 300 °K (Altarejos, 2019).

La conductividad térmica se refiere a la propiedad de un material para transmitir calor y es crucial, especialmente en situaciones en que aparatos están expuestos a elevadas potencias y/o temperaturas (Miren y Guisasola, 2018). En el caso de un material semiconductor como el ZnO, varios factores, incluyendo los defectos puntuales, influyen en su conductividad térmica, generando un efecto similar al observado en otros semiconductores (Morales, 2020). La Figura 3 explica el concepto de la expansión térmica de los materiales relacionándola a la asimetría de la curva de energía de enlace atómico en comparación a su distancia de enlace atómico.

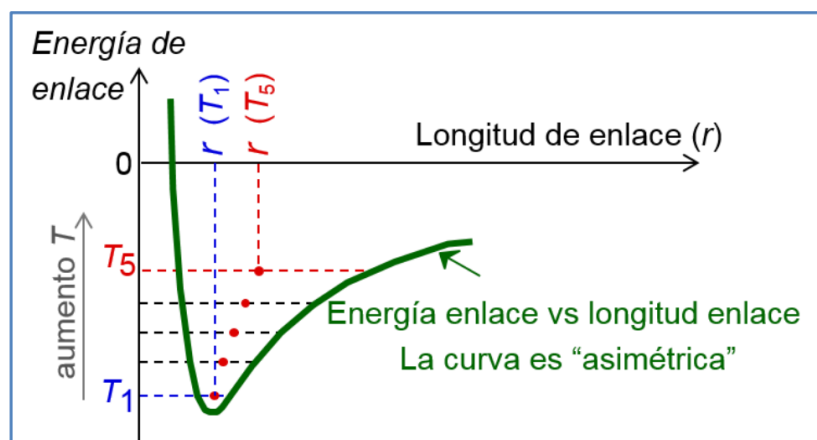


Figura 3. Expansión térmica, relación entre energía de enlace atómico y distancia de enlace atómico.

Fuente: (Miren y Guisasola, 2018).

El calor específico se refiere a la cantidad de calor que un material puede almacenar por unidad de masa. Esta propiedad está determinada por las vibraciones en la estructura del material, la presencia de portadores libres (partículas cargadas que pueden moverse libremente) y los defectos en su composición, factores que contribuyen a la capacidad del material para transportar calor. En el caso del ZnO, a una presión constante, su capacidad calorífica específica se ha medido como $C_p=40,3 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Altarejos, 2019).

2. Mecanismo de degradación fotocatalítica del zno.

2.1 Fotocatálisis.

La fotocatalisis ofrece una manera sencilla de utilizar la luz natural proveniente del sol mediante la combinación fotoquímica y catálisis para obtener una sociedad sustentable gracias a la recolección de la misma (Mendivil, 2012). En términos más simples, la fotocatalisis se refiere a la aceleración de una reacción química mediante la presencia de un catalizador cuando se expone a la luz (Solis, 2016). Esta definición abarca la

fotosensibilización, que implica una modificación química inducida por la absorción de radiación por parte de un compuesto llamado fotosensibilizador, lo que desencadena cambios en otra sustancia química (Bello, 2011).

En 1839, el científico Edmond Becquerel descubrió el proceso fotocatalítico, inspirado en la fotosíntesis natural. En este fenómeno, las plantas, microalgas y ciertos organismos microscópicos aprovechan la energía solar para convertir el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en carbohidratos, marcando así el inicio de la investigación en este campo (Medrano, 2021).

En las últimas décadas, la utilización de la fotocatalisis ha experimentado un crecimiento acelerado, sobre todo en los campos de energía y medio ambiente. La palabra "fotocatalisis" está formada por dos elementos: el prefijo "foto", que denota "luz", y "catálisis", que representa el proceso mediante el cual un reactivo se descompone con la ayuda de un catalizador que altera la velocidad de una reacción química (Heredia, 2022). Un catalizador no está involucrado directamente en la reacción, pero incrementa la rapidez del cambio químico (Atares, 2013). La principal distinción entre un catalizador tradicional y un fotocatalizador radica en el método de activación. Un catalizador común se activa por medio del calor, mientras que un fotocatalizador se activa utilizando fotones con la energía adecuada (Tejada, 2022) (Figura 4).

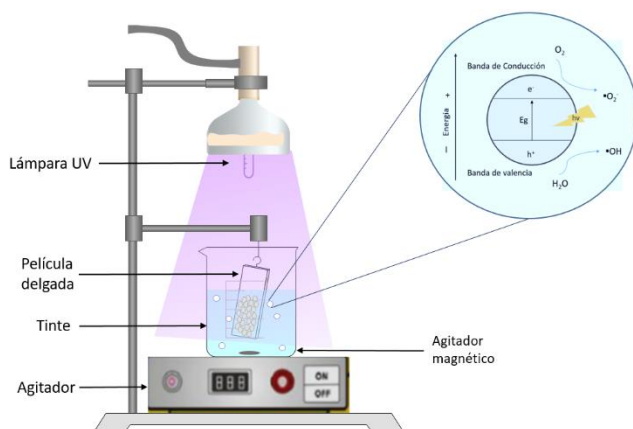


Figura 4. Ilustración esquemática de la configuración experimental para el proceso fotocatalítico.

Fuente: Elaboración propia, en referencia de Pawar y col. (2013).

2.2 Mecanismo de fotocátalisis a partir de semiconductores.

La eficacia de la reacción fotocatalítica se encuentra mayormente determinada por la energía del fotón y las características del catalizador empleado (Bermejo, 2018). Para este proceso se suelen emplear óxidos semiconductores como catalizadores (Ortega y col., 2011). En los semiconductores se tienen bandas asociadas a los niveles de energía; la que presenta una menor energía tienen la mayor densidad electrónica, esto partiendo de los enlaces covalentes entre los átomos, llamándose así banda de valencia. Por otro lado aquellos niveles con más alta energía se denominan bandas de conducción (Vilchez y col., 2017).

Cuando los semiconductores son expuestos a la luz ($h\nu$), los electrones en la banda de valencia (BV) absorben la energía de los fotones y son excitados a una banda de energía superior, llamada banda de conducción (BC). Esto crea huecos (e^-/h^+) en la banda de valencia, donde los electrones solían estar. Estos electrones excitados y vacíos se ven involucrados en procesos químicos al encontrarse en contacto con sustancias químicas cercanas. En la Figura 5 se ilustra el mecanismo de fotoexcitación de un material semiconductor.

En el contexto de la fotocátalisis, los electrones excitados pueden reducir las moléculas cercanas, mientras que los huecos pueden oxidar otras moléculas (Grela y col., 2004). Esto facilita la degradación de contaminantes orgánicos en el agua y el aire, así como la producción de compuestos químicos útiles, como el hidrógeno a partir del agua (Estrella G., 2018). En resumen, la fotocátalisis utilizando semiconductores implica la absorción de luz por parte del semiconductor, la generación de pares de electrones y huecos, y la utilización de estos pares para catalizar reacciones químicas.

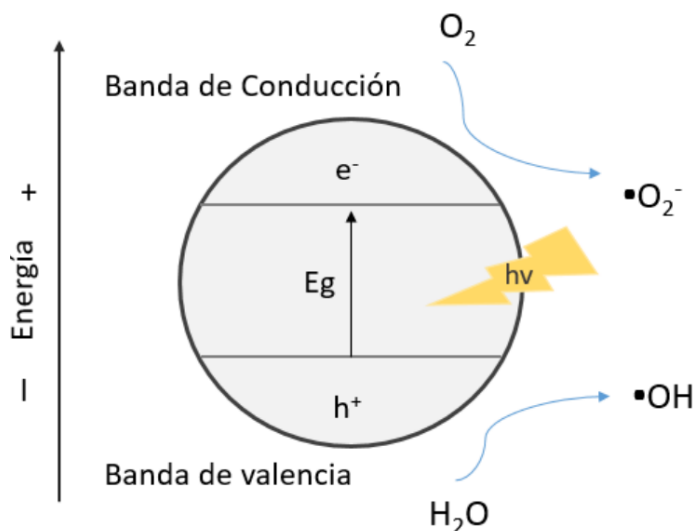


Figura 5. Representación del proceso de separación y transporte de carga en un material por foto-oxidación.

Adaptado de fuente: (Bermejo, 2018)

3. Antecedentes.

3.1 Aplicación del ZnO en la eliminación de tintes.

La Tabla 2 tiene como objetivo analizar y contrastar diferentes aspectos de la fotogeneración en diversas aplicaciones. Al entender cómo diferentes materiales y condiciones afectan el proceso de fotogeneración, podemos mejorar la eficiencia de las tecnologías actuales y desarrollar nuevas soluciones innovadoras. Se exploran varios factores clave, como la eficiencia de conversión de luz en energía química, la estabilidad de los materiales utilizados, las condiciones ambientales óptimas y las posibles aplicaciones industriales; partiendo de materiales nanoestructurados en forma de películas delgadas de ZnO. Al examinar detenidamente estos elementos, podemos identificar tendencias, desafíos y oportunidades que impulsarán la investigación futura en este emocionante campo.

La siguiente tabla (Tabla 2) pone en comparación en un primer vistazo los métodos de depósito de películas delgadas, destacando la técnica sol-gel, pulverización catódica

(sputtering) y evaporación térmica, por mencionar algunas. Existen innumerables métodos de depósito de sustratos, como el rociado pirolítico, depósito químico de vapor, molienda mecánica, irradiación ultrasónica; todos estos en comparación a los primeros mencionados requieren grandes aportes de energía como también de equipo costos y de complicada manipulación.

Sobre la misma tabla, en el apartado de resultados, nos dan una idea muy general pero concisa de cómo fue que se llevó a cabo las pruebas de fotocátalisis, detallando la concentración del agente contaminante y su degradación en referencia al tiempo de exposición. Cada una de estas técnicas de depósito empleadas, nos arrojan una aportación enfocada en la respuesta fotocatalítica de cada película en base a sus propiedades físicas, como por ejemplo, que la rugosidad de la superficie del catalizador mejora la actividad fotocatalítica, o entre más hidrofílica es la superficie de la película, mayor es la fotorreducción inducida, y que conforme vaya en aumento la temperatura del tratamiento térmico, y la técnica de depósito mejoran significativamente la linealidad cristalina y la rugosidad de la superficie de la película delgada, mejorando el rendimiento fotocatalítico.

Tabla 2. Recopilación de investigaciones de fotocátalisis a partir de películas delgadas de distintos materiales.

Condiciones y resultados		
Sustrato	Sustrato de vidrio	(Altinta y Hanife, 2016)
P. delgada	ZnO/Co	
M. depósito	Sol-gel	
Las actividades fotocatalíticas de las películas delgadas se evaluaron en función de la luz visible para degradar MB. Como fuente de luz se utilizó una lámpara de xenón con un filtro de corte de 420 nm, a temperatura fría. Se determinó que el contenido óptimo de Co es de 3% para la actividad fotocatalítica de las películas ZnO/Co.		
Sustrato	Sustrato de vidrio de cuarzo	(Okemoto y col., 2016)
P. delgada	Pinceno	

M. depósito	Evaporación térmica al vacío	
La descomposición del agua se llevó a cabo en un sistema de reactor discontinuo. El catalizador preparado (película) se colocó en una solución acuosa de urea (0,3 M). El catalizador que contiene una película más delgada (50nm) mostró la mejor actividad fotocatalítica debido a la rugosidad de la superficie del catalizador.		
Sustrato	Sustrato de cuarzo	(Pham y col., 2015)
P. delgada	TiO ₂ , C ₁₁ H ₄ O ₅ /Cu	
M. depósito	Pulverización catódica (Sputtering)	
Las reacciones se realizaron en un reactor de lecho de cuarzo, utilizando una película delgada de catalizador sumergida en 35 ml de MB (Co¼10 ppm. La interacción cinética del Cu con el sistema fotocatalizador mejoró su actividad fotocatalítica en la decoloración de MB. La relación entre la humectabilidad y la actividad fotocatalítica nos dice que en cuanto más hidrofílica es la superficie de la película, mayor es la fotorreducción inducida y revertida por el MB.		
Sustrato	Sustrato de vidrio	(Ravichandra n y Sindhuja, 2019)
P. delgada	ZnO/ g-C ₃ N ₄ /Ag	
M. depósito	Pulverización catódica con nebulizador de chorro	
La película recubierta se montó dentro del tubo de ensayo lleno con 100 ml de una solución acuosa de MB/MG (1 x 10-5 mol/L). Lámpara de tungsteno de 500 W con corte de 420 nm. Los estudios fotocatalíticos muestran que la adición de Ag y g- C ₃ N ₄ mejora notablemente la eficiencia fotocatalítica del ZnO. La película delgada de ZnO/g-C ₃ N ₄ /Ag provoca una descomposición del 96 y 99 % de las moléculas de tinte azul de metileno (MB) y verde malaquita (MG), respectivamente.		
Sustrato	Sustrato de vidrio	(Katal y col., 2020)
P. delgada	Óxido de cobre (CuO)	
M. depósito	Pulverización catódica (Sputtering)	

Las muestras se colocaron en el fondo de un vaso de precipitados, 20 ml de solución de 10,0 mg L ⁻¹ MB. El vaso se colocó sobre un agitador (50rpm, 25°C) durante 30 min en la oscuridad. Para el experimento fotocatalítico, se utilizó una lámpara de xenón de 150 W como fuente de luz. Se demostró que aumentar la temperatura del tratamiento térmico, y la técnica de depósito mejoran significativamente la linealidad cristalina y la rugosidad de la superficie de la película delgada de CuO, mejorando el rendimiento fotocatalítico.		
Sustrato	Sustrato de silicio	(Atif Mossad y col., 2014)
P. delgada	SiO ₂ /ZnO	
M. depósito	Sol-gel	
Las pruebas fotocatalíticas se realizaron en una solución acuosa utilizando MB. Las muestras se irradiaron con luz UV(A) de 1 mW/cm ² (tubo UV de 20 W. Los resultados indican que el 10% en peso de ZnO-SiO ₂ recocido a 600 °C mostró la mayor actividad fotocatalítica para la fotodegradación de MB.		
Sustrato	Sustrato de vidrio	(Zhou y col., 2011)
P. delgada	Ag/AgCl/TiO ₂	
M. depósito	Sol-gel	
Se colocó la película de Ag/AgCl/ TiO ₂ en una solución acuosa de 4-clorofenol de 15 ml con una concentración de 1 × 10 ⁻⁵ M, como fuente de luz visible se utilizó una lámpara de xenón de 300 W a 10 cm de la celda. El mecanismo fotocatalítico se basó en el hecho de que las NP de Ag se fotoexcitan debido al plasmón de resonancia, la separación de carga se logra mediante la transferencia de electrones fotoexcitados desde el NPs de Ag a la banda de conducción de TiO ₂ y la formación simultánea de radical OH y ClO, que causan la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos.		

Fuente: Elaboración propia.

4. Agentes que influyen en la eficiencia en el proceso de fotodegradación.

4.1 Efecto de la carga del ZnO.

El autor Amanda Álvarez en el 2023 reportó novedades respecto al efecto de la carga del catalizador sobre la eficiencia del fotocatalizador. Estos resultados señalaron que la velocidad de descomposición por acción de la luz aumenta en función a la cantidad de catalizador aplicado. Este fenómeno parte del hecho de que un aumento en la cantidad de catalizador mejora tanto el área de superficie activa total como la cantidad de sitios reactivos en la superficie del catalizador. En consecuencia, también aumenta el número de radicales hidroxilo y superóxido, lo que facilita la descomposición de los contaminantes orgánicos. Esta mejora condujo a un aumento en el porcentaje de descomposición (Álvarez, 2023). Por otro lado, se debe de tener un estricto control sobre estas cantidades adicionales de catalizador, ya que se nota que la turbidez de la solución también aumenta. Este fenómeno limita la penetración de luz, ocasionando que el volumen fotoactivo disminuya (Rosas Chicas, 2015).

4.2 Concentración del agente contaminante.

Numerosos estudios han demostrado que la concentración de las sustancias orgánicas contaminantes en solución acuosa tiene un impacto negativo en la tasa de degradación. En referencia al autor Torres López, la respuesta de degradación disminuye con forme se aumenta la concentración de sustrato. En otras palabras, a medida que se incorpore más contaminante, se absorben cada vez más sustancias orgánicas en la superficie del catalizador; por ende, aumenta la demanda de especies oxidantes (OH , O_2). El consumo desmedido de radicales OH por parte de los intermediarios generados merma el porcentaje de degradación en una solución altamente concentrada de agentes contaminantes (T. López, 2013).

4.3 pH de la solución.

Entender cómo el pH influye en la eficacia del proceso de fotodegradación del colorante representa un gran desafío, dada la variedad de roles que desempeña. En primer lugar, está asociado con el nivel de ionización en la superficie del catalizador, influyendo en la adsorción de las moléculas del colorante. En segundo lugar, los

hidroxilos radicales pueden formarse a partir de la interacción entre los iones hidroxilo y las cargas positivas vacantes. Estas vacancias positivas son las especies dominantes de oxidación en entornos con bajos niveles de pH, mientras que los radicales hidroxilos son considerados como las especies predominantes en entornos con niveles de pH neutros o alcalinos. Por lo tanto, en una solución alcalina, los radicales OH son generados con mayor facilidad a través de la oxidación de los iones hidroxilo más accesibles en la superficie, lo cual naturalmente conduce a una mayor eficacia en el proceso (Bermejo, 2018).

4.4 Temperatura.

Una de las ventajas de la fotorreacción es que su efectividad no se ve alterada por las fluctuaciones de temperatura. En el proceso fotocatalítico, los pasos influenciados por la temperatura son la adsorción y desorción de los reactivos y productos en la superficie del fotocatalizador. Sin embargo, ninguno de estos pasos parece ser el factor determinante de la velocidad del proceso. Se ha observado que el impacto de la temperatura es mínimo en la degradación fotocatalítica de soluciones acuosas que contienen colorantes, como se indica en un estudio realizado por Hernández en 2022 (Isidro Hernández, 2022).

Vásquez y col., en 2016 descubrieron que la influencia de la temperatura en el proceso de degradación fotocatalítica es mínima cuando se encuentra en el rango de 10-68°C. Temperaturas elevadas pueden afectar adversamente la cantidad de oxígeno disuelto en la solución, lo que, a su vez, incrementa la recombinación de huecos y electrones en la superficie del fotocatalizador (Vásquez y col., 2016).

5. Estrategias para la mejora fotocatalítica del ZnO.

5.1 Limitaciones del ZnO como fotocatalizador.

La creación y desarrollo de un fotocatalizador que posea una estructura de banda adecuada, que sea capaz de absorber una amplia gama de longitudes de onda en el espectro visible, además de tener un alto potencial redox y ser estable, sigue siendo un desafío en el campo de la investigación. Muy a menudo, los principales retos están

relacionados con la absorción inadecuada de la luz en la región visible (no logran captar suficientes fotones), y esto nos lleva a la separación insuficiente de los portadores de carga (no se tiene la energía suficiente para que los electrones puedan viajar a la banda de conductividad), (Escobar y Solís, 2020). Siendo esto punto de partida para la busca de implementaciones capaces de controlar dichas limitaciones.

El uso del ZnO como fotocatalizador presenta diversos inconvenientes durante su aplicación.

- I. Debido a que su ancho de banda prohibida se encuentra en el rango del ultravioleta, el ZnO es transparente al espectro de luz visible, razón por la que solo se es posible beneficiarse de una pequeña fracción de luz solar (3-5%) (Villagrán, 2018).
- II. El elevado índice de recombinación de los portadores de carga fotoinducidos dificultan su llegada a la superficie, esto provoca un retraso en las reacciones químicas que ocurren en la interfaz entre el semiconductor y el líquido (Martínez, 2013).
- III. Cuando se es sometido a irradiación, el ZnO presenta una alta fotocorrosión; además de disolverse en soluciones ácidas y alcalinas (Villagrán, 2018).

Se han encontrado innumerables investigaciones que buscan mejorar la respuesta ante la luz visible de este óxido, y la solución más recurrente es la adaptación de dopajes, permitiendo acoplar metales, no metales, semiconductores y algunas tierras raras.

5.2 Dopaje de ZnO con elementos metálicos y no metálicos

El dopaje ha sido extensamente empleado como uno de los medios más eficaces para mejorar la conductividad electrónica y ampliar el rango de los semiconductores al disminuir efectivamente su brecha de energía prohibida. En resumen, agregar metales nobles (Au, Ag, Pt o Pd), metales (Fe, Mg, Ca y Al), y/o elementos no metálicos como nitrógeno (N), carbono (C) y azufre (S), tiene un impacto positivo en la fotoactividad de los semiconductores en la región visible del espectro electromagnético (Kumaresan y

col., 2017).

Se dio a la tarea de recopilar información referente a la influencia del dopado mediante distintos elementos metálicos y no metálicos sobre el rendimiento fotocatalítico del ZnO, esto se resume en la Tabla 3. En dicha tabla, se muestran aspectos experimentales que se tomaron en cuenta en cada uno de los casos, se pone en contraste el agente dopante y la eficiencia de este, el haz de luz y el contaminante como base de referencia. Analizando los datos, podemos ver y resaltar el efecto de la plata sobre el ZnO, ya que en varios casos se aprecia una degradación del 100 % en lapsos de 90 a 180 minutos.

Tabla 3. Recopilación de resultados de ZnO dopado con distintos metales como fotocatalizadores.

Dopante	Haz de luz	Condiciones experimentales		Eficiencia fotocatalítica	
Pt	15 W Dos lámparas UV de 365 nm	Catalizador	50 mg	90% en 120 min	(Yuan y col., 2010)
		Contaminante	Violeta de metilo=10 ppm		
		100 ml			
Ag (3.5 % molar)	15 W Lámpara de mercurio	Catalizador	0.15 g/L	100% en 90 min	(Mohammad-zadeh, 2015)
		Contaminante	Azul ácido 113= 20 ppm		
		pH = 7.5			
Ag	λ= 420 nm	Catalizador	20 mg	80% en 150 min	(Wang y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B = 20 mg/L		
		40 ml			
Ag (5% molar)	Luz solar	Catalizador	0.01 g	90% en 30 min	(Zhai y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B= 1x10 ⁻⁵ mol/L		

		pH=7			
Ag (1% en peso)	Lámpara visible de 250 W	Catalizador	1 g/L	100% en 150 min	(Bouزيد y col., 2015)
		Contaminante	Azul de metileno = 0.02 mM		
		100 ml			
Ag	Lámpara de Xenón λ= 390-770 nm	Catalizador	2 x 2 cm	100% en 90 min	(Han y col., 2012)
		Contaminante	Rodamina B= 5μM		
		50 ml			
Ag (0.10 M)	Lámpara de Xenón 500W λ= 365-720 nm	Catalizador	10 mg	97% en 180 min	(Zheng y col., 2008)
		Contaminante	Rodamina B = 30 ppm		
		200 ml			
Pd (5% en peso)	Luz UV 100 W λ= 365 nm	Catalizador	50 mg	98.2% en 60 min	(Seddigi y col., 2014)
		Contaminante	Metil terc-butil éter = 2.3x10 ⁻⁵ M		
		250 ml			
Pd (1% en peso)	Lámpara UV	Catalizador	100 mg	100% en 300 min	(Güy y col., 2016)
		Contaminante	Metil terc-butil éter =100 ppm		
		350 ml			
Au (0.5% en peso)	Lámpara de Xenón 300W	Catalizador	10 mg	100% en 120 min	(Nagajyothi y col., 2016)
		Contaminante	Ácido salicilico=100μ M		
Au	Lámpara de	Catalizador	30 mg	100% en	(Lu y col.,

(0.75%mol/L	Xenón 300 W	Contaminante	Naranja de metilo = 5 mg/L	180 min	2016)
		20 ml			
Au	Lámpara de 100W λ≥400 nm	Catalizador	0.5 cm ²	100% en 180 min	(Ghosh y col., 2015)
		Contaminante	Rodamina B = 5.0x10 ⁻⁶ M Phenol=5.0x10 ⁻⁶ M		
		10 ml			
Ce (3.28% peso)	Lámpara de mercurio 125 W	Catalizador	0.075 g	99.5% en 70 min	(Kumar y col., 2015 b)
		Contaminante	Rojo-23=40ppm		
		150 ml			
Mg (2% en peso)	Lámpara UV-C 15 W λ=254 nm	Catalizador	40 mg	EEO= 86.00 kWh/m ³ /orden en	(Zarei y Behnajady, 2016)
		Contaminante	Rodamina B =10 mg/L		
		100 ml			
Fe	Lámpara fluorescente 65 W	Catalizador	30 mg	99.8 en 180 min	(Kwong y Yung, 2015)
		Contaminante	Tropaeolin O= 10 mg/L		
		pH=9, 20 ml			

Fuente: (Pirhashemi y col., 2018).

Conclusiones

La implementación de ZnO nanoestructurado en procesos de fotodegradación de contaminantes emerge como una estrategia novedosa y prometedora para hacer frente a los desafíos medioambientales actuales. Este óxido metálico no solo destaca por su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes tóxicos y persistentes, sino que también presenta una serie de beneficios significativos. Basándonos en investigaciones previas realizadas por numerosos autores, se ha comprobado que la

alta área superficial y la habilidad para crear pares de electrones y huecos de carga mediante la exposición a la radiación ultravioleta posibilitan una descomposición rápida y eficiente de los contaminantes.

- I. El ZnO presenta una estructura cristalina de tipo wurzita o hexagonal compacta, esto influye de gran medida en las propiedades fotocatalíticas de dicho material, ya que proporciona sitios activos en la superficie del material para la adsorción del contaminante y la generación de pares electrón-hueco.
- II. El óxido de zinc exhibe propiedades ópticas notables, siendo un semiconductor con un ancho de banda relativamente amplio, facilita la absorción eficiente de radiación UV. La conductividad eléctrica de este óxido favorece a la movilidad de los portadores de carga, garantizando una rápida separación y migración de los pares e-h.
- III. La estabilidad térmica del ZnO influye en su durabilidad y en la posibilidad de aplicaciones en condiciones ambientales variables.
- IV. El zinc y oxígeno son materiales abundantes y de bajo costo, lo que hace que el ZnO sea una opción económica para aplicación fotocatalítica a gran escala.

Estas propiedades junto con factores como, la concentración del ZnO, pH de la solución, temperatura y concentración del contaminante, son factores cruciales para garantizar o de alguna manera predecir la eficacia del fotocatalizador. Para mejorar la respuesta de este óxido metálico se han estado reportando avances científicos que sugieren el dopar con elementos metálicos o no metálicos el ZnO, destacando la plata, cobre, oro y magnesio. Al incorporar estos agentes, se puede modificar la estructura o niveles de energía del semiconductor, ampliando su rango de absorción de luz o mejorando la separación de portadores de carga, esto puede resultar en una mayor generación de pares electrón-hueco y en una mayor actividad fotocatalítica,

A medida que la investigación en este campo avanza, se espera que las nanopartículas de ZnO sigan desempeñando un papel crucial en la purificación del agua y el aire, contribuyendo así significativamente a un futuro más limpio y saludable para nuestro planeta.

Se plantea como futura indagación el recolectar información referente a la posibilidad de aumentar su efectividad. Se han desarrollado una serie de técnicas de modificación y aditivos químicos para minimizar las pérdidas por recombinación de los portadores de carga y se ha ampliado la respuesta espectral del ZnO al espectro visible mediante la aplicación de dopaje metálico, dopaje no metálico, dopaje RE, co-dopaje y semiconductores.

REFERENCIAS.

- Agustín García, A. F. (2023). Nanociencia, nanotecnología y nanoanalítica: Anotaciones, historia y anécdotas. *Real Academia Nacional de Farmacia*, 126: 11-33. <https://ranf.com/wp-content/uploads/academicos/discursos/numero/asuero/garciaasuero.pdf>
- Altarejos, D. A. Z. (2019). Medida de la conductividad térmicas de materiales porosos. *Biblioteca ETSI Industriales UPM*, 123: 10-12. <https://oa.upm.es/56064/>
- Altintas Yildirim, O., & Hanife, A. (2016). Facile synthesis of cobalt-doped zinc oxide thin films for highly efficient visible light photocatalysts. *Applied Surface Science*, 390: 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.069>
- Atares Huerta, L. (2013). Efecto del catalizador sobre la velocidad de reacción. *Compendio de Enzimología*, 155: 20-55. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83412/Atarés - Efecto del catalizador sobre la velocidad de reacción.pdf?sequence=1>
- Atif Mossad, A., Adel A. e Ismail, R. N. (2014). Preparation and characterization of ZnO-SiO₂ thin films as highly efficient photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 275: 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.11.002>
- Bello, U. A., & Exactas, F. D. E. C. (2011). Estudio fotofísico y fotoquímico de nuevas dihidropiridinas antihipertensivas en sistemas homogéneos y microheterogéneos. 58: 38-46. <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/1203>
- Bermejo, M. (2018). Fotocatalisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en gran vía. *Fotocatalizador*, 1, 47: 7-22. <https://oa.upm.es/49612/%0A>
- Borrego, A. (2021). Caracterización óptica-estructural y fotocatalítica de nanopartículas de ZnO, TiO₂ y Zn₂TiO₄ procesados por molienda de alta energía. 10, 188: 45-35.
- Bouzid, H., Faisal, M., Harraz, F. A., Al-Sayari, S. A., & Ismail, A. A. (2015). Synthesis of mesoporous Ag/ZnO nanocrystals with enhanced photocatalytic activity. *Catalysis Today*, 252, 7: 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.011>
- Caglar, M., Ilican, S., Caglar, Y., & Yakuphanoglu, F. (2009). Electrical conductivity and

- optical properties of ZnO nanostructured thin film. *Applied Surface Science*, 255(8), 4491–4496. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.055>
- Chen, X., Lu, W., Xu, T., Li, N., Qin, D., Zhu, Z., Wang, G., & Chen, W. (2017). A bio-inspired strategy to enhance the photocatalytic performance of g-C₃N₄ under solar irradiation by axial coordination with hemin. *Applied Catalysis B: Environmental*, 201: 518–526. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.020>
- Cheong, K. Y., Muti, N., & Ramanan, S. R. (2002). Electrical and optical studies of ZnO:Ga thin films fabricated via the sol-gel technique. *Thin Solid Films*, 410(1–2): 142–146. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00286-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00286-9)
- Chung, D. D. L. (1997). Processed and Packaged. In *Chemical Vapor Deposition. Semiconductors* (Issue 5, pp. 288–289). <https://news.skhynix.com/semiconductor-back-end-process-episode-3-understanding-the-different-types-of-semiconductor-packages/>
- Escobar Alarcón, L., & Solís Casados, D. A. (2020). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 23: 1-14. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Estrella González, A. (2018). Actividad Fotocatalítica de TiO₂ y Fe-TiO₂ Dispersos en una matriz de Sílice para la Degradación de Contaminantes Ambientales bajo Luz UV y Visible. 2, 95: 13-19.
- Gao, W., & Li, Z. (2009). Nanostructures of zinc oxide. *International Journal of Nanotechnology*, 6(3–4), 8: 1-7. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2009.022917>
- Garcia, R., & Nu, R. (2011). Synthesis and characterization of In-doped ZnO nano-powders produced by combustion synthesis. *Revista Mexicana de Física*, 57(2), 4: 1-4.
- Ghosh, A., Guha, P., Samantara, A. K., Jena, B. K., Bar, R., Ray, S., & Satyam, P. V. (2015). Simple growth of faceted Au-ZnO hetero-nanostructures on silicon substrates (nanowires and triangular nanoflakes): A shape and defect driven enhanced photocatalytic performance under visible light. *ACS Applied Materials*

- and Interfaces, 7(18), 37: 3-11. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00634>
- Grela, M. A., Loeb, B., Restrepo, G. M., Lagorio, M. G., & San Román, E. (2004). Los mecanismos de eliminación de contaminantes orgánicos. *Eliminación de Contaminantes Por Fotocatálisis Heterogénea*, 4, 118: 103-105.
- Guadalupe Rivera Gutiérrez, R., Preciado Rangel, P., Fortis Hernández, M., Yescas Coronado, P., & Arnaldo Orozco Vidal, J. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 2021, 12(5), 13: 1-3.
- Güy, N., Çakar, S., & Özacar, M. (2016). Comparison of palladium/zinc oxide photocatalysts prepared by different palladium doping methods for congo red degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 466, 10: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.009>
- Han, Z., Ren, L., Cui, Z., Chen, C., Pan, H., & Chen, J. (2012). Ag/ZnO flower heterostructures as a visible-light driven photocatalyst via surface plasmon resonance. *Applied Catalysis B: Environmental*, 126, 8: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.07.002>
- Hannachi, E., Slimani, Y., Nawaz, M., Sivakumar, R., Trabelsi, Z., Vignesh, R., Akhtar, S., Almessiere, M. A., Baykal, A., & Yasin, G. (2023). Preparation of cerium and yttrium doped ZnO nanoparticles and tracking their structural, optical, and photocatalytic performances. *Journal of Rare Earths*, 41(5), 682–688. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.03.020>
- Heredia, D. J. A. de los R. (2022). Química de materiales. Catálisis. *Revista Tendencias En Docencia e Investigación Química*, 289–302. <https://revistatediq.azc.uam.mx/>
- Hewlett, R. M., & McLachlan, M. A. (2016). Surface structure modification of ZnO and the impact on electronic properties. *Advanced Materials*, 28(20), 3893–3921. <https://doi.org/10.1002/adma.201503404>
- Illy, B. N., Cruickshank, A. C., Schumann, S., Da Campo, R., Jones, T. S., Heutz, S., McLachlan, M. A., McComb, D. W., Riley, D. J., & Ryan, M. P. (2011). Electrodeposition of ZnO layers for photovoltaic applications: Controlling film

- thickness and orientation. *Journal of Materials Chemistry*, 21(34): 12949–12957.
<https://doi.org/10.1039/c1jm11225b>
- Isidro Hernández, K. (2022). Degradación del colorante textil azo azul reactivo 69 (lanasol) por fotocátalisis heterogénea. *División de Ciencias Básicas e Ingeniería*, 131: 5-20. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.8928>
- Jiménez, E., Castellote, M. (2018). La fotocátalisis en construcción: Fundamentos y Métodos de Medida. [En línea] Disponible en: <https://docplayer.es/95379940-La-fotocatalisis-en-construccion-fundamentos-y-metodos-de-medida.html>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2023.
- Kannan, S., Subiramaniam, N. P., & Sathishkumar, M. (2021). Investigation on the structural, optical and photocatalytic degradation properties of Zns/Mn:Zns thin films under visible light irradiation. *Materials Today: Proceedings*, 38: 907–912.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.311>
- Katal, R., Masudy-panah, S., Kong, E. Y. J., Dasineh Khiavi, N., Abadi Farahani, M. H. D., & Gong, X. (2020). Nanocrystal-engineered thin CuO film photocatalyst for visible-light-driven photocatalytic degradation of organic pollutant in aqueous solution. *Catalysis Today*, 340 (May 2018), 236–244.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.019>
- Khodja, A. A., Sehili, T., Pilichowski, J. F., & Boule, P. (2001). Photocatalytic degradation of 2-phenylphenol on TiO₂ and ZnO in aqueous suspensions. *Journal of Photochemistry and Photobiology, Chemistry*, 141(2–3): 231–239.
[https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(01\)00423-3](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(01)00423-3)
- Kumar, R., Rashid, J., & Barakat, M. A. (2015 a). Zero valent Ag deposited TiO₂ for the efficient photocatalysis of methylene blue under UV-C light irradiation. *Colloids and Interface Science Communications*, 5: 1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.colcom.2015.05.001>
- Kumar, R., Umar, A., Kumar, G., Akhtar, M. S., Wang, Y., & Kim, S. H. (2015 b). Ce-doped ZnO nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of direct red-23 dye. *Ceramics International*, 41(6): 7773–7782.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.110>

- Kumaresan, S., Vallalperuman, K., Sathishkumar, S., Karthik, M., & SivaKarthik, P. (2017). Synthesis and systematic investigations of Al and Cu-doped ZnO nanoparticles and its structural, optical and photo-catalytic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(13): 9199–9205. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6654-7>
- Kwong, T. L., & Yung, K. F. (2015). Surfactant-free microwave-assisted synthesis of Fe-Doped ZnO nanostars as photocatalyst for degradation of tropaeolin O in water under visible light. *Journal of Nanomaterials*, 2015: 190747. <https://doi.org/10.1155/2015/190747>
- Lacombe, S., & Keller, N. (2012). Photocatalysis: Fundamentals and applications in JEP 2011. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(9): 3651–3654. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1040-8>
- López Vásquez, A., Almanza, O., Acosta, M. F., & Suárez-Escobar, A. (2016). Degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos presentes en agua residual de la industria litográfica mediante óxido de Bismuto(III)/óxido de Titanio (Bi₂O₃/TiO₂). *Informacion Tecnologica*, 27(1): 147–158. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000100016>
- Lu, J., Wang, H., Peng, D., Chen, T., Dong, S., & Chang, Y. (2016). Synthesis and properties of Au/ZnO nanorods as a plasmonic photocatalyst. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 78: 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.11.035>
- Martínez, E. D. (2013). Películas delgadas nano-compuestas (nanopartícula metálica/matriz mesoporosa) con aplicaciones en espectroscopía RAMAN amplificada por superficies. Departamento Académico de Agrosilvo Pastoral, 75: 4-10. Tesis [En línea] Disponible en: https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/574/1/TFCA_114.pdf
- Medrano, D. R. (2021). Actividad fotocatalítica de perovskitas de Nd para la degradación de contaminantes. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, 96: 7-13. Tesis [En línea] Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3479>
- Mendivil Reynoso. (2012). Fabricación de transistores FET a base de una película

- delgada de ZnO. División de Ciencias Exactas y Naturales, 75: 6-27. Tesis [En Línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12984/7572>
- Miren García R. N., Monasterio Guisasola, A. (2018). Transmisión de calor por electrones. *Introducción a La Ciencia de Los Materiales y Sus Propiedades*. [En Línea]. Disponible en: <https://acortar.link/DIz7Kx>. Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2023.
- Mohammadzadeh, S., Olya, M. E., Arabi, A. M., Shariati, A., & Khosravi Nikou, M. R. (2015). Synthesis, characterization and application of ZnO-Ag as a nanophotocatalyst for organic compounds degradation, mechanism and economic study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 35: 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.030>
- Morales, M.E., S. (2020). Método de transferencia de calor. *Transferencia de Calor Máquinas y Equipos Térmicos* [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/BycEye>. Fecha de consulta: 7 de noviembre del 2023.
- Mosqueda, M. C. R. (2011). Uso del ZnO en la degradación del triclosan mediante irradiación de luz UV. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. 01, 77: 14-26. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/80vct2>
- Nagajyothi, P. C., Lim, H., Shim, J., & Rawal, S. B. (2016). Au nanoparticles supported nanoporous ZnO sphere for enhanced photocatalytic activity under UV-Light irradiation. *Journal of Cluster Science*, 27(4): 1159–1170. <https://doi.org/10.1007/s10876-016-0980-4>
- Okemoto, A., Kishishita, K., Maeda, S., Gohda, S., Misaki, M., Koshiba, Y., Ishida, K., Horie, T., Taniya, K., Ichihashi, Y., & Nishiyama, S. (2016). Application of picene thin-film semiconductor as a photocatalyst for photocatalytic hydrogen formation from water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 192: 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.03.028>
- Onna, D. A. (2017). Fotoluminiscencia de nanopartículas en películas delgadas de óxidos mesoestructurados. Departamento de Química Inorgánica, Analítica y Química Física 180: 13-20. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/kH4SBT>

- Ortega, M. Y., Salinas Gutiérrez, J. M., Guzmán Velderrain, V., Delgado Vigil, M. D., López Ortiz, A., & Collins-Martínez, V. (2011). Semiconductores alternos Al/TiO₂ como fotocatalizadores para la degradación de compuestos orgánicos. *Síntesis y Caracterización de Materiales y Minerales*. [En Línea] Disponible en: <https://acortar.link/44ltfY>. Fecha de consulta: 7 de noviembre de 2023.
- Oslen Jaimes, Rincón Isabel Cristina, & Peña-Pedraza Heriberto. (2018). Correlation method in a ZnO crystal. *Ciencia En Desarrollo*, 9: 57–67. [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/UO83ts>. Fecha de consulta: 15 de noviembre del 2023.
- Pawar, R. C., Cho, D., & Lee, C. S. (2013). Fabrication of nanocomposite photocatalysts from zinc oxide nanostructures and reduced graphene oxide. *Current Applied Physics*, 13(4 SUPPL.2): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.12.031>
- Pham, T. T., Nguyen-Huy, C., Lee, H. J., Nguyen-Phan, T. D., Son, T. H., Kim, C. K., & Shin, E. W. (2015). Cu-doped TiO₂/reduced graphene oxide thin-film photocatalysts: Effect of Cu content upon methylene blue removal in water. *Ceramics International*, 41(9): 11184–11193. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.068>
- Pirhashemi, M., Habibi-Yangjeh, A., & Rahim Pouran, S. (2018). Review on the criteria anticipated for the fabrication of highly efficient ZnO-based visible-light-driven photocatalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 62: 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.01.012>
- Ramos Cano, J., González-Zamarripa, G., De Soria Aguilar, M. J., Amézaga Madrid, P., Hurtado Macías, A., González-Hernández, J., & Miki-Yoshida, M. (2013). Síntesis de películas delgadas base Pb-Ti depositadas por el método de CVD-AA, Caracterización Cristalográfica y Microestructural. *Superficies y Vacío*, 26(4): 143–147. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/TNIBKa>.
- Ravichandran, K., & Sindhuja, E. (2019). Fabrication of cost effective g-C₃N₄/Ag activated ZnO photocatalyst in thin film form for enhanced visible light responsive dye degradation. *Materials Chemistry and Physics*, 221: 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.038>

- Rodriguez Álvarez, A. (2023). Efecto en la actividad fotocatalítica de la inclusión de iones metálicos en microesferas de dióxido de titanio. Posgrado Interinstitucional En Ciencia y Tecnología, 88: 22-34. Tesis [En línea] Disponible en: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1285/1/18357.pdf>
- Rosas Chicas, M. (2015). Mecanismos y Cinética de Degradación del Colorante purpurina (1,2,4-trihidroxiantraquinona) en medio acuoso por Radicales Hidroxilo. *División Ciencias Básicas e Ingeniería*, 93: 11-33. [En línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/11191/6898>
- Ruiz, B. F. S. (2008). Síntesis y Caracterización de la Conversión hacia arriba en Nanocristales de ZnO:Er³. Centro de Investigaciones En Óptica A.C., 63: 2-4. <http://hdl.handle.net/11191/6898>
- Ruiz Peralta, M. de L. (2012). Síntesis de nanocompuestos de M/ZnO (M= Ag o Au) por irradiación de microondas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 113: 7-18. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/faecc8b0-2935-4087-9695-e7bd6b8d68d8>
- Seddigi, Z. S., Ahmed, S. A., Ansari, S. P., Yarkandi, N. H., Danish, E., Alkibash, A. A., Oteef, M. D. Y., & Ahmed, S. (2014). The effect of loading palladium on zinc oxide on the photocatalytic degradation of methyl tert-butyl ether (MTBE) in water. *Photochemistry and Photobiology*, 90(3): 491–495. <https://doi.org/10.1111/php.12242>
- Shanmugam, M., Alsalme, A., Alghamdi, A., & Jayavel, R. (2016). In-situ microwave synthesis of graphene–TiO₂ nanocomposites with enhanced photocatalytic properties for the degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 163: 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.029>
- Solis, M. A. V. (2016). Oxidación fotocatalítica de derrames de aceite en agua con TiO₂/UV. Maestría En Ingeniería Civil Oxidación, 163: 15-17. Tesis [En línea] Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/374/1/CF-Maestria en Ingeniería Civil-1019040160.pdf>
- Tejada Velásquez, I. Y. (2022). Degradación de colorantes utilizando radiación solar y

- visible mediante fotocatalizadores de $\text{Sr}_2\text{CeO}_4:\text{xNi}$. Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, 71: 11-12. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/fQrG0J>.
- Tokumoto, M. S., Briois, V., Santilli, C. V., & Pulcinelli, S. H. (2003). Preparation of ZnO nanoparticles : Structural Study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 547–551. [En línea] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020711702332>. Fecha de consulta: 10 de noviembre del 2023.
- Torres López, C. Y. (2013). Fotocatálisis en nanotubos metaestables de TiO_2 sobre electrodos de Ti para la degradación de naranja de metileno en electroquímica. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, 149: 12-22. Tesis [En línea] Disponible en: <https://acortar.link/JydkTA>
- Vanathi, P., Rajiv, P., Narendhran, S., Rajeshwari, S., Rahman, P. K. S. M., & Venckatesh, R. (2014). Biosynthesis and characterization of phyto mediated zinc oxide nanoparticles: A green chemistry approach. *Materials Letters*, 134: 13–15. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.029>
- Vilchez, J. M., Morales, A. M., Villalobos, G., Tonda, P., & Garrido, L. (2017). Enlace químico y fuerzas intermoleculares. *ESO 4. Física y Química*, 38–53. [En línea] Disponible en: https://dcb.ingenieria.unam.mx/wpcontent/themes/temperachild/CoordinacionesAcademicas/FQ/Q/Academia/Fzas_intermoleculares_MAJV.pdf. Fecha de consulta: 17 de noviembre del 2023.
- Villagrán Ocádiz, M. A. (2018). Propiedades de ZnO nanoestructurado obtenido por la oxidación térmica de capas de zinc depositadas por CSS. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 109: 57–79. Tesis [En línea] Disponible en: <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/2854>
- Wang, L., Liu, X. J., Hao, J., & Chu, L. Q. (2015). Long-range surface plasmon resonance sensors fabricated with plasma polymerized fluorocarbon thin films. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 215: 368–372. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.005>

- Wang, Z. L. (2004). Zinc oxide nanostructures: Growth, Properties and Applications. *Journal of Physics Condensed Matter*, 16(25), 31: 4-16. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/25/R01>
- Yuan, J., Choo, E. S. G., Tang, X., Sheng, Y., Ding, J., & Xue, J. (2010). Synthesis of ZnO-Pt nanoflowers and their photocatalytic applications. *Nanotechnology*, 21(18):185606 <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/18/185606>.
- Zaera, T. (2004). El óxido de Zinc: Crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas. Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo, 202: 9-12. [En línea] Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9872/tena.pdf?sequence=1>.
- Zarei, N., & Behnajady, M. A. (2016). Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of sol-gel prepared Mg/ZnO nanoparticles. *Desalination and Water Treatment*, 57(36): 16855–16861. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1083479>
- Zhai, H., Wang, L., Sun, D., Han, D., Qi, B., Li, X., Chang, L., & Yang, J. (2015). Direct sunlight responsive Ag-ZnO heterostructure photocatalyst: Enhanced degradation of rhodamine B. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 78: 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2014.11.004>
- Zheng, Y., Chen, C., Zhan, Y., Lin, X., Zheng, Q., Wei, K., & Zhu, J. (2008). Photocatalytic activity of Ag/ZnO heterostructure nanocatalyst: Correlation between structure and property. *Journal of Physical Chemistry*, 112(29): 10773–10777. <https://doi.org/10.1021/jp8027275>
- Zhou, J., Cheng, Y., & Yu, J. (2011). Preparation and characterization of visible-light-driven plasmonic photocatalyst Ag/AgCl/TiO₂ nanocomposite thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 223(2–3): 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.07.016>