

# Evaluación de la disminución de concentración de cefalexina en solución acuosa por medio de fotocátalisis con radiación UV-LED

Miguel Ángel Jiménez Pérez<sup>1a</sup> ; Rafael Nikolay Agudelo Valencia<sup>1b</sup> ;  
John Steven Devia Orjuela<sup>2</sup> ; Siby Inés Garces Polo<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad Libre, Bogotá D.C.- Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, Cali - Colombia.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería. Universidad Libre, Barranquilla - Colombia.

<sup>a</sup>miguela-jimenezp@unilibre.edu.co

*Fecha recepción: junio 29 de 2023*

*Fecha aceptación: noviembre 17 de 2023*

## Resumen

Se estudió el efecto de la radiación UV catalizada con  $\text{TiO}_2$  para la degradación de cefalexina, un antibiótico de amplio uso que hace parte de los llamados contaminantes emergentes, esta molécula tiene una estructura compleja por lo que requiere de procesos de oxidación avanzada para su degradación; para la oxidación fotocatalítica se plantearon experimentos de 1,5 h en reactores de 1 L con soluciones de cefalexina de 15 mg/L, en los que se evaluó en un diseño central compuesto la influencia del pH y la radiación; para la fotocátalisis se mantuvo constante la dosis de catalizador de  $\text{TiO}_2$  en 100 mg/L para cada experimento y se varió la cantidad de lámparas empleadas. Para comprobar la efectividad se analizó el porcentaje de disminución de concentración de cefalexina y carbono orgánico total. A través del análisis de varianza se encontró que la máxima reducción de la concentración de cefalexina del 33,42 % a pH 8 y 10 lámparas en el sistema. No se logró disminuir la concentración de carbono orgánico total ya que no hubo mineralización en el proceso, por lo que se recomienda para estudios posteriores el análisis de los productos del proceso para determinar en que se degrada la molécula.

**Palabras clave:** Cefalexina; contaminantes emergentes; Procesos de oxidación avanzada; Fotocatálisis; Radiación ultravioleta.

# Evaluation of the decrease in cephalexin concentration in aqueous solution using photocatalysis with UV-LED radiation

## Abstract

The effect of UV radiation catalyzed with  $\text{TiO}_2$  was studied for the degradation of cephalexin, a widely used antibiotic that is part of the so-called emerging contaminants. This molecule has a complex structure so it requires advanced oxidation processes for its degradation; For photocatalytic oxidation, 1.5 h experiments were planned in 1 L reactors with 15 mg/L Cephalexin solutions, in which the influence of pH and radiation was evaluated in a central composite design, the latter maintaining constant the dose of  $\text{TiO}_2$  catalyst at 100 mg/L for each experiment and the number of lamps used in the process was varied. To verify the effectiveness of the process, the percentage reduction in cephalexin concentration and total organic carbon was evaluated; An analysis of variance found that a maximum cephalexin concentration reduction of 33.42% was achieved at pH 8 and 10 lamps in the system. It was not possible to reduce the concentration of total organic carbon, so there was no mineralization in the process, so it is recommended for subsequent studies to analyze the products of the process to determine how the molecule is degraded.

**Keywords:** *Cephalexin; Emerging contaminants; Advanced oxidation processes; Photocatalysis; Ultraviolet radiation.*

# Avaliação da diminuição da concentração de cefalexina em solução aquosa por fotocatalise com radiação UV-LED

## Resumo

Foi estudado o efeito da radiação UV catalisada com  $\text{TiO}_2$  para a degradação da cefalexina, um antibiótico amplamente utilizado que faz parte dos chamados contaminantes emergentes. Esta molécula possui uma estrutura complexa, necessitando de processos avançados de oxidação para sua degradação. Para a oxidação fotocatalítica, foram planejados experimentos de 1,5 h em reatores de 1 L com soluções de Cefalexina 15 mg/L, nos quais a influência do pH e da radiação foi avaliada em um delineamento compósito central, este último mantendo constante a dose de catalisador de  $\text{TiO}_2$  a 100 mg/L para cada experimento e o número de lâmpadas utilizadas no processo foi variado. Para verificar a eficácia do processo, avaliou-se a redução percentual na concentração de cefalexina e no carbono orgânico total; uma análise de variância descobriu que uma redução máxima na concentração de cefalexina de 33,42% foi alcançada em pH 8 e 10 lâmpadas no sistema. Não foi possível reduzir a concentração de carbono orgânico total, portanto não houve mineralização no processo, por isso é recomendado para estudos posteriores analisar os produtos do processo para determinar como a molécula é degradada.

**Palavras-chave:** *Cefalexina; Contaminantes emergentes; Processos de oxidação avançados; Fotocatálise; Radiação ultravioleta.*

## Introducción

Los antibióticos son productos de uso generalizado tanto en humanos como en animales. No se absorben completamente por el organismo, por lo que son liberados al ambiente a través de las excretas. De este modo, en el agua residual se pueden detectar diversos antibióticos como la amoxicilina, penicilina, cefalexina, cefixima, entre otros [1]. Un estudio realizado por Jiménez Babbage *et al.* [1], en las aguas residuales de Cali revela la presencia de contaminantes emergentes y una amplia variedad de productos farmacéuticos en el agua. Además, se destaca que las plantas de tratamiento con sistemas convencionales no logran eliminar eficazmente estas sustancias.

La presencia de antibióticos en el agua representa un riesgo significativo para la seguridad humana. Las pequeñas dosis de medicamentos pueden generar resistencia microbiana a los fármacos, lo que implica la posible aparición de cepas resistentes con graves consecuencias para la salud humana, ya que los medicamentos no podrían combatir eficazmente las enfermedades infecciosas [2,3]. Dado que los sistemas comúnmente utilizados no eliminan eficientemente estos contaminantes, se ha vuelto imperativo explorar nuevas técnicas que permitan degradar los antibióticos presentes en el agua.

Entre los antibióticos frecuentemente identificados en aguas residuales, se destaca la cefalexina (CFX), un antibiótico de uso extendido para tratar diversas infecciones debido a su potente efecto antimicrobiano y alta solubilidad en soluciones acuosas [3]. La CFX, perteneciente a la familia de las cefalosporinas, se utiliza para abordar infecciones bacterianas en humanos y animales, mostrando eficacia en el tratamiento de diversas afecciones del tracto respiratorio, tracto urinario, piel y tejidos blandos [4]. No obstante, este antibiótico ocasiona la destrucción de microorganismos benéficos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y puede inducir resistencia en agentes microbianos patógenos [3]. Estudios científicos que han explorado los efectos adversos de la CFX en el medio ambiente indican que este compuesto puede dar lugar a ecotoxicidad, resistencia bacteriana, alteración del equilibrio microbiológico y acumulación en sedimentos y tejidos biológicos [5]. Estos hallazgos resaltan la importancia de investigar métodos o técnicas destinadas a eliminar este compuesto del agua, dada su significativa repercusión ambiental.

En la tarea de encontrar alternativas que degraden antibióticos, se han explorado diversas técnicas de tratamiento terciario, como la electrodiálisis [6], la osmosis inversa [7], la adsorción [8], la electrocoagulación [9], y variedad de combinaciones de procesos de oxidación avanzada (POA) [10]. Los POA se fundamenta en la generación de radicales  $\text{OH}^*$  para lograr la disminución de concentración de contaminantes recalcitrantes. Entre los sistemas de oxidación avanzada, se destacan la fotólisis UV [11], ozonización [12], oxidación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  [13], así como combinaciones de estas técnicas y procesos fotocatalíticos, entre otras técnicas.

Variedad de estudios se han enfocado en la fotocatalisis, destacando el trabajo de He *et al.* [14] quienes emplearon nanopartículas de ZnO y lograron resultados destacados en la degradación. Estos resultados se atribuyen en parte a la influencia del pH del agua, ajustado para favorecer la producción y la vida de los radicales  $\text{OH}^*$ . Bansal y Verma [3] exploraron la fotocatalisis con foto-Fenton en reactores en cascada a una escala de 5 L, logrando una mineralización superior al 63 %. Resaltan la ventaja del uso de estos catalizadores debido a su capacidad de reutilización, que puede superar los 70 ciclos de uso. Finalmente, cabe mencionar el estudio de Almasi *et al.* [15], quienes llevaron a cabo pruebas separadas de fotocatalisis y foto-Fenton con 1 L de agua y 100 mg/L de CFX. Obtuvieron degradaciones del 100 % y una mineralización superior al 85 % para cada proceso. Dado el éxito previo de la fotocatalisis, este estudio se desarrolló para observar la respuesta del sistema ante fuentes comerciales de LED UV (390 nm) de uso doméstico y determinar la capacidad de degradación de la molécula de CFX.

## Materiales y métodos

Para la preparación de las soluciones acuosas, se utilizó agua ultrapura en la que se disolvieron 15 mg/L de CFX con un 99 % de pureza, suministrada por una empresa farmacéutica local, sin ningún otro tratamiento o manipulación. El ajuste del pH inicial de cada solución se realizó con NaOH 0,1 N y HCl 0,1 N de la marca Titripur de Merck; el catalizador utilizado fue  $\text{TiO}_2$  (anatasa) con una dosis constante de 100 mg/L para todos los experimentos [16]. Como fuente de radiación se emplearon cintas de lámparas UV-LED comerciales con certificación IP-68, emitiendo

luz con una radiación de onda de 395 nm y una potencia de 5 W por lámpara.

Se hizo uso de un diseño experimental central compuesto con dos factores en dos niveles para cada factor y cinco réplicas del punto central, para un total de 13 experimentos. Las variables analizadas fueron el pH inicial de la solución y el número de lámparas UV-LED, mientras que las variables de respuesta incluyeron el porcentaje de disminución de la concentración de CFX y el porcentaje de disminución de la concentración de carbono orgánico total (COT).

El proceso fotocatalítico tuvo una duración de 90 min por experimento. Todos los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente, oscilando entre 18 °C y 20 °C. Se realizaron en un recipiente de acrílico de 4L de capacidad (0,1 m de ancho, 0,2m de largo y 0,2m de alto). Las lámparas UV-LED se colocaron en un costado dentro del recipiente para irradiar las soluciones acuosas. Para mantener homogéneo el sistema durante el periodo de reacción, las soluciones fueron agitadas con una plancha de agitación magnética ajustada a 250 rpm. El reactor se aisló en un lugar oscuro para eliminar la interferencia de la luz solar en el proceso.

Tras concluir cada ensayo, se tomó una muestra de 100 mL, que se centrifugó a 500 rpm durante 5 min y luego se filtró. Posteriormente, se realizaron análisis de pH, conductividad, concentración de CFX y COT. Los análisis de pH y conductividad se llevaron a cabo según los procedimientos establecidos en los métodos estándar para el análisis de agua potable y residual [17]. El análisis de CFX se realizó por espectrofotometría a 258 nm, y la determinación de COT se llevó a cabo en un TOC-L de SHIMADZU, un analizador de carbono orgánico total.

El porcentaje de disminución de concentración o remoción de cada variable de respuesta fue calculado con la ecuación (1).

$$\%rem = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad (1)$$

Donde  $C_o$  y  $C_f$  son la concentración inicial y final respectivamente de CFX y COT.

A través del análisis de varianza de los resultados obtenidos, se determinó estadísticamente si los factores analizados influyeron en las variables de respuesta seleccionadas. Utilizando la

metodología de superficie de respuesta (SDR), se identificaron las condiciones que permiten alcanzar los mayores valores para cada una de las variables de respuesta, es decir, las mayores remociones de CFX y COT. Finalmente, una vez establecidas las condiciones experimentales más favorables para la remoción de CFX, se llevaron a cabo ensayos bajo estas condiciones, tanto en ausencia de radiación UV-LED como con y sin catalizador, con el objetivo de determinar el aporte a la remoción de contaminantes por fotólisis directa y adsorción sobre la superficie del catalizador.

## Resultados y discusión

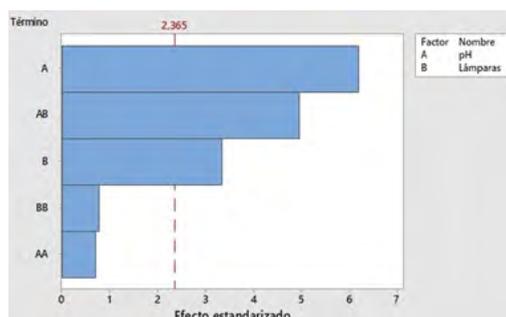
En la **Tabla 1** se presentan los resultados del porcentaje de disminución en la concentración (remoción) de CFX alcanzados en los ensayos realizados para los distintos niveles de pH y número de lámparas.

**Tabla 1.** Resultados experimentales de los ensayos realizados.

pH inicial de la solución	Número de lámparas	% de remoción de CFX
7,00	22	6,11
8,00	20	1,07
6,00	20	3,18
7,00	15	9,50
7,00	15	9,67
7,00	15	9,60
7,00	15	9,35
7,00	15	9,55
5,58	15	0,35
8,41	15	22,19
6,00	10	0,57
8,00	10	33,42
7,00	8	8,52

Se empleó el análisis de Pareto (**Figura 1**) a fin de determinar la influencia de las variables en el proceso estudiado.

El análisis del diagrama de Pareto revela que el pH constituye la variable con mayor impacto en la reducción de la concentración de CFX, seguido de la interacción entre el pH y el número de lámparas. La distribución de estas últimas en el sistema de fotocatalisis UV se posiciona como un factor crucial en el proceso de eliminación de cefalexina.



**Figura 1.** Diagrama de Pareto sobre los factores que son predominantes en la fotocatalisis.

Con relación a los datos proporcionados en la **Tabla 1**, no se observan resultados de disminución

en la concentración de COT, ya que estos fueron nulos en todos los ensayos realizados. Por consiguiente, se concluye que el proceso analizado logra transformar la molécula de CFX, aunque no alcanza una mineralización completa, corroborando resultados previos de estudios realizados por Bansal *et al.* [3].

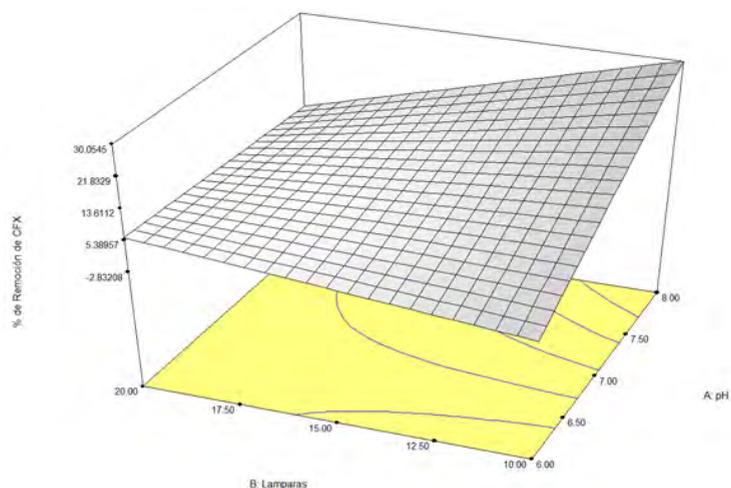
El análisis de varianza (presentado en la **Tabla 2**) indica que las variables y factores de proceso seleccionados ejercen una influencia directa sobre la variable de respuesta, incluyendo la interacción entre ellas. En resumen, cualquier modificación en los valores iniciales de pH y en el número de lámparas impacta la disminución de la concentración de CFX.

**Tabla 2.** Análisis de varianza para los resultados experimentales.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor f	Prob > F
Modelo	917,628	3	305,876	26,844	< 0,0001
A (pH)	474,727	1	474,727	41,662	0,0001
B (número de lámparas)	137,351	1	137,351	12,054	0,0070
AB (pH*número de lámparas)	305,550	1	305,550	26,815	0,0006
Residuo	102,552	9	11,395		
Falta de ajuste	102,494	5	20,499	1410,787	< 0,0001
Error puro	0,058	4	0,015		
Total	1020,180	12			

La **Figura 2** muestra la superficie de respuesta derivada de los resultados experimentales. En ella, se identifican las condiciones experimentales que favorecen el proceso de degradación de CFX. Las

condiciones que condujeron a la mayor remoción de CFX fueron un pH de 8 con 10 lámparas LED UV, resultados que son comparables con los hallazgos de Bansal *et al.* [3].



**Figura 2.** Superficies de repuestas de los resultados experimentales, % de remoción de cefalexina, con respecto al número de lámparas y pH.

### Influencia del pH

Es prudente señalar que el pH del medio de reacción juega un papel crucial en la remoción de CFX por fotocátalisis UV. Hay estudios que han demostrado que el pH del sistema de tratamiento influye en la velocidad de degradación de la CFX, debido a los cambios en la carga superficial del catalizador y los contaminantes, así como a la concentración de especies reactivas de oxígeno [18].

Para mayor comprensión del fenómeno, cuando el pH del medio es menor que el  $pH_{pzc}$  de la superficie del material ( $pH < pH_{pzc}$ ), esta se encuentra cargada positivamente, y cuando ( $pH > pH_{pzc}$ ) la superficie del material se encuentra cargada negativamente [4]. Para el Degussa P25 el  $pH_{pzc}$  es de 6, 6,3 y 6,5. Mientras que la CFX contiene un grupo amino ( $pKa=2,56$ ) y un grupo carboxilo ( $pKa=6,88$ ) estos grupos se encuentran en forma aniónica a pH cercano a 6 y en forma catiónica a  $pH < 2,56$ , para pH entre 2,56 y 6,88 la CFX se encuentra en forma molecular o libre de carga [5].

En aquellos casos en los cuales el pH de la solución es mayor que el punto de carga cero del catalizador ( $pH_{pzc}$ ), la fuerza de repulsión entre la forma aniónica de la cefalexina y la superficie del catalizador cargada negativamente puede limitar la degradación fotocatalítica. En el presente estudio los resultados son distintos, lo cual sugiere que la interacción electrostática tiene poco efecto sobre la efectividad del proceso analizado. El estudio realizado por El Mragui *et al.* [19] señala que el pH de la solución puede afectar la generación de radicales. Se indica que, a pH alcalinos, los radicales  $OH^*$  son los principales agentes oxidantes en la solución y su producción se ve intensificada toda vez que a pH alcalino se incrementa la concentración de aniones  $OH^-$ , es decir, el incremento de la producción de radicales  $OH^*$  a pH alcalino, contribuye a incrementar la degradación de la CFX [14].

El uso de un pH alcalino fue el más eficiente para la remoción de la CFX debido a que puede mejorar la eficiencia y la actividad fotocatalítica del  $TiO_2$  [20], hecho que puede aumentar la generación de radicales hidroxilos ( $OH^*$ ), que son altamente reactivos y responsables de la degradación de contaminantes [21] toda vez que mejora la capacidad de adsorción y la interacción del  $TiO_2$  [22]. Lo anterior justifica los altos valores de remoción a pH alcalino y por otro lado el uso de un pH ácido en la fotocátalisis UV puede tener efectos negativos en la eficiencia y estabilidad del proceso [23]. Para pH ácido puede presentarse la disminución en la

actividad fotocatalítica, puesto que puede inhibir la generación de especies activas de oxígeno y restringir la disponibilidad de electrones y huecos necesarios para las reacciones de oxidación y reducción [24].

### Influencia de la radiación UV

Se utilizó  $TiO_2$  Degussa P25, con una proporción de 80:20 en masa de anatasa a rutilo, y es el más empleado debido a que ha demostrado excelente desempeño en aplicaciones fotocatalíticas gracias a su apreciable área superficial específica ( $50 \text{ m}^2/\text{g}$ ) con tamaño de partícula que oscila en el rango entre 20 nm y 30 nm [25]. Cuando el  $TiO_2$  es excitado con luz UV ( $\lambda < 380 \text{ nm}$  para anatasa forma más común del catalizador, y  $\lambda < 400 \text{ nm}$  para rutilo) un electrón es promovido de la banda  $vB$  a la banda  $cB$  del  $TiO_2$  generando un hoyo ( $h^+$ ) en la banda  $vB$  y un electrón ( $e^-$ ) en la banda  $cB$  [25]. En resumidas cuentas, la radiación UV promueve la generación de radicales  $OH^*$  en el medio.

Se logra apreciar una disminución del porcentaje de degradación para los mayores números de lámparas, la cual se atribuye a un posible exceso de radicales generados dadas las condiciones favorables para su formación mencionadas previamente, debido a que los radicales  $OH^*$  tienen la capacidad de recombinarse, ocasionando una pérdida de los mismos y con esto la degradación de CFX por la pérdida del agente oxidante.

La transformación de CFX por fotocátalisis UV ocurren en varias etapas químicas, en primer lugar, las especies reactivas generadas (radicales hidroxilos) en la superficie del catalizador por efecto de la irradiación UV reaccionan con la CFX, posteriormente los radicales oxidan los grupos funcionales tales como amino y carboxilo, estas reacciones pueden romper enlaces químicos y formar productos degradados y menos tóxicos. Además, los huecos de electrones generados en la superficie del fotocatalizador pueden reaccionar con la CFX, produciendo radicales y especies oxidantes que también contribuyen a la degradación del compuesto [26].

### Adsorción del $TiO_2$

Una vez realizados los ensayos correspondientes al diseño experimental y determinadas las condiciones de pH y número de lámparas para las cuales se alcanzó la mayor disminución de concentración de CFX, se llevaron a cabo ensayos solamente con  $TiO_2$  sin radiación LED-UV con su respectivo ajuste de pH; además se realizaron

ensayos solamente con lámparas LED UV en ausencia de catalizador.

Los resultados de estos ensayos presentaron remociones poco significativas, menores del 1%, de manera que no ocurre adsorción del contaminante sobre la superficie del catalizador y tampoco fotólisis directa por efecto de las lámparas. El catalizador solo actúa como agente de transferencia de electrones.

## Recomendaciones

La cantidad y disposición de las lámparas deben ser meticulosamente optimizadas para asegurar una exposición uniforme del catalizador a la radiación UV y maximizar la eficiencia del proceso. La utilización de múltiples lámparas con una distribución adecuada en el reactor puede potenciar la eficacia de la fotocatalisis UV y disminuir los gradientes de radiación, reduciendo así la formación de zonas muertas donde la radiación resulta insuficiente y la actividad fotocatalítica es baja.

## Conclusiones

El uso de lámparas UV-LED comerciales con certificación IP-68 permitió lograr una disminución del 33,42% en la concentración de cefalexina en 1,5 h, con un pH de 8,01, una dosis de catalizador de 0,1 g/L y utilizando 10 bombillas LED-UV, las cuales tienen un consumo de 2 W.

Los ensayos de fotólisis directa sin catalizador no arrojaron porcentajes significativos de degradación. Además, los ensayos exclusivamente con catalizador indican que la cefalexina no se adsorbe en la superficie del catalizador. Por lo tanto, la eficacia del proceso se debe únicamente al efecto catalítico del  $\text{TiO}_2$  activado por la radiación UV.

A lo largo de los experimentos, no se observó una reducción en el consumo de carbono orgánico total, indicando que el proceso no logró mineralizar la cefalexina.

Cuando el pH inicial de la solución acuosa es ácido, el número de lámparas no incide significativamente en la degradación de la cefalexina. Por otro lado, el efecto del número de lámparas es relevante en un entorno alcalino, donde se observa que la reducción del número de lámparas conlleva a un

aumento en la remoción de CFX. Este fenómeno podría explicarse por la posible abundancia y recombinación de radicales, lo que impide contar con ellos para la degradación del contaminante objeto de estudio.

## Agradecimientos

A la Universidad Libre por suministrar los espacios, reactivos e instrumentos para la realización del proyecto.

## Referencias

- [1] Jimenez Bambague EM, Madera Parra CA, Peña Salamanca EJ. Eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en el agua residual doméstica mediante un tratamiento primario avanzado. *Ingeniería y competitividad*. 2020;22(1):10.
- [2] Melendez Marmolejo J, Garcia Saavedra Y, Galvan Romero V, Díaz de León Martínez L, Vargas Berrones K, Mejía Saavedra J, *et al.* Contaminantes emergentes. Problemática ambiental asociada al uso de antibióticos. Nuevas técnicas de detección, remediación y perspectivas de legislación en América Latina. *Revista salud ambiental*. 2020;20(1):53-61.
- [3] Bansal P, Verma A. Pilot-scale single-step reactor combining photocatalysis and photo-Fenton aiming at faster removal of Cephalexin. *J Clean Prod*. 2018;195:540-551. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.05.219](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.219)
- [4] Alessandretti I, Rigueto CVT, Nazari MT, Rosseto M, Dettmer A. Removal of diclofenac from wastewater: A comprehensive review of detection, characteristics and tertiary treatment techniques. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(6):106743. doi: [10.1016/j.jece.2021.106743](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106743)
- [5] Noman EA, Al-Gheethi A, Mohamed RMSR, Talip BA, Hamood MS, Altowayti WAH, *et al.* Sustainable approaches for removal of cephalexin antibiotic from non-clinical environments: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;417:126040. doi: [10.1016/j.jhazmat.2021.126040](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126040)
- [6] Lopez Garcia UM. Aplicación de electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua (Tesis de maestría). México: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica;

2005. [En línea]. Available: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua.pdf>.
- [7] Dévora Isiordia GE, López Mercado ME, Fimbres Weihs GA, Álvarez Sánchez J, Astorga Trejo S. Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua*. 2016;7(3):155-169.
- [8] Valladares Cisneros MG, Aranda Figueroa MG, Romero Dominguez RJ. Aplicación de adsorbentes de origen vegetal en la remoción de colorantes en agua. *Inventio*. 2019;15(37). [doi.org/10.30973/inventio/2019.15.377](https://doi.org/10.30973/inventio/2019.15.377)
- [9] Arango Ruiz A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. 2005;2(1):49-56.
- [10] Castañeda Jimenez AC. Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo (Trabajo de especialización). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; 2014.
- [11] Valencia Acosta CL. Evaluación de la fotólisis UV/254 nm como tratamiento para la eliminación de Salmonella spp. en aguas de granjas porcícolas (Tesis de grado). Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana; 2019. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/43169>
- [12] Angel Ospina A, Machuca Martínez F. Ozonización catalítica en el tratamiento de Contaminantes de Preocupación Emergente en aguas residuales: Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y competitividad*. 2021;24(1).
- [13] Forero JE, Ortiz OP, Rios F. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F-Ciencia, tecnología y futuro*. 2005;3(1):97-109.
- [14] He J, Zhang Y, Guo Y, Rhodes G, Yeam J, Li H, et al. Photocatalytic degradation of cephalixin by ZnO nanowires under simulated sunlight: Kinetics, influencing factors, and mechanisms. *Kinetics*, 2019;132:105105. [doi.org/10.1016/j.envint.2019.105105](https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105105)
- [15] Almasi A, Esmailpoor R, Hoseini H, Abtin V, Mohammadi M. Photocatalytic degradation of cephalixin by UV activated persulfate and Fenton in synthetic wastewater: optimization, kinetic study, reaction pathway and intermediate products. *J Environ Health Sci Eng*. 2020;18(2):1359-1373. [doi.org/10.1007/s40201-020-00553-1](https://doi.org/10.1007/s40201-020-00553-1)
- [16] Guarín Llanes CY, Mera Benavides AC. Fotocatálisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 2011;10(19):79-88.
- [17] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington D.C.: American Public Health Association; 2017.
- [18] Machin A, Soto-Vázquez L, García D, Cotto MC, Ortiz D, Berríos-Rolón PJ, et al. Photodegradation of Ciprofloxacin and Levofloxacin by Au@ZnONPs-MoS<sub>2</sub>-rGO Nanocomposites. *Catalysts*. 2023;13(3):538. [doi.org/10.3390/catal13030538](https://doi.org/10.3390/catal13030538)
- [19] El Mragui E, Daou I, Zegaoui O. Influence of the preparation method and ZnO/(ZnO + TiO<sub>2</sub>) weight ratio on the physicochemical and photocatalytic properties of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanomaterials. *Catalysis Today*. 2019;321–322:41-51. [doi.org/10.1016/j.cattod.2018.01.016](https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.01.016)
- [20] Pinedo Hernández J, Marrugo Madrid S, Enamorado Montes G, Urango Cárdenas I, Marrugo Negrete J. Optimización del pH y la concentración de TiO<sub>2</sub> para la remoción de mercurio en un sistema fotocatalítico de recirculación iluminado con lámparas UV. *Ingeniería y desarrollo*. 2017;35(2):305-319.
- [21] Garcés Giraldo LF, Mejía Franco EA, Santamaría Arango JJ. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento. *Revista Lasallista de Investigación*. 2004;1(1):83-92.
- [22] Wang M, Su S, Zhong X, Kong D, Li B, Song Y, et al. Enhanced Photocatalytic Hydrogen Production Activity by Constructing a Robust Organic-Inorganic Hybrid Material Based Fulvalene and TiO<sub>2</sub>. *Nanomaterials*. 2022;12(11):1918. [doi.org/10.3390/nano12111918](https://doi.org/10.3390/nano12111918)
- [23] Guo Y, Zhou C, Fang L, Liu Z, Li W, Yang M. Effect of pH on the Catalytic Degradation of Rhodamine B by Synthesized CDs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu<sub>x</sub>O Composites. *ACS omega*. 2021;6(12):8119-8130. [doi.org/10.1021/acsomega.0c05915](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05915)
- [24] Hoffmann MR, Martin ST, Choi W, Bahnemann DW. Environmental Applications of

- Semiconductor Photocatalysis. Chem. Rev. 1995;95(1):69-96. [doi.org/10.1021/cr00033a004](https://doi.org/10.1021/cr00033a004)
- [25] Kanakaraju D, Glass BD, Oelgemöller M. Titanium dioxide photocatalysis for pharmaceutical wastewater treatment. Environmental Chemistry Letters. 2014;12(1):27-47. [doi.org/10.1007/s10311-013-0428-0](https://doi.org/10.1007/s10311-013-0428-0)
- [26] Sun X, He W, Yang T, Ji H, Wen L, Lei J, et al. Ternary TiO<sub>2</sub>/WO<sub>3</sub>/CQDs nanocomposites for enhanced photocatalytic mineralization of aqueous cephalexin: Degradation mechanism and toxicity evaluation. Chemical Engineering Journal. 2021;412:128679. [doi.org/10.1016/j.cej.2021.128679](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128679)