



ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación fotocolorimétrica del proceso de degradación de un colorante textil mediante fotólisis heterogénea

José Luis Xochihua Juan¹, Oscar Enrique Morales Moguel^{1*}, Arsenio Sosa Fomperosa¹, Eduardo Valdez Vázquez¹

¹Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Recepción 29 de junio de 2022. Aceptación 30 de noviembre de 2022

PALABRAS CLAVE

Fotocatálisis heterogénea
Fotocolorímetro
didáctico
Azul de mezclilla
Dióxido de titanio

Resumen

La urbanización, industrialización y el desarrollo económico son algunas de las principales causas de la contaminación ambiental. Una de las principales fuentes de contaminación es la industria textil, pues sus descargas de agua contaminada impactan a los medios naturales y propagan la contaminación con efluentes que contienen sustancias químicas como los colorantes. La fotocatalisis heterogénea es considerada una buena alternativa de tratamiento de aguas residuales industriales al favorecer la degradación de colorantes orgánicos textiles y lograr la mineralización de los contaminantes al obtener subproductos inocuos al medio ambiente (agua, CO₂ y ácidos inorgánicos), el fotocatalizador suele ser económico, inocuo y reutilizable. Además, existe la posibilidad de que el proceso se desarrolle bajo radiación solar con un enfoque sustentable. En el presente trabajo, se realizó la fotodegradación de azul de mezclilla (AM) en solución acuosa empleando un reactor batch a nivel laboratorio y para determinar el porcentaje de degradación obtenido por el tratamiento se utilizó un dispositivo de bajo costo y accesible en todo tipo de lugares, es decir, un fotocolorímetro. Además, como parte de la experimentación se consideró un diseño experimental, en el cual la concentración del catalizador y la concentración del colorante contaminante fueron los factores de estudio. Los resultados indicaron que la fotocatalisis heterogénea resulta favorable para la degradación de compuestos orgánicos al obtener el 100% de la degradación de las 1000 ppm del azul de mezclilla (AM) junto con la aplicación de 500 ppm de TiO₂.

<https://doi.org/10.56382/tdis.remcid.2022.1.2.1.8>

Correspondencia: Oscar Enrique Morales Moguel. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Campus Gutiérrez Zamora, Carretera Gutiérrez Zamora-Boca de Lima Km 2.5 Gutiérrez Zamora, Veracruz, México, Tel.: 7668451952, correo electrónico: oscar_d@utgz.edu.mx

ISSN: 2954-498X · e-ISSN: 2954-4998. - Revista Multidisciplinaria de Ciencia Innovación y Desarrollo © 2022. Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora. Todos los derechos reservados

PALABRAS CLAVE

Heterogeneous photocatalysis
Didactic photocolormeter
Denim blue
Titanium dioxide

Abstract

Urbanization, industrialization and economic development are some of the causes of environmental pollution. The textile industry wastewater is the main pollutant that damage natural resources with various chemical substances such as dyes. Heterogeneous photocatalysis is one of the best wastewater treatments due to it allows the degradation of organic textile dyes and to obtain by-products harmless to the environment (water, CO₂ and inorganic acids). In addition, the photocatalyst is usually economical, harmless and reusable and the process could be sustainable with solar radiation. In this research, photodegradation denim blue (AM) in aqueous solution was carried out into a batch reactor and the degradation percentage was taken with an inexpensive device called photocolormeter. In addition, as part of the experimentation, an experimental design was considered, in which the concentration of the catalyst and the concentration of the polluting dye were the study factors. Results designate that heterogeneous photocatalysis is a favorable degradation process due to the obtained percentage of 100% with 1000 ppm (AM) and 500 ppm TiO₂.

Introducción

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales actuales, ocasionado por las descargas de aguas residuales que pueden provenir de la actividad industrial. En este caso, el sector textil destaca como una de las fuentes de contaminación puntual al presentar ciertas concentraciones de colorantes derivado del proceso de teñido (Martínez *et al.*, 2014; Sánchez y Uribe, 2018). En atención a la situación ambiental, se han aplicado distintos tratamientos de aguas residuales con la finalidad de eliminar diversos compuestos y obtener agua de calidad aceptable (Gil *et al.*, 2012; Abdelbasir y Shalan, 2019; Mao *et al.*, 2022), mismas que llegan a presentar ciertas limitaciones en costos, tiempo de operación e incluso la obtención de productos indeseables (Mehndiratta *et al.*, 2013). Una alternativa adicional a los tratamientos convencionales (coagulación, filtración, métodos biológicos, etc.) (Byrne *et al.*, 2018; Yap *et al.*, 2018) son los procesos de oxidación avanzada, destacando específicamente la fotocatalisis heterogénea (Vela *et al.*, 2018; Molinari *et al.*, 2017; Sagadevan *et al.*, 2022). Dicha tecnología requiere el uso de nanopartículas semiconductoras como el dióxido de titanio (fotocatalizador) activadas con luz UV, promoviendo la generación de especies reactivas (radicales hidroxilos y superóxidos que tienen la capacidad de degradar compuestos orgánicos recalcitrantes en solución (colorantes textiles, pesticidas, fármacos, entre otros) hasta su mineralización (Starling *et al.*, 2017;

Bahri *et al.*, 2018; Sillanpää *et al.*, 2018). Asociado a lo anterior, es importante promover la investigación sobre el tratamiento de aguas residuales industriales por medio de la fotocatalisis heterogénea, partiendo de propuestas experimentales a nivel laboratorio y la aplicación de técnicas como la espectrofotometría UV-visible para el análisis cuantitativo de sustancias en solución (colorantes textiles) (Corzo y Vega, 2012; Torres *et al.*, 2017; Alkorbi *et al.*, 2022).

Sin embargo, la limitación económica para la adquisición de equipos de laboratorio ha promovido la construcción de dispositivos de bajo costo, tal es el caso de los fotocolorímetros para realizar análisis cuantitativos con base a la intensidad de color de una solución (Nabor *et al.*, 2016; Limón-Hernández *et al.*, 2021; Lara *et al.*, 2022). De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este proyecto fue evaluar la fotocatalisis heterogénea para la degradación del colorante comercial azul de mezclilla (AM) a nivel laboratorio con luz UV y dióxido de titanio.

Material y métodos

El estudio experimental correspondió a la degradación del colorante azul de mezclilla presente en solución acuosa por medio de la aplicación de fotocatalisis heterogénea mediada por el fotocatalizador TiO₂ y luz ultravioleta.

Reactivos

Se utilizó como contaminante modelo el colorante AM de la marca comercial “caballito” y el fotocatalizador dióxido de titanio Degussa P-25 (Sigma-Aldrich).

Sistema de reacción fotocatalítica UV

El sistema de reacción se construyó basado en el trabajo de Luna-Sánchez *et al.* (2012), mismo que constó de un cilindro externo de acero inoxidable de 22 cm de altura y 24 cm de diámetro. En su pared interna tenía instalado verticalmente una lámpara UV-C () de 11 W. En la parte inferior central del sistema se colocó el reactor batch (vaso de precipitado Pyrex), cuyo volumen de trabajo fue de 200 mL y mismo que se acopló a una parrilla de agitación (500 rpm) para la suspensión del fotocatalizador (Figura 1).

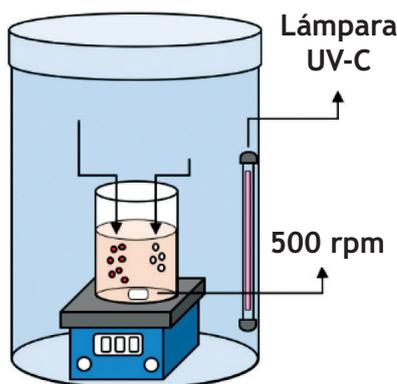


Figura 1. Sistema de reacción fotocatalítica

Diseño experimental y análisis estadístico

Las pruebas experimentales se establecieron a partir de un diseño factorial 22, tomando en consideración lo reportado por Hernández *et al.* (2012). Las variables de entrada correspondieron a la concentración del colorante azul mezclilla (AM_x) y del fotocatalizador dióxido de titanio Degussa P25 (TiO_{2-x}) en la solución, identificando a “x” como la concentración utilizada de cada compuesto en el proceso de degradación (Tabla 1). Por lo tanto, la denotación AM_{-1000} y AM_{-500} indicó las 1000 y 500 ppm de colorante, mientras que TiO_{2-500} y TiO_{2-250} denotaron las 500 y 250 ppm de fotocatalizador. En contraste, la variable de respuesta se asoció al porcentaje de degradación.

Tabla 1. Diseño de experimentos

Ensayo	AM (ppm)	TiO ₂ (ppm)
1	1000	500
2	1000	250
3	500	500
4	500	250

La eficiencia de los tratamientos propuestos se determinó con un análisis ANOVA y un diagrama de Pareto para conocer los factores significativos sobre la concentración final del colorante AM.

Pruebas de degradación fotocatalítica UV

La experimentación se realizó de acuerdo con la Tabla 1, así mismo, el sistema de reacción se sometió a agitación constante durante 140 minutos en presencia de luz UV. Durante la operación, se tomaron muestras cada 5 minutos hasta llegar a los 20 minutos y posteriormente cada 20 minutos con la finalidad de observar la degradación del colorante AM con respecto al tiempo. Cabe mencionar que el catalizador se separó de la alícuota de reacción mediante membranas Millipore de nitrocelulosa con diámetro de poro de 0.22 μ m. De acuerdo con cada prueba experimental se realizó por duplicado.

La concentración de las muestras de la reacción se determinó con un fotocolorímetro didáctico, construido de acuerdo con las especificaciones reportadas por Nabor *et al.* (2016) y Limón-Hernández *et al.* (2021). Para ello, se consideró la medición del voltaje de las muestras a una concentración definida de AM (R_i) y el voltaje de agua destilada como blanco de reactivos (R_0) junto con la aplicación de la Ecuación 1 para expresar las lecturas obtenidas en absorbancia:

$$A = -\log\left[\frac{R_i}{R_0}\right]$$

Ecuación 1. Relación matemática de voltaje y absorbancia

El seguimiento del proceso fotocatalítico se realizó mediante las mediciones de voltaje de las muestras de reacción por instante de tiempo y así se definió el porcentaje de degradación del AM.

Resultados

Los resultados de la fase experimental del proceso de

degradación se pueden observar en la Figura 2, con dos variables experimentales: concentración del colorante y concentración del fotocatalizador. En este caso, la mayor eficiencia (mayor de degradación en el mismo tiempo) se obtuvo al emplear la mayor concentración de fotocatalizador, es decir, 500 ppm de TiO_2 . No obstante, el tratamiento fotocatalítico con mayor eficiencia se alcanzó cuando se aplicó 1000 ppm de AM y 500 ppm de TiO_2 al obtenerse el 100% de degradación de AM a los 100 minutos del proceso.

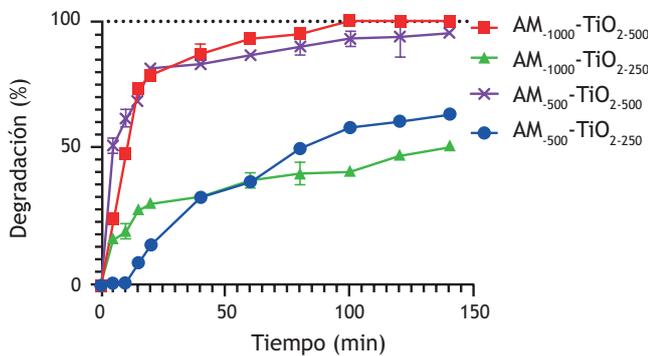


Figura 2. Porcentaje de degradación del colorante

Con base en los resultados obtenidos se realizó la prueba de ANOVA (Tabla 2) con un nivel confianza del 95%, en donde se encontró que las variables de forma individual y sus interacciones presentan un p-valor por debajo del nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 2. Resultados de la prueba ANOVA.

Fuente	P-valor
C. Catalizador	0.000
C. Contaminante	0.005
C. Catalizador* C. Contaminante	0.000

Por otra parte, se obtuvo un diagrama de Pareto con los resultados de la prueba de ANOVA (Figura 3), en el cual se puede observar que el factor que tiene un mayor efecto en la variable respuesta es la concentración del catalizador, seguido de la interacción entre los factores concentración de contaminante y concentración de catalizador, por último, el factor concentración del contaminante de forma individual es que tiene menor efecto sobre la variable respuesta.

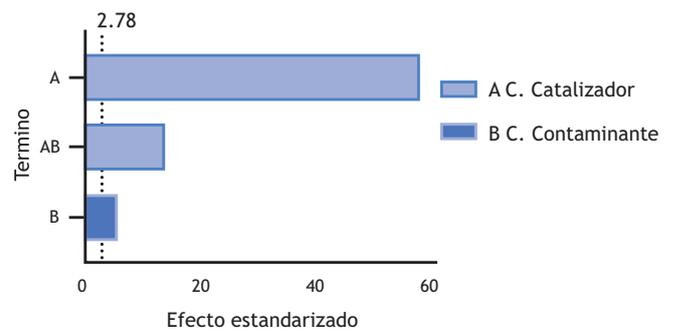


Figura 3. Diagrama de Pareto de los resultados de ANOVA

Discusión

Los resultados presentados en la Figura 2, demuestran que la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y luz UV-C (TiO_2/UV) favorece la degradación de compuestos orgánicos como el colorante azul de mezclilla en solución acuosa y puede ser considerada como una tecnología alternativa de tratamiento terciario de aguas residuales provenientes de la industria textil (Zaruma *et al.*, 2018). Lo anterior puede atribuirse a la activación efectiva del TiO_2 con fotones de luz UV debido a su composición química de anatasa (fase activa), logrando que los electrones de la banda de valencia fueran excitados y promovidos a la banda de conducción del TiO_2 , ocasionando la generación de pares electrón-hueco que favorecieron la producción de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y superóxidos ($\bullet\text{O}_2^-$), mismos que aceleraron la reacción fotoquímica (oxidación-reducción) con el AM retenido en la superficie del fotocatalizador hasta lograr su degradación (Giraldo *et al.*, 2004; Guarín *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Hernández *et al.*, 2012; Penagos, 2013).

Adicionalmente, se destaca que la eficiencia del proceso fotocatalítico para la degradación de contaminantes orgánicos se obtiene en un corto periodo de tiempo (Poyatos *et al.*, 2010) en comparación con los tratamientos físicos como es la adsorción (Barajas *et al.*, 2016; Valenzuela-Padilla y Torres-Pérez, 2020) y/o biológicos (aerobio o anaerobio) para la eliminación de colorantes en solución (López *et al.*, 2007). De acuerdo con los resultados de fotodegradación y al análisis estadístico empleado, la concentración del catalizador influye en la velocidad de degradación de AM. En este trabajo, se puede observar que la eficiencia de la reacción fotocatalítica se intensifica con un aumento en la concentración del TiO_2 , es decir, resulta más favorable utilizar 500 ppm de fotocatalizador en solución acuosa bajo las condiciones experimentales establecidas

(AM-1000-TiO₂₋₅₀₀ y AM₅₀₀-TiO₂₋₅₀₀). Lo anterior, puede ser atribuido a la existencia y disponibilidad de una mayor cantidad de sitios activos en la superficie del fotocatalizador, propiciando de esta manera un incremento en la producción de radicales hidroxilos que favorecieron la degradación del colorante AM (Giraldo *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 2012; Losada *et al.*, 2017). No obstante, se puede observar un incremento del porcentaje de degradación alrededor de los 100 minutos cuando se tiene la concentración del colorante de 1000 ppm en comparación a la de 500 ppm, siendo de aproximadamente del 100 y 91% respectivamente. El incremento en la degradación puede estar relacionado a que se favorece la interacción entre el colorante y el área superficial del fotocatalizador, beneficiando de esta manera la adsorción del compuesto y por consiguiente la reacción efectiva con los radicales hidroxilos que propiciarían su respectiva degradación (Losada *et al.*, 2017). Por otra parte, los resultados obtenidos son similares a trabajos de la misma índole como los reportados por Valencia *et al.* (2012) y Deza *et al.* (2017), teniendo como diferencia las sustancias contaminantes como resorcinol y el colorante Cibacron Navy H-2G para su degradación, y la variable pH como parte de las condiciones experimentales. Como complemento de este trabajo, es importante señalar que aunado a las ventajas de la fotocatálisis heterogénea también existen ciertas desventajas del tratamiento. Se puede mencionar que el desarrollo del proceso fotocatalítico llega a requerir el uso de sustancias químicas para la regulación del pH hasta la adición de agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno), los cuales incrementan el costo del tratamiento en la degradación de contaminantes como pueden ser los colorantes textiles. Asociado a lo anterior, el consumo de energía es otro aspecto por considerar y el cual involucra el tipo de reactor a utilizar. Continuando, se pueden señalar dos puntos adicionales que resaltan la generación de subproductos con mayor toxicidad en comparación con el contaminante orgánico inicial y, por último, la separación del fotocatalizador de la solución acuosa (agua residual tratada). Por lo tanto, como se observa los requisitos operativos (consumo de energía y separación del fotocatalizador) llegan a ser limitaciones que prevalecen actualmente para su escalamiento a nivel industrial (Pelaez *et al.*, 2012; Shukla *et al.*, 2021).

Conclusiones

La fotocatálisis heterogénea se puede utilizar para el tratamiento de aguas residuales industriales. Este

proceso se puede llevar a cabo con el uso de un reactor tipo Batch y un fotocolorímetro como una alternativa viable para la degradación de colorantes de la industria. En este estudio, se observó que el tratamiento con mayor efectividad (100 % de degradación) corresponde al AM-1000-TiO₂₋₅₀₀, mientras que el que menor efectividad con un 52% de degradación fue el de AM₅₀₀-TiO₂₋₂₅₀. Por otra parte, los tratamientos AM₅₀₀-TiO₂₋₅₀₀ y AM₁₀₀₀-TiO₂₋₂₅₀ obtuvieron un resultado de 64% y 97% respectivamente. Los resultados estadísticos permiten concluir que la concentración del catalizador es la variable de mayor influencia en la velocidad de degradación del proceso fotocatalítico, con un nivel de confianza del 95%. Finalmente, aunque en este estudio se obtuvieron porcentajes de degradación altos, es importante considerar más variables experimentales como la fuente de radiación (luz UV y luz visible), pH e incluso la agregación de un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno para observar el efecto en la producción de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) en el proceso de fotocatálisis heterogénea que permitan simular diferentes condiciones de muestras de agua contaminada de la industria.

Contribución de los autores

JLXL, diseño del trabajo y redacción.

OEMM, recolección de datos y redacción.

ASF, análisis estadístico y redacción.

EVV, recolección de datos y redacción.

Financiamiento

Recursos otorgados por la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Abdelbasir, S. M. y Shalan, A. E. (2019). An overview of nanomaterials for industrial wastewater treatment. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 36(8): 1209-1225.
2. Alkorbi, A. S., Javed, H. M. A., Hussain, S., Latif, S., Mahr, M. S., Mustafa, M. S. y Alhemiary, N. A. (2022). Solar light-driven photocatalytic degradation of methyl blue by carbon-doped TiO₂ nanoparticles. *Optical Materials*. 127: 112259.
3. Arellano, O., Ortega, L. E. y Gesundheit, P. M. (2012). Estudio de la contaminación en la cuenca del río Santiago y la salud pública en la región. *Greenpeace*. México, DF. 20 pp.
4. Bahri, M., Mahdavi, A., Mirzaei, A., Mansouri, A. y Haghghat, F. (2018). Integrated oxidation process and biological treatment for highly concentrated petrochemical effluents: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 125: 183-196.
5. Barajas, J., Cano, M., Castorena, J. H., Santiago, V. y Díaz, J. (2016). Remoción de colorantes por medio de Curcubitáceas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 7(4): 67-80.
6. Byrne, C., Subramanian, G. y Pillai, S. C. (2018). Recent advances in photocatalysis for environmental applications. *Journal of environmental chemical engineering*. 6 (3): 3531-3555.
7. Ceretta, M. B., Vieira, Y., Wolski, E. A., Foletto, E. L. y Silvestri, S. (2020). Biological degradation coupled to photocatalysis by ZnO/polypyrrole composite for the treatment of real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 35: 101230.
8. Corzo Lucioni, A. y Vega Baudrit, J. (2012). Estudio cinético de la degradación fotocatalítica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera. 13(2): 60-68.
9. Chen, H., Shen, M., Chen, R., Dai, K. y Peng, T. (2011). Photocatalytic degradation of commercial methyl parathion in aqueous suspension containing La-doped TiO₂ nanoparticles. *Environmental technology*. 32 (13): 1515-1522.
10. Deza Martí, Elizabeth, Osorio Anaya, Ana y Manrique Fajardo, Joaquín J. (2017). Evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron Navy H-2G empleando nanopartículas industriales de TiO₂. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 83(2): 160-173.
11. Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I. y Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Revista Producción + Limpia*. 7: 52-73.
12. Guarín Llanes, Carolay Yaneth y Mera Benavides, Adriana Consuelo. (2011). Fotocatálisis heterogénea con TiO₂ para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 10 (19), 79-88.
13. Giraldo, L. F. G., Franco, A. M. y Mesa, G. A. P. (2004). Fotodegradación con TiO₂ del colorante Rojo Amaranto en aguas. *Revista Lasallista de Investigación*. 1(2): 9-16.
14. Hasanbeigi, A. y Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*. 95: 30-44.
15. Hernández, J. M., García, L. A., García, R., Cueto, A., & Carmona, J. A. (2012). Estudio cinético de la fotodegradación del naranja de metilo en presencia de TiO₂: Efecto de la fuente de radiación UV, concentración del azo-colorante y del catalizador. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 3(2): 25-34.
16. Kushniarou, A., Garrido, I., Fenoll, J., Vela, N., Flores, P., Navarro, G. y Navarro, S. (2019). Solar photocatalytic reclamation of agro-waste water polluted with twelve pesticides for agricultural reuse. *Chemosphere*. 214: 839-845.
17. Lara, M. M. J., Hernández, R. A. L., Beristain, N. A. Z., Ortega, J. E. H., Ramírez, M. A. V., Hernández, V. L. y Vázquez, M. E. Z. (2022). Método a bajo costo para la cuantificación del grado alcohólico en muestras de tequila blanco. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 6(1): 2852-2866.
18. Limón-Hernández, R. A., López-Hernández, V. Aguilar, A. F. A., Hernández, M. I., Xochihua-Juan, J. L., Sosa, F. A. y Morales, M. O.E. (2021). Validación de un fotocolorímetro para análisis cuantitativos en la enseñanza de la química. *O ensino e a pesquisa em química 2* (pp. 25-39). Atena Editora.

19. López, C., Moreira, M., Feijoo, G. y Lema, J. (2007). Tecnologías para el tratamiento de efluentes de industrias textiles. *Afinidad*. 64(531): 561-573.
20. Losada, L. M., Laguna Castillo, E. J., Osorio Restrepo, E. A., Serna Galvis, E. A. y Torres Palma, R. A. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocatalisis con TiO_2 usando luz artificial y solar. *Produccion+ limpia*. 12(2): 50-60.
21. Luna-Sánchez, R. A., Zermeño-Resendiz, B. B., Moctezuma, E., Contreras-Bermúdez, R. E., Leyva, E. y López-Barragán, M. A. (2012). Fotodegradación de omeprazol en solución acuosa utilizando TiO_2 como catalizador. *Revista mexicana de ingeniería química*. 12(1): 85-95.
22. Mao, G., Han, Y., Liu, X., Crittenden, J., Huang, N., & Ahmad, U. M. (2022). Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis. *Chemosphere*. 288: 132483.
23. Martínez, A. C., Olivares, C. C., Lozada, A. E. y Ramírez, C. G. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*. 2(3).
24. Mehndiratta, P., Jain, A., Srivastava, S. y Gupta, N. (2013). Environmental pollution and nanotechnology. *Environment and Pollution*. 2(2): 49.
25. Molinari, R., Lavorato, C. y Argurio, P. (2017). Recent progress of photocatalytic membrane reactors in water treatment and in synthesis of organic compounds. A review. *Catalysis Today*. 281: 144-164.
26. Nabor, L. A. I., Candanedo, C. E., De la Cruz, D. I., Salazar, E. E., Salazar, J. P. y Cabrera, H. A. Prototipo de un fotocolorímetro didáctico de fuente abierta. *Revista Ingenieros*. 1(2): 29-34.
27. Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G. y Dionysiou, D. D. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*. 125: 331-349.
28. Penagos, J. A. C. (2013). Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocatalisis con TiO_2 /UV: caso azul de metileno. *Elementos*. 3(3): 149-156.
29. Poyatos, J. M., Muñio, M. M., Almecija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E. y Osorio, F. (2010). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art. *Water, Air, and Soil Pollution*. 205(1): 187-204.
30. Ramos-Delgado, N. A., Hinojosa-Reyes, L., Guzman-Mar, I. L., Gracia-Pinilla, M. A. y Hernández-Ramírez, A. 2013. Synthesis by sol-gel of WO_3/TiO_2 for solar photocatalytic degradation of malathion pesticide. *Catalysis today*. 209: 35-40.
31. Sagadevan, S., Fatimah, I., Egbosiuba, T. C., Alshahateet, S. F., Lett, J. A., Weldegebriael, G. K. y Johan, M. R. (2022). Photocatalytic Efficiency of Titanium Dioxide for Dyes and Heavy Metals Removal from Wastewater. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. 17(2): 430-450.
32. Sánchez, M. B. y Uribe, C. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista Campus*. 23(26).
33. Shukla, K., Agarwalla, S., Duraiswamy, S. y Gupta, R. K. (2021). Recent advances in heterogeneous micro-photoreactors for wastewater treatment application. *Chemical Engineering Science*. 235: 116511.
34. Sillanpää, M., Ncibi, M. C. y Matilainen, A. (2018). Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. *Journal of environmental management*. 208: 56-76.
35. Starling, M. C. V., Dos Santos, P. H. R., de Souza, F. A. R., Oliveira, S. C., Leão, M. y Amorim, C. C. (2017). Application of solar photo-Fenton toward toxicity removal and textile wastewater reuse. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(14): 12515-12528.
36. Torres, G. J. C., Martínez, G.M. T. M. y Del Ángel, S. J. (2017). Preparación de materiales fotosensibles para la remoción fotocatalítica de colorantes orgánicos de aguas residuales de la industria textil. *Jóvenes en la Ciencia*. 3(2): 773-777.
37. Valencia Sánchez, H. A., Reinoso Osorio, P. A. y Arias Ramirez, V. (2012). Degradación de resorcinol por fotocatalisis heterogénea usando TiO_2 y H_2O_2 . *Scientia Et Technica*, 2(50), 192-196.
38. Valenzuela-Padilla, A. A. y Torres-Pérez, J. (2020). Azoic dyes (A5 and R40) removal by activated carbon from pecan nut shells. *Ingeniería, investigación y tecnología*. 21(3).

39. Vela, N., Calín, M., Yáñez-Gascón, M. J., Garrido, I., Pérez-Lucas, G., Fenoll, J. y Navarro, S. (2018). Photocatalytic oxidation of six pesticides listed as endocrine disruptor chemicals from wastewater using two different TiO₂ samples at pilot plant scale under sunlight irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 353: 271-278.
40. Wang, G. H., Xu, L., Zhang, J., Yin, T. T. y Han, D. Y. 2012. Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ powders (P25) via calcination treatment. *International Journal of Photoenergy*. 2012: 1-9.
41. Yap, H. C., Pang, Y. L., Lim, S., Abdullah, A. Z., Ong, H. C. y Wu, C. H. (2018). A comprehensive review on state-of-the-art photo-, sono-, and sonophotocatalytic treatments to degrade emerging contaminants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 1-28.
42. Zaruma, P., Proal, J., Hernández, I. C. y Salas, H. I. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (19), 38-47.