

ESTUDIO DEL EFECTO DEL pH EN LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE CONTAMINANTES TEXTILES

STUDY OF THE EFFECT OF pH ON THE PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF TEXTILE CONTAMINANTS

Hernández-De los Santos X.^{1*}, López-Alejandro E. M.¹, Ramírez-Morales E.¹, Hernández-Cruz M. G.¹,
Rojas-Blanco L.^{1*}

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia
Magisterial, CP 86690 Villahermosa Centro, Tabasco, México.

*lizethrb@gmail.com

Artículo Científico

Publicado: 31 de julio 2025

RESUMEN

En este trabajo se analizó la importancia del pH en un proceso de fotocatálisis y se determinó el pH que favorece la degradación del contaminante. Los resultados muestran que los contaminantes textiles: azul de metileno y rodamina B con una concentración de 10 ppm y un pH elevado obtienen mayor degradación, debido a que al modificar el pH con una solución de hidróxido de sodio 2 M ésta libera iones hidroxilos, los cuales pueden absorber hidrógeno (H^+) e influir en la carga superficial y el tamaño de la banda del óxido de zinc, al igual que en la carga del contaminante textil, y al cambiar el tamaño de la banda se necesita menor energía para realizar la actividad electrón- hueco por lo que tiene mayor velocidad para la remoción del contaminante.

Palabras clave: Fotocatálisis, Concentración, Contaminación, pH

ABSTRACT

In this work the importance of pH in a photocatalysis process was analyzed as well as the pH at which greater degradation of the pollutant is obtained. The results show that the textile contaminants methylene blue and rhodamine B with a concentration of 10 ppm with a high pH obtain greater degradation because when changing the pH with a sodium hydroxide solution with a concentration of 2 M it releases hydroxyl ions which can absorb hydrogen (H^+), this causes the surface charge and the size of the zinc oxide band to be influenced as well as the charge of the textile pollutant, and by changing the size of the band, less energy is needed to perform the electron-hole activity, so it has greater speed for the removal of the pollutant.

Key words: Photocatalysis, Concentration, Contamination, pH

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es un problema grave en la actualidad principalmente causado por las actividades antropogénicas de las cuales no se tiene control perjudicando las condiciones del ecosistema y de la salud humana. Los cuerpos de agua están contaminados por metales pesados y por contaminantes orgánicos los cuales se han mostrado con mayor agresividad [1]. En los contaminantes orgánicos se encuentran los colorantes utilizados en la industria textil como lo son el azul de metileno y rodamina B, para combatir la contaminación del agua se han realizado múltiples investigaciones para el desarrollo sostenible del tratamiento de aguas por lo que se implementaron procesos de osmosis inversa, coagulación, floculación, intercambio iónico, adsorción de carbón activado, ozonización, proceso foto-Fenton, oxidación avanzada y oxidación electroquímica [2]. En la oxidación avanzada se encuentra la fotocatálisis heterogénea la cual convierte fotones de energía en energía química y en comparación de otros métodos este puede eliminar los contaminantes y no solo transferirlo [3]. La fotocatálisis de semiconductores se muestra como una tecnología amigable con el medio ambiente la cual es capaz de degradar de manera efectiva contaminantes orgánicos del agua [4]. El elemento con mayor importancia en el proceso de fotocatálisis es el material que se utiliza como fotocatalizador debido a que son

los generadores de portadores de carga (electrones y huecos) [5]. Para elegir un catalizador que sea capaz de absorber de manera eficaz se tienen que tomar en cuenta aspectos como el área superficial, la porosidad, la capacidad de adsorción, la estabilidad mecánica y factores como la rentabilidad, la regeneración, la sostenibilidad y la selectividad [1]. Los materiales semiconductores son fotocatalizadores ideales ya que generan los portadores de carga y al ser irradiados con fotones con energía igual o mayor a la de la banda prohibida del material comienza la absorción de fotones incidentes [5].

En el presente trabajo de investigación se utiliza como fotocatalizador óxido de zinc (ZnO) debido a que tiene una banda prohibida amplia, buena transparencia, alta movilidad de electrones y fuerte luminiscencia a temperatura ambiente. La fotocatálisis se ve afectada por parámetros como la concentración de los reactivos precursores, la cantidad del fotocatalizador, la temperatura del medio de reacción, el tiempo de irradiación de la luz, la intensidad de la luz, el pH de la solución, el oxígeno disuelto en el medio de reacción, la naturaleza del sustrato, la superficie del catalizador y la estructura del fotocatalizador. El pH influye en la carga superficial del semiconductor, en el tamaño de la banda y la carga del contaminante [6]. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del pH en la actividad fotocatalítica y determinar el pH óptimo para obtener mayor porcentaje de degradación del contaminante.

METODOLOGÍA

Materiales. En la síntesis del ZnO se utilizó acetato de zinc di-hidratado ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) y agua desionizada (H_2O). Para preparar la solución de los contaminantes a 10 ppm, se utilizaron agua desionizada, azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) y rodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$).

Las soluciones utilizadas para ajustar el pH en las pruebas fotocatalíticas se prepararon con ácido clorhídrico (HCl) y agua desionizada para los pH ácidos y para los pH bases se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) y agua desionizada. El pH se midió con tiras reactivas CVQ2051 de CIVEQ.

Síntesis del óxido de zinc (ZnO). Para obtener el fotocatalizador ZnO se realizó la síntesis mediante productos químicos asistidos por microondas siguiendo la metodología que propone M. Arellano Cortaza y colaboradores en 2021 [7], para la cual se necesitaron 0.4 moles de acetato de zinc di-hidratado los cuales se disolvieron en 50 mL de etanol y 0.720 mL de agua desionizada, esta solución se mantuvo en agitación magnética durante 10 minutos, obteniendo un pH de 5, posteriormente a la agitación se modificó el pH a un valor de 8 con una solución de NaOH 4 M. La solución fue introducida al reactor de microondas de la marca Anton Paar modelo Multiwave PRO donde se irradió con 400 W durante 10 minutos, para después realizar lavados en repetidas ocasiones con agua para separar los polvos de ZnO del

sobrenadante y finalmente se secó el material en el horno durante 12 horas a 80 °C para obtener los polvos ZnO.

Pruebas fotocatalíticas. Para las pruebas fotocatalíticas se utilizaron 0.0240 g de ZnO, al cual se le adicionaron 50 mL de la solución de colorante a 10 ppm de azul de metileno o rodamina B y fue introducido a un baño ultrasónico durante 30 minutos para establecer el equilibrio de adsorción-desorción, después de la agitación en el baño ultrasónico se midió el pH de la solución en un valor de 8. Posteriormente, la solución fue colocada en un fotoreactor tipo rectangular (**Figura 1**).

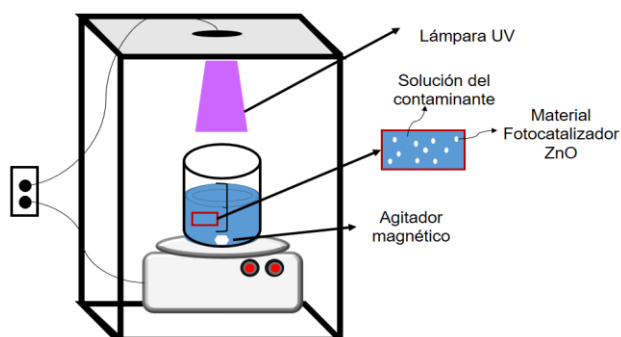


Figura 1. Fotoreactor tipo rectangular.

El cual cuenta con una lámpara de radiación UV de 20 W con una longitud de onda de 400 nm. La muestra se mantuvo en irradiación UV por un tiempo de 240 minutos mientras se agitaba de manera constante; cada 30 minutos se tomaron alícuotas, las cuales se centrifugaron para separar el contaminante del fotocatalizador durante 20 minutos a 2000 rpm.

Para evaluar la eficiencia fotocatalítica a diferentes pH's, se replicó el procedimiento anterior, pero después de retirar la solución del baño ultrasónico se ajustó el pH de la muestra con una solución de HCl 0.3 M para obtener los valores ácidos de pH 3, 5 y 7 y con una solución de NaOH 2 M para ajustar los pH básicos de 11 y 13. Finalmente, se determinaron las absorbancias de las muestras obtenidas con pH 3, pH 5, pH 7, pH 8, pH 11 y pH 13, en un espectrofotómetro UV-Visible de la marca Agilent. Para cuantificar la degradación del azul de metileno se siguió el borde de absorción en 664 nm y para la rodamina B en 554 nm.

RESULTADOS

DRX. Se realizó difracción de rayos X para analizar la fase cristalina del ZnO sintetizado. En la **Figura 2**, el patrón de difracción muestra que se trata de ZnO en fase hexagonal con estructura wurtzita, ya que coincide con la tarjeta cristalográfica PDF No. 00-036-1451. La nitidez de los picos indica una alta cristalinidad y no se encontraron puntos donde muestren impurezas que puedan presentarse en la red. Los picos difractados en el ángulo 2θ son: 31.88, 34.56, 36.36, 47.64, 56.68, 62.98, 66.42, 68.12, 69.22, 72.64 y 77.08, correspondientes a los planos cristalinos (1,0,0), (0,0,2), (1,0,1), (1,0,2), (1,1,0), (1,0,3), (2,0,0), (1,1,2), (2,0,1), (0,0,4) y (2,0,2) respectivamente.

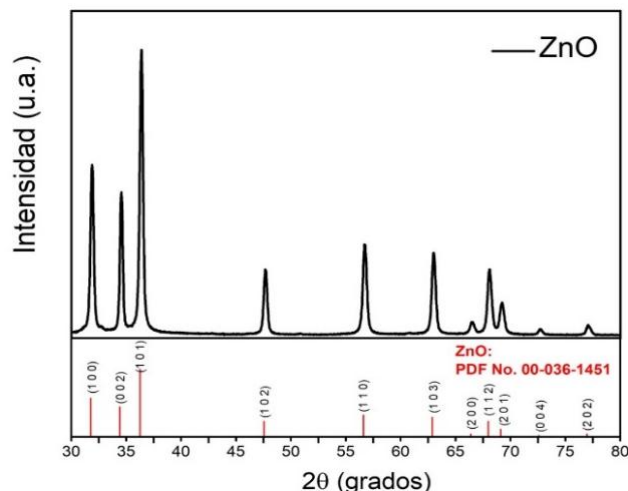


Figura 2. Difractograma de ZnO con el PDF CARD 00-036-1451 reportado para el ZnO.

Ajustes de pH. El pH inicial en la solución azul de metileno y rodamina B es de 7 (**Figura 3a**), al entrar en contacto con el fotocatalizador el pH asciende a 8 (**Figura 3b**), esto sucede porque al agregarle a una base iones de hidroxilo (OH^-) son eliminados los iones de hidrógeno de la solución.

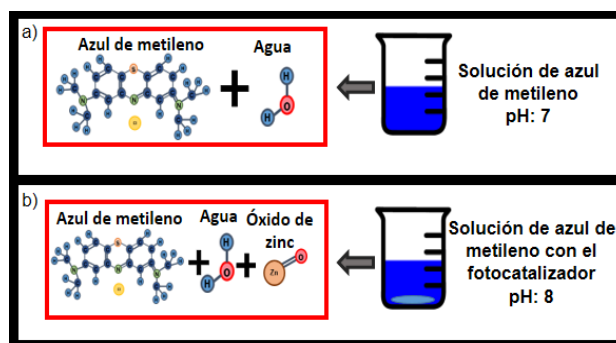


Figura 3. Esquema de las estructuras de los componentes en la solución acuosa. a) Para la solución de azul de metileno a 10 ppm, b) Para la solución de azul de metileno a 10 ppm + fotocatalizador ZnO.

La modificación en el pH de la solución afecta la carga del fotocatalizador en este caso del ZnO, que al ser un semiconductor se ven alteradas las posiciones de las bandas de máximos y mínimos y se denomina como una sustancia anfótera [8].

Antes de iniciar la prueba fotocatalítica se ajustó el pH de la solución y a cada alícuota retirada se le tomó lectura del pH, con la finalidad de verificar la variación durante todo el experimento. Lo cual mostró variación en algunos de los pH's para la solución de azul de metileno como en el pH 13 se redujo a pH 11 y en el pH 11 se redujo a pH 9, sin embargo, en los demás permaneció constante a lo ajustado inicialmente (**Figura 4a**). Para la solución de rodamina B, los pH's permanecieron constante excepto para el pH 11, el cual se redujo a pH 10 desde la muestra con 120 minutos (**Figura 4b**).

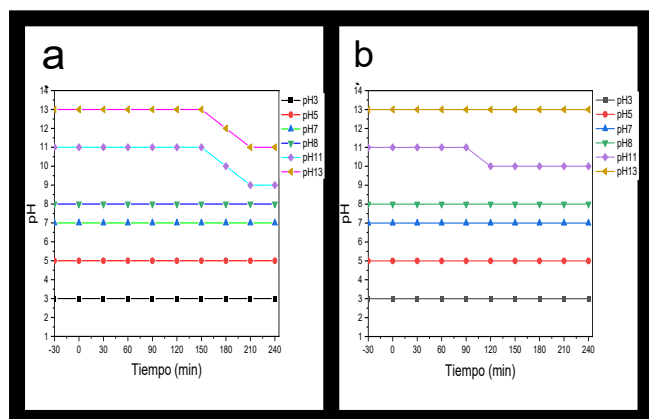


Figura 4. Comportamiento del pH durante la prueba fotocatalítica, a) Muestras de azul de metileno a 10 ppm, b) Muestras de rodamina B a 10 ppm.

Pruebas fotocatalíticas. Las muestras de la fotocatálisis de azul de metileno se midieron en un espectrofotómetro UV-Visible para líquidos y con los datos obtenidos se construyó una gráfica para cada pH, para así observar el comportamiento de degradación del contaminante, relacionando la longitud de onda contra el tiempo.

En la **Figura 5** se muestra la absorción del azul de metileno y su degradación conforme el aumento del pH, con el pH 3 observamos que la degradación fue muy baja y conforme el tiempo las bandas no disminuyeron, en el pH 5 no se distinguen la separación de las bandas incluso las bandas con el pH 3 donde la solución es más ácida obtuvieron mejor absorción, en las muestras del pH 8 que es el estado natural de la solución observamos que las bandas van decreciendo conforme pasa el tiempo por lo que hay una buena degradación, pero al manipular el pH a 11 y pH 13 obtenemos mejores resultados desde los primeros 30 minutos eliminando gran parte del contaminante.

Por otra parte, las muestras obtenidas en la prueba fotocatalítica de la rodamina B se midieron de igual forma en el espectrofotómetro UV-Visible para líquidos.

En las gráficas con pH 3 y pH 5 las cuales son ácidas podemos notar que las bandas se superpusieron y no hay diferencia en los primeros 30 minutos con los 240 minutos que duró la prueba ,

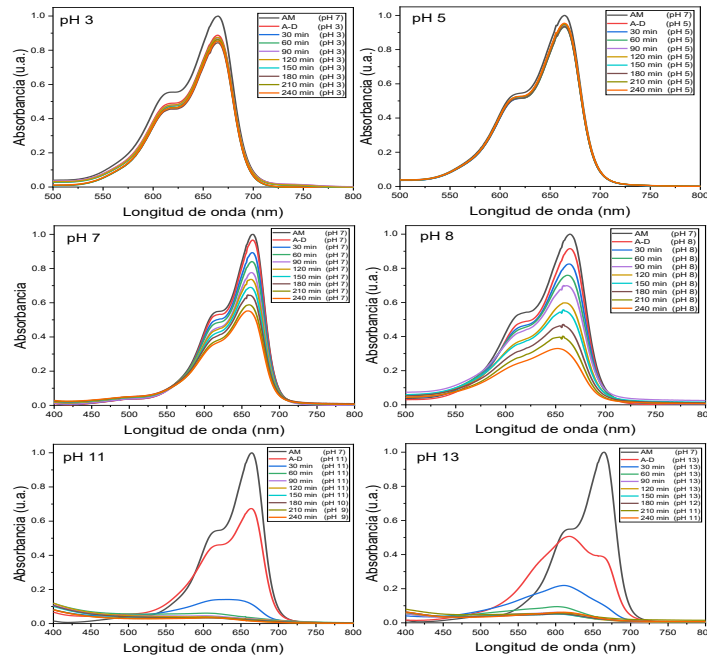


Figura 5. Espectros de absorción de la solución de azul de metileno con diferentes pH durante la degradación fotocatalítica.

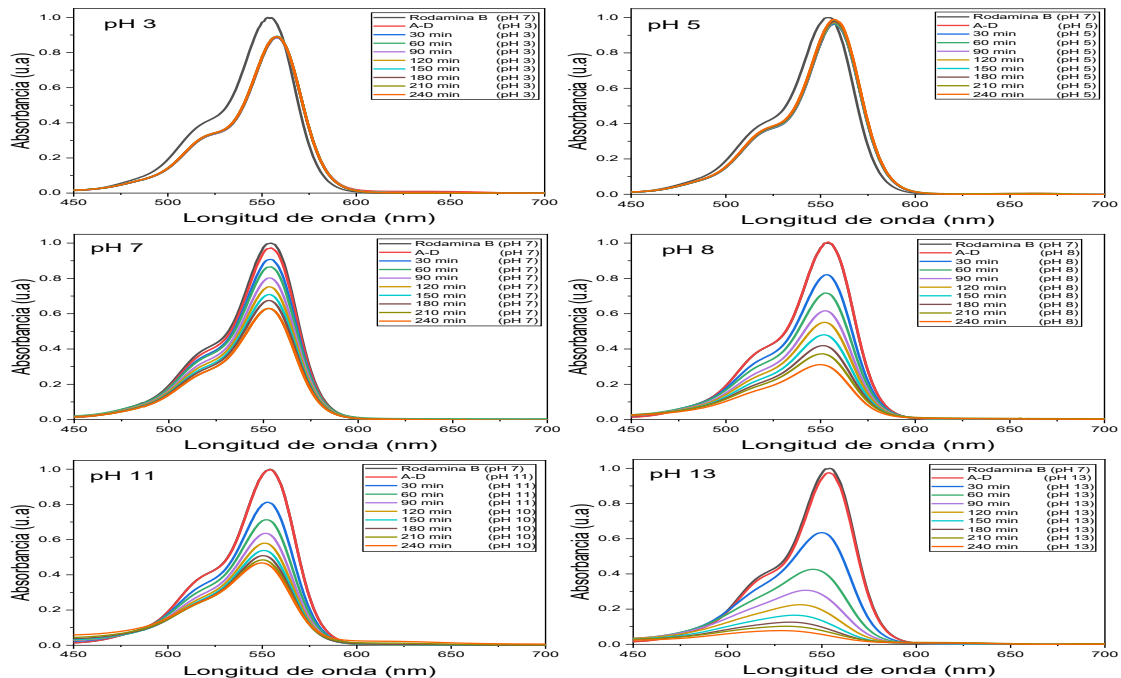


Figura 6. Espectros de absorción de la solución de rodamina B con diferentes pH durante la degradación fotocatalítica.

en comparación de los pH bases que desde la primera muestra de 30 minutos se nota como disminuyen sus bandas, con el pH 8 el cual es el estado natural de la solución al igual que para la solución azul de metileno los resultados fueron buenos debido a que se puede notar la degradación del contaminante pero se obtuvieron mejores resultados con pH 13 debido a que en la última muestra se observa que el contaminante degrada en mayor cantidad y la curva característica de la rodamina va desapareciendo. El azul de metileno tiene una longitud de absorción máxima de 664 nm y la rodamina B de 554 nm, estos datos se utilizaron como referencia para determinar la capacidad de adsorción del ZnO registrando los resultados con los diferentes pH en la **Figura 7**, en donde se observa que el pH tiene influencia significativa en el proceso de fotocátalisis debido a que si se aumenta el pH de la solución aumenta la cantidad de adsorción, cuando se cambia el pH se regula la ionización del ZnO al igual que de los colorantes.

Para calcular la eficiencia de degradación del azul de metileno y de rodamina B se utilizó la siguiente formula:

$$\% \text{ de degradación: } \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Donde C_0 se refiere a la concentración inicial del colorante de la degradación y C_t es la absorbancia del colorante en un tiempo determinado, aplicando esta fórmula se obtuvo la eficiencia de

degradación después de 240 minutos de irradiación la cual se registró en la **Tabla 1**.

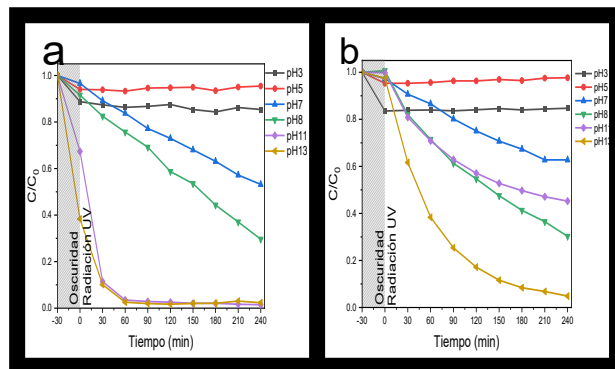


Figura 7. Gráfico de la relación del contaminante a diferentes pH durante 240 minutos. a) Comportamiento del azul de metileno a 10 ppm con diferentes pH. B) Comportamiento de rodamina B a 10 ppm con diferentes pH.

Tabla 1. Eficiencia de degradación en 240 minutos del azul de metileno y rodamina B

% Degradación		
pH	Azul de metileno	Rodamina B
pH 3	14.60	15.30
pH 5	4.52	2.33
pH 7	46.81	37.25
pH 8	70.37	69.74
pH 11	98.53	54.78
pH 13	97.68	95.16

Como se muestra en las **Figuras 3 y 4**, para las soluciones con pH ácidos presentaron menor porcentaje de degradación, mientras que las soluciones de pH base 11 y 13 presentaron mayor degradación para ambos colorantes observando que las bandas de absorción de las moléculas de ambos colorantes disminuyeron en el aumento del pH y conforme pasaba el

tiempo, esto debido a que el pH influye en la carga superficial del fotocatalizador y para los pH ácidos toma una carga superficial negativa por lo que ocurre una reducción en la eficiencia del proceso, en cambio para los pH bases la carga superficial es positiva adsorbiendo con facilidad las moléculas de carga negativa mejorando la eficiencia de la remoción del contaminante [5].

CONCLUSIONES

Al utilizar ZnO como fotocatalizador se obtuvieron resultados que pocos estudios demuestran de manera experimental. Con los resultados generados podemos decir que a pH ácidos se observó bajo porcentaje de degradación por lo que es poco factible trabajar a medios tan ácidos. Por lo contrario, con los pH básicos se obtuvieron mejores eficiencias de degradación de contaminantes como son el azul de metileno y la rodamina B, ambos colorantes usados ampliamente en la industria textil. Este trabajo cuenta con muchas áreas de oportunidad que se pueden estudiar, por ejemplo, evaluar la degradación de otro tipo de contaminantes como pesticidas, herbicidas o fármacos, con el objetivo de conocer cuáles son los pH's con lo que tienen una mayor eficiencia de degradación o bien para determinar si se comporta de manera similar a los colorantes aquí tratados. Además, se pueden evaluar otro tipo de semiconductores con la misma

metodología para verificar comportamientos semejantes. De manera complementaria se podría realizar un estudio de Carbono Orgánico Total para verificar la materia orgánica disuelta en los diferentes pH's.

REFERENCIAS

- [1] M. Chen, W. Chang, J. Zhang, W. Zhao y Z. Chen, "Preparation of a Hybrid TiO₂ and 1T/2H-MoS₂ Photocatalyst for the Degradation of Tetracycline Hydrochloride", *ACS Omega*, abril de 2023. Disponible: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00730>
- [2] J. J. Carranza Salazar, "Degradación por fotocatálisis de colorantes en medio acuoso utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO)", Para optar el título profesional de ingeniero forestal y del medio ambiente, Univ. Nac. Tumbes, Tumbes, 2019.
- [3] S. N. Ahmed y W. Haider, "Heterogeneous photocatalysis and its potential applications in water and wastewater treatment: a review", *Nanotechnology*, vol. 29, n. ° 34, p. 342001, junio de 2018. Disponible: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aac6ea>
- [4] E.E. Florez Arrieta y E. J. Escorcía Gomez, "Degradación De Amoxicilina Mediante Fotocatálisis Solar Heterogénea Con TiO₂ Soportado", Tesis de

- grado para optar por el título de Ingeniero Químico, Univ. Cartagena, Cartagena De Indias D.T. Y C., 2013.
- [5] M. Rodríguez Peña y C.E. Barrera Díaz, “*Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua*”. Toluca, Estado de México: Secr. Investig. Estud. Av., 2020.
- [6] A. Kumar, “A Review on the Factors Affecting the Photocatalytic Degradation of Hazardous Materials”, *Mater. Sci. & Eng. Int. J.*, vol. 1, n.º 3, noviembre de 2017. Disponible: <https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00018>
- [7] M. Arellano-Cortaza, E. Ramírez-Morales, U. Pal, G. Pérez-Hernández y L. Rojas-Blanco, “pH dependent morphology and texture evolution of ZnO nanoparticles fabricated by microwave-assisted chemical synthesis and their photocatalytic dye degradation activities”, *Ceram. Int.*, vol. 47, n.º 19, pp. 27469–27478, octubre de 2021. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.170>
- [8] R. Chuquichanca, E. León Tinedo y D. Violeta, “Obtención De Óxido De Zinc a Partir De Pilas Carbono-Zinc Desechables”, Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Univ. Nac. Del Callao, Peru, 2019.

