

Análisis en la reducción de concentración de ibuprofeno en solución acuosa por medio de fotólisis directa con lámparas led-ultravioleta

Analysis in reduction of ibuprofen concentration in aqueous solution by means of direct photolysis with LED-Ultraviolet lamps

Ana María López Correa¹

Laura Camila Cañón Domínguez²

Rafael Nikolay Agudelo Valencia³

Siby I. Garcés - Polo⁴

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.32.8962>

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el uso de lámparas Led-UV comerciales (395 nm, certificación IP 68 y 0,08 W), para reducir la concentración de ibuprofeno (IBP) en solución acuosa. Las medidas de pH y concentración inicial del IBP en la solución fueron las variables experimentales empleadas para determinar su efecto sobre el porcentaje de reducción de este medicamento. La máxima reducción de concentración de IBP alcanzada fue del 93,64 % a pH inicial 7 y 20 mg/L de concentración inicial de IBP. El análisis de los resultados mostró que el pH inicial de la solución no afecta la disminución de concentración de IBP, pero el pH del agua disminuyó en cada ensayo, lo que señala la formación de CO₂ y su posterior dilución en el agua, hecho que sugiere la mineralización del IBP. El efecto de la concentración es relevante hasta alcanzar una concentración de 20 mg/L, a partir de este valor los resultados no difieren, puesto que el número de lámparas y tiempo de reacción permanecen constantes; además, la disminución de pH hace que la forma molecular del IBP predomine, lo cual afecta la ruta de degradación de este contaminante. La energía aplicada en el proceso analizado fue de 4,8 kWh. El uso de lámparas Led-UV comerciales puede ser una ventaja para el tratamiento terciario de aguas residuales, debido a que son de fácil adquisición, sumergibles en agua y de menor consumo energético que las lámparas UV comerciales.

Palabras claves: contaminante emergente, medicamentos, ibuprofeno, Led-UV, tratamiento de aguas.

ABSTRACT

In this work, the use of commercial UV LED lamps (395 nm, IP 68 certification, and 0.08 W) was evaluated for the reduction of Ibuprofen (IBP) concentration in an aqueous solution. The measurements of pH and initial concentration of the PPI in the solution were the experimental variables used to determine its effect on the percentage of reduction of the drug. The maximum reduction of PPI concentration reached was 93.64% at initial pH 7 and 20 mg / L of initial PPI concentration, the analysis of the results indicated that the initial pH of the solution does not affect the decrease in PPI concentration, but the pH of the water decreased in each test, which indicates the formation of CO₂ and its subsequent dilution in the water, a fact that suggests the mineralization of the IBP. The effect of concentration is relevant until reaching a concentration of 20 mg / L and from this value, the results do not differ, since the number of lamps and reaction time remains constant, in addition, the decrease in pH makes the molecular shape PPI predominates, a fact that affects the degradation path of this pollutant. The energy applied in the analyzed process was 4.8 kWh. The use of commercial UV Led lamps can be an advantage for tertiary wastewater treatment, these lamps are easily available, submersible in water, and lower energy consumption than commercial UV lamps.

Keywords: Emerging Contaminant, Drugs, Ibuprofen, UV LED, Water Treatment.



Como citar este artículo: A.M. López, L.C. Cañón, R. N. Agudelo and S. I. Garcés-Polo. "Análisis en la reducción de concentración de ibuprofeno en solución acuosa por medio de fotólisis directa con lámparas led-ultravioleta". *Ingeniare*, vol. 18, no. 32, pp. 27-37, Junio 2022.

1 Ingeniera ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, Bogotá. ana-lopezc@unilivre.edu.co

2 Ingeniera ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, Bogotá. laurac-canondominguez@unilivre.edu.co

3 Ingeniera ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, Bogotá. rafaeln-agudelov@unilivre.edu.co

4 Ingeniera química, Facultad de Ingeniería Universidad Libre, Barranquilla. siby.garces@unilivre.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la humanidad, de ahí que su preservación sea objeto de cuidadoso y continuo estudio. En las últimas décadas, el progresivo aumento poblacional ha dado como resultado una mayor demanda de agua. Adicionalmente, la demanda de recursos naturales y la continua búsqueda de alternativas para mejorar la calidad de vida propicia el desarrollo de diversos productos, entre ellos, los medicamentos [1], que tienen como finalidad tratar o aliviar dolencias y, como consecuencia, su uso constituye una actividad global. El generalizado y frecuente uso de medicamentos ocasiona distintas matrices ambientales, con sus respectivas consecuencias o efectos adversos [2]. La presencia de estas sustancias en el ambiente resalta la falta de efectividad de los procesos de tratamientos convencionales para aguas residuales y su estabilidad [3].

Los medicamentos encontrados en el agua y otros nuevos productos, que se consideran contaminantes, se conocen como contaminantes emergentes (CE) y están representados por una amplia gama de sustancias (antiinflamatorios, antibióticos, hormonas, entre otros). La presencia de productos farmacéuticos en diversos entornos se considera un problema ambiental de gran importancia [4],[5], toda vez que los medicamentos son moléculas formuladas para inducir una respuesta en un agente biológico. Cabe resaltar que este tipo de contaminantes se pueden combinar entre sí y dar como resultado un efecto mayor [6], lo que incrementa el problema acarreado por la descarga de este tipo de sustancias.

Entre las familias de productos farmacéuticos con mayor presencia en el ambiente se encuentran los antiinflamatorios no esteroideos (MNEAI) [6], a la cual pertenece el ibuprofeno (IBP), que fue desarrollado en la década de los años setenta [7] y es uno de los diez productos más vendidos en el mundo, debido a su efectividad como analgésico [8], motivo por el cual su presencia en las aguas residuales domésticas es muy frecuente, así como en las decargas de aguas residuales hospitalarias y de industrias farmacéuticas [9]. Es importante señalar que sustancias como el IBP puede tener efectos eco-toxicológicos sinérgicos cuando se encuentran presentes en el ambiente junto con otros medicamentos antiinflamatorios no esteroideos, razón por la cual es necesario disminuir su concentración en las aguas residuales [10].

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales no cuentan con capacidad para eliminar los CE y los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales domésticas sólo alcanzan a eliminar entre el 30 y 40 % de medicamentos presentes en el agua [11], lo cual motiva la búsqueda de alternativas para incrementar su porcentaje de eliminación. El objetivo de esta investigación es analizar la foto-oxidación de IBP en solución acuosa por medio de lámparas Led-UV (395 nm) comerciales. El uso de estas lámparas como fuente de radiación puede ser una alternativa atractiva porque son más compactas, no requieren ningún circuito especial como las lámparas UV convencionales; además, presentan menor consumo de energía y son de mayor pureza espectral [12].

2. REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Algunas alternativas que se han explorado son los procesos sono-electroquímicos [13], la extracción con algas [14], [15], procesos electrobiológicos [16], procesos electroquímicos [17], bioadsorción [18], electrodiálisis [19], ozonización [20], humedales artificiales [21], procesos sono-químicos [22], fotocátalisis heterogénea [23], oxidación fotoquímica, entre muchas otras más. Estos procesos han demostrado ser efectivos para reducir la concentración de contaminantes como el IBP en aguas residuales. Particularmente, los procesos de foto-oxidación presentan ventajas sobre otras técnicas como la oxidación completa de compuestos orgánicos e inorgánicos, la emisión de compuestos inocuos y la reactividad con la mayoría de los compuestos orgánicos, lo cual es interesante si se quiere evitar la presencia de subproductos potencialmente tóxicos en los contaminantes [24]. Así mismo, los pocos productos químicos utilizados son de bajo costo. Cabe resaltar que las lámparas Led-UV comerciales son económicas y su tamaño es más compacto. Algunos trabajos publicados sobre la remoción de aguas residuales demostraron que los procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de los contaminantes emergentes se presentan como una alternativa interesante debido a su alta eficiencia. Un ejemplo de ello es el estudio en el que se implementó Led-UV /catalizador y se encontró que a mayor degradación del IBP aumenta el pH, teniendo en cuenta el tiempo de irradiación [9]. Sin embargo, en la investigación para este caso de estudio durante la remoción de IBP el pH bajó y el tiempo de irradiación fue mayor.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó un diseño experimental de tipo central, compuesto por cinco réplicas del punto central. Se formuló para dos factores con dos niveles. El primer factor es el pH inicial de la solución acuosa (5 y 9) y el segundo, la concentración inicial de ibuprofeno ($15 \frac{mg}{L}$ y $25 \frac{mg}{L}$). La variable de respuesta corresponde al porcentaje de disminución de concentración de IBP en la solución acuosa. Se empleó ibuprofeno, grado analítico, suministrado por una empresa farmacéutica local. En la preparación de la solución acuosa se utilizó agua de alta pureza, obtenida de un purificador de agua marca Elga. Luego, se diluyó la cantidad necesaria de ibuprofeno para alcanzar la concentración deseada, se ajustó el pH inicial de la solución y se determinó la concentración inicial de IBP por espectrofotometría UV VIS a 225 nm, para lo cual se empleó un espectrofotómetro Thermo Scientific UV Vis Genesys 10S [25].

Una vez preparada la solución se depositó en un recipiente rectangular con capacidad para 2 L, en el cual se instalaron previamente las lámparas Led-UV con una potencia de 12 W. Cada metro de cinta de lámpara contó con 60 Led, con certificación IP65, cuya longitud de onda emitida por cada foco fue de 395 nm. En el recipiente del reactor se ubicaron 2 m de cinta SMD 3528, monocromático, 1 chip por Led, 0,08 watts tensión continua de 4,8 Volt a cada m/Led para un funcionamiento correcto, con lo cual se logró una corriente del orden de 0,02 a 0,03 A y 12 V CD. En total se utilizaron 120 lámparas dentro del recipiente. En otras palabras, la energía aplicada al sistema fue de 9,6 W. El recipiente de

reacción se ubicó en un lugar con ausencia de luz para evitar posibles interferencias. A continuación, se muestra el montaje experimental (Figura 1).



Figura 1. Recipiente de reacción con lámparas Led-UV comerciales (395 nm)

Fuente: elaboración propia.

Las lámparas Led-UV se encendieron durante una hora. Transcurrido el tiempo de reacción, se tomó una muestra del agua y se analizaron el pH final, la conductividad y la concentración de IBP. El pH inicial del agua se ajustó por uso de NaOH 0,1 N y HCl 0,1 N (Merck tritipur). Los resultados de los ensayos se trataron por medio del análisis de varianza (Anova) y se determinó el efecto de cada variable o factor sobre la respuesta [26], [27]. Se empleó la metodología de Pareto para determinar las variables o factores que presentaban mayor influencia sobre la respuesta [28],[29]. Finalmente, por medio de la metodología de superficie de respuesta se determinaron las condiciones más favorables para obtener la mayor reducción de concentración de ibuprofeno [27].

El porcentaje de reducción de IBP en la solución se calculó con la ecuación 1.

$$\% R = \frac{IBP_o - IBP_f}{IBP_o} * 100 \quad (1)$$

Donde IBP_o e IBP_f son las concentraciones inicial y final de IBP en cada ensayo (mg/L), respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de los experimentos realizados (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de los ensayos realizados.

pH inicial	Concentración inicial (mg/L)	% Reducción de concentración de IBP	pH final
7	20	95,9	6
7	20	95,9	6
7	20	96,4	6
7	12,9	56,4	6
7	27	88,7	5
5	15	81,99	4
7	20	93,96	6
9	15	88,14	8
9	25	93,08	7
7	20	94,89	6
9,8	20	94,66	7
5	25	91,09	4
4,2	20	95,07	4

Fuente: elaboración propia.

Se observa que el pH final del agua disminuye en todos los experimentos. El máximo valor de porcentaje de reducción de IBP alcanzado fue de 96,43 %, a pH 7 y 20 mg/L de IBP en el agua. El pH final del agua para ese ensayo fue de 6, lo que se puede asociar a la dilución de CO₂ en el agua por causa de la mineralización de la molécula de IBP. Esto explica también la disminución del pH final del agua en todos los ensayos. A pH superior a 7, el IBP se encuentra principalmente en su forma ionizada [30], situación que afecta la tasa de degradación del IBP por efecto de las condiciones de la solución [31]. Es decir, el pH afecta la estructura molecular del IBP y, por consiguiente, su ruta de degradación. Como un caso particular de comparación con la bibliografía, para la concentración inicial de 20 mg/L y el pH de 4,17 se encontró mayor porcentaje de degradación que el reportado por Wang y Col [9], en el que para valores de pH de 4 se obtuvo un porcentaje de degradación entre 50 y 60%, usando el proceso similar de oxidación Led-UV. En el caso de estudio no es claro el efecto del pH, puesto que las remociones presentan mayor influencia de la concentración de IBP en la solución (Figura 2).

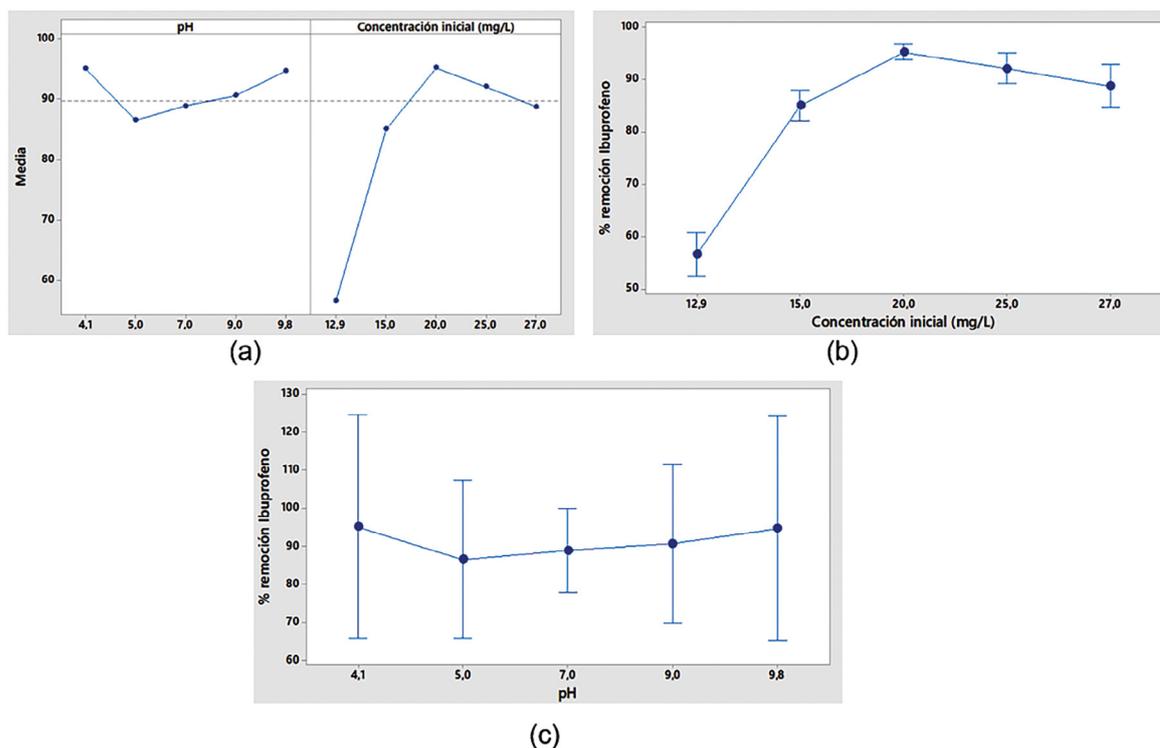


Figura 2. a) Efectos principales, b) Intervalos de reducción de concentración de IBP con respecto a la concentración inicial, c) Intervalos de reducción de concentración de IBP con respecto al pH inicial

Fuente: elaboración propia.

Se observa que al aumentar la concentración de IBP en la solución acuosa, el porcentaje de reducción de concentración de este contaminante tiende a aumentar y el efecto no tiene relevancia en términos estadísticos. De la Figura 2 c) se concluye que el pH inicial de la solución no tiene efecto sobre la reducción de concentración de IBP. Por su parte, la concentración inicial de IBP sí afecta la variable de respuesta, toda vez que ésta aumenta al incrementar la concentración inicial de IBP en la solución. Dicho efecto pierde relevancia para concentraciones iniciales superiores a 20 mg/l. La Figura 2 b) permite observar lo planteado. Desde el punto de vista fenomenológico se puede señalar que para concentraciones superiores a 20 mg/L la reducción de concentración no varía significativamente, a pesar de ello se puede señalar que, al presentarse mayor reducción de concentración, el pH tiende a descender y, por lo tanto, la ionización de la molécula de IBP es menor y la ruta de degradación se ve afectada. Comparado con la bibliografía, este comportamiento está de acuerdo con los encontrados por Wang y Col [9]. Sin embargo, en su estudio los valores de pH estudiados fueron menores que cinco.

Se empleó el método de Pareto para determinar las variables o factores experimentales que presentaron mayor influencia sobre la reducción de concentración de IBP. Con base en lo anterior, se puede indicar

que la variable de mayor efecto sobre la reducción de concentración de IBP es su concentración inicial en la solución. A continuación, se presenta el diagrama de Pareto para los resultados experimentales obtenidos (Figura 3).

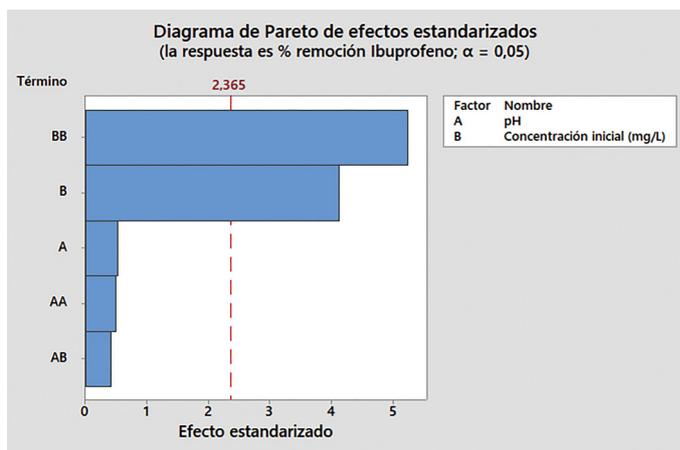


Figura 3. Diagrama de Pareto para los resultados experimentales obtenidos

Fuente: elaboración propia.

Con base en el diagrama de Pareto, es claro que la variable que ejerce mayor influencia sobre la reducción de concentración de IBP es su concentración inicial y la interacción de segundo orden de esta variable consigo misma. El pH y las interacciones del pH no influyen significativamente sobre la reducción de concentración. Para visualizar con mayor facilidad el efecto de las variables o factores experimentales sobre la variable de respuesta se realizó el diagrama de superficie de respuesta (Figura 4).

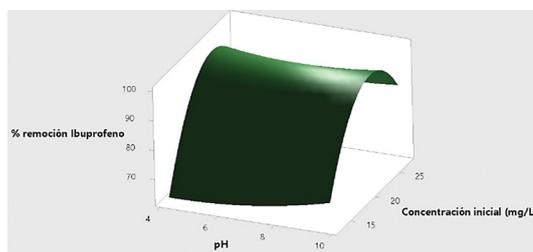


Figura 4. Superficie de respuesta de los resultados experimentales

Fuente: elaboración propia.

La superficie de respuesta permite observar lo planteado, al aumentar la concentración de IBP en la solución el porcentaje de reducción de concentración aumenta. Este efecto es representativo hasta un valor de concentración inicial de 20 mg/L. A partir de este valor los resultados no difieren de manera considerable y se puede señalar que el efecto no es significativo. En todos los experimentos se observó que el pH del agua descendió, posiblemente por la dilución del CO_2 formado por la mineralización del IBP.

De manera que el IBP predominó en su forma molecular al existir mayor cantidad en la solución y mantener el número de lámparas Led-UV y el tiempo de reacción constantes, la energía aplicada al sistema no fue suficiente para incrementar el porcentaje de reducción de concentración de IBP. La mayor parte de reportes bibliográficos señalan que el IBP se remueve de las soluciones acuosas al aplicar radiación de alta energía, es decir, baja longitud de onda (200 a 280 nm) [31]. A pesar de esto, los resultados obtenidos con lámparas Led-UV comerciales (395 nm) se pueden considerar satisfactorios. Así mismo, pueden ser objeto de estudios posteriores, en los cuales se intensifique el efecto de la radiación UV con catalizadores sólidos o en solución y con otras técnicas avanzadas de tratamiento. Con base en el número de lámparas empleadas en los ensayos se determinó que el consumo de energía del proceso fue de 4,8 kWh.

5. CONCLUSIONES

La disminución de concentración de IBP en solución acuosa con lámparas Led-UV comerciales alcanzó una reducción máxima de 96,43 % a pH neutro y 20 mg/L de IBP en solución. El efecto del pH en el proceso no es representativo estadísticamente y se determinó que la concentración de IBP es la variable de mayor relevancia dentro del rango de valores experimentales analizado.

Durante los ensayos, el pH final del agua descendió en promedio una unidad, lo cual se atribuye a la formación de CO_2 por la mineralización del IBP y posterior disolución del gas en el agua, disminuyendo el pH por la formación de H_2CO_3 .

El uso de lámparas Led-UV para tratar efluentes de sistemas de tratamiento que contengan IBP es un tema de interés, dado que facilita la adquisición y su remplazo en los sistemas de tratamiento terciario y permite intensificar el proceso por medio de otras técnicas para lograr la total mineralización de contaminantes emergentes como el IBP.

REFERENCIAS

- [1] J. Arredondo. "Evaluación del potencial de los humedales construidos como estrategia para la eliminación de productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas residuales domésticas". *Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira*, pp. 1-69. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7188/628162A774.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2016.
- [2] E.A. Fonseca, R. Directora, E. Pitarch y A. Junio, "Investigación de residuos de plaguicidas y fármacos en aguas medioambientales. Estudio de la eliminación de fármacos en una estación convencional de tratamiento de aguas residuales. doi: 10.6035/14104.2021.711032, 2021.

- [3] S. Adityosulindro, C. Julcour, D. Riboul y L. Barthe, "Degradation of ibuprofen by photo-based advanced oxidation processes: exploring methods of activation and related reaction routes". *International Journal of Environmental Science and Technology*, no. 0123456789, doi: 10.1007/s13762-021-03372-5, 2021.
- [4] M. J. Quero-Pastor, M.C. Garrido-Pérez, A. Acevedo y J.M. Quiroga, "Ozonation of ibuprofen: A degradation and toxicity study," *Science of the Total Environment*, vol. 466-467, pp. 957-964, 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.067, 2014.
- [5] E. Estévez, J.M. Hernández-Moreno, J.R. Fernández-Vera y M.P. Palacios-Díaz, "Ibuprofen adsorption in four agricultural volcanic soils," *Science of the Total Environment*, vol. 468-469, pp. 406-414, 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.068, 2012.
- [6] A. Mohamed, A. Salama, W.S. Nasser y A. Uheida, "Photodegradation of Ibuprofen, Cetirizine, and Naproxen by PAN-MWCNT/TiO₂-NH₂ nanofiber membrane under UV light irradiation". *Environmental Sciences Europe*, 30 (1), doi: 10.1186/s12302-018-0177-6, 2018.
- [7] Y. Ma, X. Zhang, Z. Zhu, Y. Wang, J. Gao y P. Cui, "Process intensification and waste minimization for ibuprofen synthesis process". *Journal of Cleaner Production*, 194, pp. 396-405, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.131, 2018.
- [8] A.F. Suárez-Escobar, L.R. Conde-Rivera, F.E. López-Suárez, M.J. Illán-Gómez, K.S. González-Hernández y J.S. Chalapud-Morales, "Heterogeneous Photocatalytic Degradation of Ibuprofen Over TiO₂-Ag Supported on Activated Carbon from Waste Tire Rubber". *Topics in Catalysis*, 64 (1-2), pp. 51-64, doi: 10.1007/s11244-020-01311-1, 2021.
- [9] Z. Wang, V. Srivastava, I. Ambat, Z. Safaei y M. Sillanpää, "Degradation of Ibuprofen by UV-LED/ catalytic advanced oxidation process". *Journal of Water Process Engineering*, 31, p. 100-808 doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100808, 2018.
- [10] M. Cleuvers, "Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59 (3), pp. 309-315, doi: 10.1016/S0147-6513(03)00141-6. 2004.
- [11] L. Rafati, M.H. Ehrampoush, A.A. Rafati, M. Mokhtari y A.H. Mahvi, "Removal of ibuprofen from aqueous solution by functionalized strong nano-clay composite adsorbent: kinetic and equilibrium isotherm studies". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 (3), pp. 513-524, doi: 10.1007/s13762-017-1393-0, 2018.
- [12] S.T.U.H.Y.Y. Naoki. "Short Wavelength LED based on III-V nitride and its Applications" 21 (3), pp. 490-1312, Accessed: oct. 06, 2021. [Online]. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jive/27/3/27_3_146/pdf-char/en, 2021.
- [13] N. Tran, P. Drogui, L. Nguyen y S.K. Brar, "Optimization of sono-electrochemical oxidation of ibuprofen in wastewater". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3 (4), pp. 2637-2646, doi: 10.1016/j.jece.2015.05.001, 2015.
- [14] C. Larsen, Z.H. Yu, R. Flick y E. Passeport, "Mechanisms of pharmaceutical and personal care product removal in algae-based wastewater treatment systems". *Science of The Total Environment*, p. 133772, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133772, 2019.

- [15] R. López-Serna, E. Posadas, P.A. García-Encina y R. Muñoz, "Removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater in novel algal-bacterial photobioreactors". *Science of the Total Environment*, 662, pp. 32-40, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.206, 2019.
- [16] Y. Feng *et al.*, "Performance and microbial community of an electric biological integration reactor (EBIR) for treatment of wastewater containing ibuprofen". *Bioresource Technology*, 274, pp. 447-458, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.015, 2018.
- [17] Y. Ouarda *et al.*, "Electrochemical treatment of real hospital wastewaters and monitoring of pharmaceutical residues by using surrogate models". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, p. 103-332 doi: 10.1016/j.jece.2019.103332, 2019.
- [18] O.S. Bello, O.C. Alao, T.C. Alagbada y A.M. Olatunde, "Biosorption of ibuprofen using functionalized bean husks". *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 13, p. 100-151, doi: 10.1016/j.scp.2019.100151, 2019.
- [19] K. Arola, A. Ward, M. Mänttäri, M. Kallioinen y D. Batstone, "Transport of pharmaceuticals during electro dialysis treatment of wastewater". *Water Research*, 161, pp. 496-504, doi: 10.1016/j.watres.2019.06.031, 2019.
- [20] M.J. Quero-Pastor, M.C. Garrido-Pérez, A. Acevedo y J.M. Quiroga, "Ozonation of ibuprofen: A degradation and toxicity study". *Science of The Total Environment*, vol. 466-467, pp. 957-964, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2013.07.067, 2014.
- [21] J. Camilo, C.A. Madera-Parra, A. Caselles-Osorio, W.A. Torres-López y X.M. Vargas-Ramírez, "Ibuprofen and Naproxen removal from domestic wastewater using a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland coupled to Ozonation". *Ecological Engineering*, 135, pp. 89-97, 2019, doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.05.007, 2018.
- [22] S. Adityosulindro *et al.*, "Ultrasonics - Sonochemistry Sonolysis and sono-Fenton oxidation for removal of ibuprofen in (waste) water". *Ultrasonics - Sonochemistry*, 39, pp. 889-896, doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.06.008, 2016.
- [23] J.P. Candido, S.J. Andrade, A.L. Fonseca, F.S. Silva, M.R.A. Silva y M.M. Kondo, "Ibuprofen removal by heterogeneous photocatalysis and ecotoxicological evaluation of the treated solutions". *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (7), p. 6397, doi: 10.1007/s11356-017-8623-3, 2017.
- [24] C. Garcés Giraldo, L. Fernando, M. Franco, E. Alejandro, S. Arango y J. Julián (2004). "La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales", 1, pp. 83-92, [Online]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>.
- [25] L. Rafati, M.H. Ehrampoush, A.A. Rafati, M. Mokhtari y A.H. Mahvi, "Removal of ibuprofen from aqueous solution by functionalized strong nano-clay composite adsorbent: kinetic and equilibrium isotherm studies". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 (3), pp. 513-524, doi: 10.1007/s13762-017-1393-0, 2018.
- [26] S. Parraga. "Estudio de las propiedades adsorptivas de residuos lignocelulósicos para la eliminación de irgasán, ibuprofeno, amoxicilina y paracetamol presente en residuos líquidos". Quito, Recuperado en sep. 27, 2021. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21344>, 2020.

- [27] S.P. Cervantes Ramírez, “Evaluación de la remoción de ibuprofeno mediante humedales de flujo subsuperficial horizontal”. Costa Rica, doi: <https://hdl.handle.net/2238/6043>, 2015.
- [28] B. Juliana, C. Romero, C. Paola y M. Rodríguez (2013). “Evaluación de un reactor fotocatalítico solar de película descendente para degradar residuos de acetaminofén con tio 2 soportado”. Cartagena. Recuperado en sep. 28, 2021. [Online]. Disponible en: <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/88/TESIS%20CINDY%20Y%20BRENDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [29] D.I. Rojas. “Estudio de la ozonificación continua de un efluente contaminado con productos farmacéuticos: ibuprofeno, diclofenaco y sulfametoxazol”. Quito. Recuperado en sep. 28, 2021. [Online]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11518/1/CD-6498.pdf>, 2015.
- [30] S. Luo *et al.*, “UV direct photolysis of sulfamethoxazole and ibuprofen: An experimental and modelling study”. *Journal of Hazardous Materials*, 343, pp. 132-139, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.09.019, 2018.
- [31] S. Adityosulindro, C. Julcour, D. Riboul y L. Barthe, “Degradation of ibuprofen by photo-based advanced oxidation processes: exploring methods of activation and related reaction routes”. *International Journal of Environmental Science and Technology*, doi: 10.1007/s13762-021-03372-5, 2021.