

DESARROLLO DE CATALIZADORES SUSTENTABLES PARA LA DEGRADACIÓN DE FÁRMACOS PROMOVRIENDO CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE: UNA EVALUACIÓN PRELIMINAR

Lucas Bohnenberger – lucas.boh21@outlook.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPG-IPH), Núcleo de Estudos em Saneamento Ambiental (NESA) - Avenida Bento Gonçalves, 9500. 91501-970, Porto Alegre

Louidi Lauer Alborno – louidi.lauer@ufrgs.br

UFRGS, IPH, NESA

Fernanda M. Zoppas – fernandazoppas@gmail.com

Universidad Nacional del Litoral (UNL), Instituto de Investigaciones en Catalisis y Petroquímica (INCAPE)

Fernanda Albana Marchesini – albanamarche@gmail.com

UNL, INCAPE

Salatiel Wohlmuth da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br

UFRGS, IPH, PPG-IPH, NESA.

Resumen: La presencia de productos farmacéuticos en el agua es una preocupación creciente debido a los impactos ambientales y sociales asociados a su presencia, especialmente teniendo en cuenta su baja eliminación en las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales. Por ello, este trabajo se centra en la evaluación preliminar de la degradación de dos fármacos psicoterapéuticos, carbamazepina (CPZ) y sertralina (SRT), utilizando un catalizador de ZrO_2 dopado con Pd (Pd/ZrO_2 1%wt.) en procesos de fotocatalisis heterogénea. La metodología incluyó la preparación y caracterización del catalizador seguida de ensayos preliminares de actividad fotocatalítica. Los resultados mostraron que el catalizador de Pd/ZrO_2 al 1% en peso presentó una degradación de aproximadamente el 51% tanto de CPZ como de SRT. Sin embargo, se necesitan más estudios para evaluar completamente el rendimiento del catalizador, incluyendo análisis de la cinética y el rendimiento global del proceso. Este trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas y aguas residuales, en consonancia con los principios medioambientales, sociales y de gobernanza. Al garantizar la reducción del impacto ambiental de los productos farmacéuticos en el agua, se promueve una mejor calidad de vida para la humanidad y una preservación más eficaz de la biodiversidad acuática.

Palabras clave: preservación de la biodiversidad, impactos ambientales y sociales, Contaminantes de preocupación emergente; Calidad del agua; Fotocatalizadores sostenibles.



Development of Sustainable Catalysts for Pharmaceutical Degradation Promoting Environmental Care: Preliminary Assessment

Abstract: *The presence of pharmaceuticals in water is a growing concern due to the environmental and social impacts associated with their presence, particularly considering their low removal in conventional wastewater treatment plants. This study focuses on the preliminary assessment of the degradation of two psychotherapeutic drugs, carbamazepine (CPZ) and sertraline (SRT), using a ZrO_2 catalyst doped with Pd (Pd/ZrO_2 1%wt.) in heterogeneous photocatalysis (FH) processes. The methodology included the preparation and characterization of the catalyst followed by preliminary assays of photocatalytic activity. The results showed that the Pd/ZrO_2 1%wt. catalyst achieved approximately 51% degradation of both CPZ and SRT. However, further studies are needed to fully evaluate the catalyst's performance, including kinetics and overall process yield analyses. This work contributes to the development of more efficient and sustainable technologies for water and wastewater treatment, aligning with environmental, social, and governance (ESG) principles. By ensuring the reduction of the environmental impact of pharmaceuticals in water, it promotes a better quality of life for humanity and more effective preservation of aquatic biodiversity.*

Keyword: *Preservation of biodiversity, environmental and social impacts, Emerging contaminants of concern; Water quality; Sustainable photocatalysts.*

1. Introdução

La presencia de productos farmacéuticos en el agua se viene observando desde la década de 1990, principalmente debido a la excreción de sustancias farmacéuticas que no se han metabolizado por completo (ARSAND *et al.*, 2023; ERICSON; LAENGE; SULLIVAN, 2002). En consecuencia, debido a los frecuentes lanzamientos de estas sustancias al medio ambiente, los índices de depuración de las masas de agua no son adecuados para la degradación de estos productos farmacéuticos, lo que los clasifica como pseudo-persistentes en el medio ambiente (KOSJEK *et al.*, 2007).

Los fármacos psicoterapéuticos, una clase de medicamentos que se destaca por su elevado consumo, han mostrado una tendencia de crecimiento continuo a lo largo de los años. Esta tendencia se ha visto intensificada por las repercusiones sociales y económicas de la pandemia de COVID-19 (BRAUER *et al.*, 2021; HOEFLER *et al.*, 2023).

Dentro del grupo de psicoterápicos, dos fármacos reciben cierta atención: la carbamazepina (CPZ) y la sertralina (SRT). La primera se utiliza como anticonvulsivo y estabilizador del estado de ánimo, con un consumo aproximado de 1.000 toneladas al año. La SRT, por su parte, es uno de los fármacos más utilizados para tratar la depresión en muchas partes del mundo (HOEFLER *et al.*, 2023; MOHAPATRA *et al.*, 2014; RABEEA *et al.*, 2021).

Sin embargo, con el creciente consumo de estos fármacos, unido a la baja eficacia de eliminación de estos, en las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales (PTAR) (10-80%), la presión medioambiental sobre estos compuestos es cada vez mayor, con importantes repercusiones para el medio ambiente y la sociedad (KENT; TAY, 2019; STYRISHAVE *et al.*, 2011). En diferentes estudios científicos se han identificado diversos efectos nocivos sobre distintas especies de fauna, con concentraciones a veces inferiores a las identificadas en aguas superficiales, efluentes domésticos, industriales de hospitales (DWIVEDI *et al.*, 2018; GORNIK *et al.*, 2020; PIVETTA *et al.*, 2020).

Entre sus efectos se encuentran la capacidad de desregular el sistema endocrino, modificar los niveles hormonales y la fertilidad, inducir mortalidad y retrasos en el desarrollo corporal, así como ser potencialmente bioacumulables o causar desequilibrios en el ciclo de nutrientes en los ecosistemas acuáticos (ARNNOK *et al.*, 2017; JARVIS; BERNOT; BERNOT, 2014; YAN *et al.*, 2018).



La preocupación por la presencia de productos farmacéuticos en el agua va más allá de las cuestiones de salud pública también incluye dimensiones medioambientales y sociales. La presencia continuada de sustancias farmacéuticas no metabolizadas en el agua representa un reto importante para la sostenibilidad medioambiental, que requiere medidas urgentes para mitigar los efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad (PATEL *et al.*, 2019).

Por lo tanto, la búsqueda de soluciones innovadoras y eficaces no sólo responde a las exigencias de la gobernanza medioambiental, sino que también promueve un enfoque socialmente responsable de la protección del medio ambiente y la salud pública.

Como se ha mencionado anteriormente, la baja eficacia de eliminación de CPZ y SRT en las plantas de tratamiento de aguas residuales es uno de los principales factores agravantes de la existencia de estos fármacos en el medio ambiente. Debido a sus características fisicoquímicas, su biodegradabilidad es baja, por lo que es necesario aplicar procesos avanzados para su eliminación (WISHART *et al.*, 2018).

Los procesos oxidativos avanzados (POA) son procesos químicos, fotoquímicos o electroquímicos capaces de generar fuertes agentes oxidantes, siendo el más utilizado el radical hidroxilo ($\text{HO}^\bullet$), ya que tiene una baja selectividad. Puede mineralizar sustancias, convirtiéndolas en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y ácidos inorgánicos. A diferencia de otros procesos avanzados, como la separación por membranas y la adsorción, los POA no generan una corriente secundaria concentrada de contaminantes (ALBORNOZ *et al.*, 2021; CRITTENDEN *et al.*, 2012).

La fotocatalisis heterogénea (FH), es un proceso fotoquímico, consiste en la foto excitación, con radiación del espectro ultravioleta (UV) o visible, de la superficie de un semiconductor que permite la promoción de e^- desde la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) lo que permite la generación de $\text{HO}^\bullet$.

Se ha estudiado el uso de óxido de circonio (ZrO_2) porque tiene un gran número de huecos de oxígeno en la superficie, una importante capacidad de intercambio iónico y estabilidad fisicoquímica (SHARAF ALDEEN *et al.*, 2022). Sin embargo, debido a su amplia brecha de banda (3,2 - 5,1 eV) y a la baja tasa de separación de electrones y huecos (h^+), limitan el uso de fuentes de radiación que consuman menos energía. Para superar esta limitación, se han evaluado diferentes estrategias, una de las cuales es el dopado del semiconductor basado en ZrO_2 .

Se ha demostrado que el acoplamiento de semiconductores, especialmente partículas nobles como plata, platino, oro y paladio (Pd), mejora la separación de cargas durante la FH, solucionando problemas de recombinación e^-/h^+ y ampliando sus aplicaciones en catálisis.

En particular, las nanopartículas de Pd tienen una amplia gama de aplicaciones en catálisis heterogénea y homogénea debido a su elevada relación superficie/volumen (CHEN *et al.*, 2010; OMOTUNDE *et al.*, 2018).

Los productos farmacéuticos tienen grandes beneficios para la salud, ofreciendo una mejor calidad de vida. Sin embargo, su reducida eliminación en las plantas de tratamiento de aguas residuales supone un gran riesgo para la fauna y, en consecuencia, para el equilibrio medioambiental. El objetivo de este trabajo es la síntesis de un catalizador de ZrO_2 dopado con Pd para la degradación de CPZ y SRT. Con el fin de asegurar el desarrollo y escalado de tecnologías más eficientes que puedan ser aplicadas en la PTAR para la degradación de CPE.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación y caracterización del catalizador

Para preparar el catalizador se empleó ZrO_2 (Pa, Puratronic) y una solución de PdO_2 (Pa, Sigma Aldrich) obtenida por disolución del PdCl_2 en HCl 0,1M (PA. Sintorgan). Se empleo el método de impregnación húmeda. Esto consiste en pesar una masa de zirconia y suspenderla en un volumen de agua desionizada (100 mL), luego se le agrega un volumen de solución de PdCl_2 que contenga la masa de Pd que se requiere para lograr una carga de 1%wt. en el catalizador. A continuación, se calienta esta



suspensión en agitación magnética hasta evaporación total del agua y al sólido resultante se lo seca en estufa a 120°C 12h y posteriormente se lo calcina en mufla a 500°C por 4h.

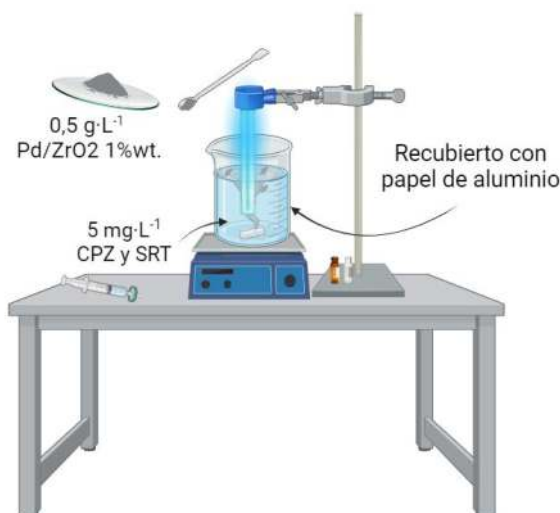
Para terminar con la preparación del catalizador se lo reduce en fase líquida, colocándolo en una solución de hidracina (PA, Sigma Aldrich) al 0,1M durante 1h a 40°C. A este catalizador así obtenido se lo caracterizó por DRX (difracción de rayos X) empleando un equipo Shimadzu XD-D1 (20kV, 40 mA, 1°/min) y TPR (reducción a temperatura programada) en un sistema Micromeritics ASAP 2020 (10°/min desde 25 a 800°C, flujo de H₂/Ar 5%V/V)

Ensayos para evaluar la actividad fotocatalítica

Para evaluar la actividad fotocatalítica, se preparó una solución de CPZ y SRT utilizando pastillas comerciales. Se pesó una masa correspondiente a 5 mg L⁻¹ del principio activo, se añadió a un vaso de precipitados con agua de ósmosis inversa (Permutation RO0420) y se agitó durante 24 h.

A continuación, esta solución se filtró utilizando un sistema de filtración al vacío (Prismatec Modelo 121) con el fin de retener principalmente los sólidos no disueltos de los incipientes del fármaco. Para evaluar la actividad fotocatalítica, se estableció un sistema experimental en escala laboratorial cómo se ilustra en la Figura 1.

Figura 1 - Representación gráfica del sistema experimental FH para la degradación de STR y CPZ.



El sistema consta de un reactor con una capacidad de 0,2 L y cubierto con papel de aluminio para reducir las interferencias de la radiación externa, y una lámpara monocroma de 9 W (Osram Dulux® S 9 W/78), como se muestra en la Figura 1.

En los ensayos de fotólisis directa (DP), la fuente de radiación se acopló y activó en la solución de los fármacos, sin presencia de catalizador. Para los ensayos FH, se añadió el catalizador en suspensión (0,5 g L⁻¹) y se activó la fuente de radiación. Cada ensayo se realizó por duplicado y duró 240 min. Es importante señalar que para las pruebas FH, se mantuvo una fase oscura durante 30 min para alcanzar el equilibrio de adsorción y desorción del catalizador, y después 240 min de FH (PÉREZ-LUCAS *et al.*, 2023).

Las muestras se recogieron a los 0, 15, 30, 60, 90, 120, 180 y 240 min y se filtraron con un filtro de jeringa de 0,45 µm. Los análisis de concentración del fármaco se determinaron por HPLC utilizando una columna Shim-pack XR-ODS C18 (3,0 mm ID × 50 mm, Shimadzu). Como fase móvil A se utilizó tampón fosfato 0,025 M (pH 2,5; 2,5 g NaH₂PO₄·2H₂O Merck P.A; 0,65 mL H₃PO₄ Synth P.A. 85 %) y como fase móvil B acetonitrilo puro (Merck, grado HPLC).

Los análisis se realizaron en modo isocrático (55% fase móvil A y 45% fase móvil B) a un caudal de 1 mL min⁻¹, volumen de inyección 20 µL, detección en DAD a longitudes de onda (λ) = 210 nm, temperatura 20°C y tiempos de retención de 5,31 y 6,15 min para CPZ y SRT, respectivamente.

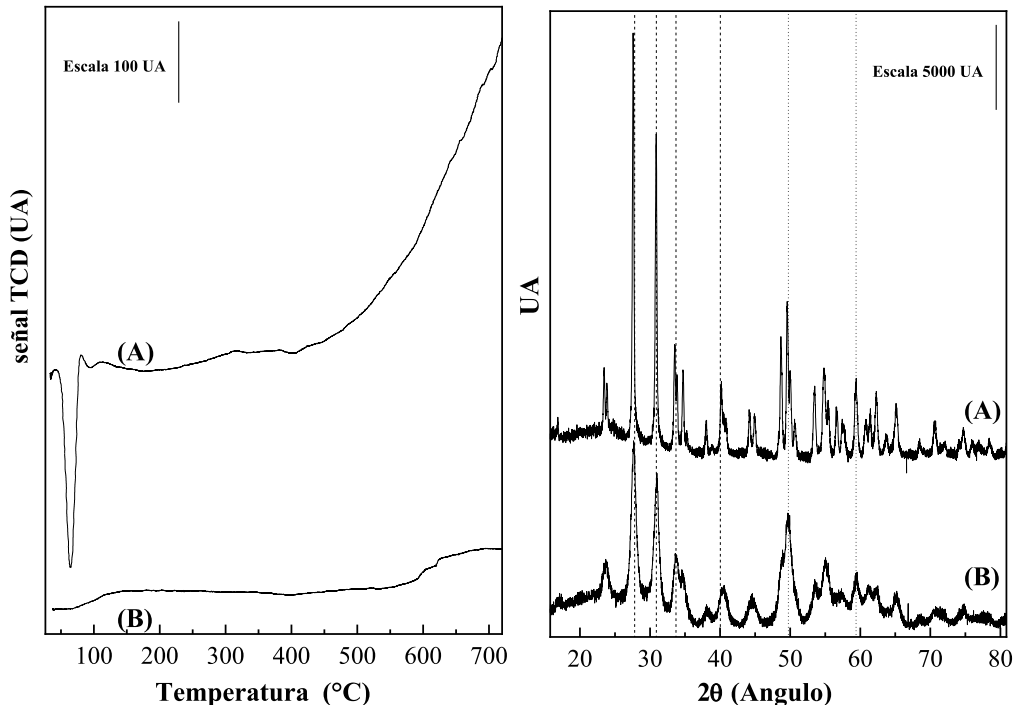
3. Resultados y Discusiones

En la Figura 2a y 2b se puede observar los resultados de caracterización de TPR y DRX respectivamente. En la Figura 1a se presentan los perfiles de reducción del catalizador soportado en ZrO₂. En el perfil (B), se confirma que el soporte no exhibe bandas de reducción a bajas temperaturas, observándose a partir de los 550-600 °C una banda amplia asociada a la reducción de especies OH o ZrOH superficiales. En el perfil (A), se detecta a bajas temperaturas el pico negativo de descomposición del β HPPdx, relacionado con el Pd, que se encuentra poco disperso.

Además, se evidencia una modificación notoria en la banda a temperaturas más elevadas, la cual adquiere mayor intensidad. Este fenómeno se asocia al efecto ejercido por el Pd, que facilita la reducción de las especies superficiales (CARLSSON *et al.*, 2003).

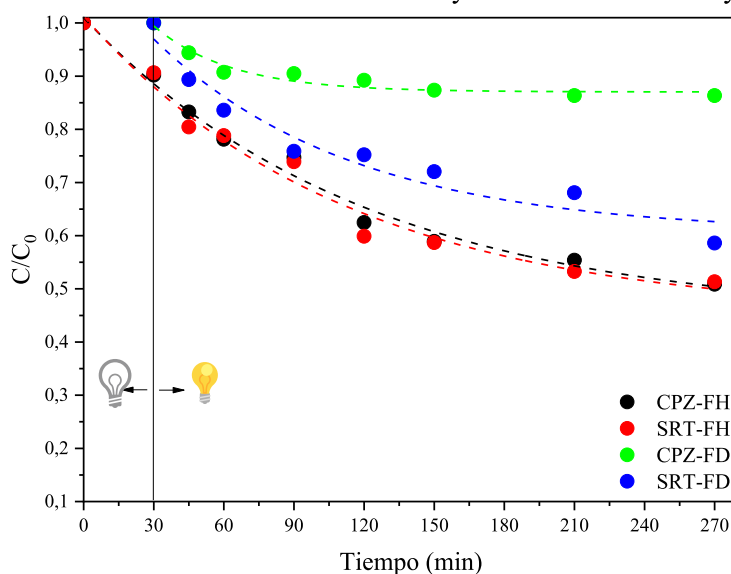
En la Fig.2b, se aprecian los difractogramas del soporte (A) y del catalizador (B). La cristalinidad de la muestra decrece luego del proceso de impregnación del Pd. En ambos difractogramas se observan las señales características de la fase monoclinica (JCPDS Nro. 37-1484, con las señales mayores características en $2\theta=28,1; 31,5; 34,2$ y $40,7^\circ$) y tetragonal que suma otras señales en 50 y 60° (JCPDS No. 42-1164). Por otro lado, debido a la alta dispersión o la baja carga metálica no se distinguen señales características del Pd (JCPDS No. 87-0645).

Figura 2 - a) Perfiles de TPR de (A) catalizador Pd/ZrO₂ 1%wt.; y (b) Soporte ZrO₂; Figura 1b) perfiles de DRX de (A) Soporte de ZrO₂ y (B) Pd/ZrO₂ 1%wt, (----) JCPDS 37-1484, Zirconia fase monoclinica, (.....) JCPDS No. 42-1164, Zirconia tetragonal.



En la Figura 3, puede observarse que la FD produjo una degradación del $14 \pm 0.01\%$ para la CPZ y del $41 \pm 0.07\%$ para la SRT, lo que indica que la SRT es más susceptible a la FD que la CPZ (MRAGUI *et al.*, 2019). Estos resultados no eran los esperados, ya que la lámpara utilizada en este trabajo emite radiación a 365 nm, mientras que la CPZ tiene picos de absorción a $\lambda \leq 350$ nm y la STR a $\lambda \leq 300$ nm (BOSCH *et al.*, 2008; NAGUIB *et al.*, 2019). En relación con los procesos de FD, los productos de transformación generados en el proceso suelen ser más tóxicos que los procesos que generan $\text{HO}^\bullet$, como la FH, por lo que deberían realizarse pruebas de toxicidad más adelante para obtener información sobre el impacto medioambiental y social de este tratamiento en soluciones que contengan SRT y CPZ (DA SILVA *et al.*, 2015; NELSON *et al.*, 2019).

Figura 3 - Variación de la concentración de CPZ y SRT durante los ensayos FD y FH.



Como puede observarse en la Figura 3, los ensayos de FH con el catalizador dieron lugar a degradaciones del 51 % tanto para CPZ como para SRT. Esto significa que el catalizador Pd/ZrO₂ 1%wt. es selectivo para la degradación de ambos fármacos. Sin embargo, para confirmar la formación de $\text{HO}^\bullet$, se necesitan ensayos para evaluar la selectividad del catalizador.

Cuando se compara con otros trabajos de la bibliografía, el catalizador de este estudio muestra potencial. En el trabajo de Mohan *et al.* (2021), se evaluó un catalizador de zinc/ferrita para la degradación de CPZ. Se obtuvo una degradación de aproximadamente el 82% con una concentración de catalizador de 75 g L⁻¹, pH neutro, concentración inicial = 25 mg L⁻¹ y una lámpara de xenón acoplada a un filtro de luz UV. Es importante destacar cuatro diferencias entre el trabajo de Mohan *et al.* (2021) y el presente trabajo:

- La concentración de catalizador que utilizaron fue 150 veces superior;
- La concentración de fármaco utilizada (5 veces superior);
- Lámpara de xenón, que tiene un mayor consumo de energía en comparación con la lámpara LED que utilizamos;
- Menor tiempo de proceso, que fue de 80 min, en comparación con los 240 min de FH utilizados en este trabajo.

En cuanto a la degradación SRT, en el trabajo de Khalil *et al.* (2020) se evaluó una concentración inicial de 0,1mM, concentración de catalizador = 0,2 g L⁻¹ (ZnO), pH = 7,3, lámpara = 20 W que emitía radiación con $\lambda = 254$ nm, y un reactor de 0,1 L. Con esta configuración experimental, se obtuvo una degradación de ~ 75% en 50 min. Al comparar este trabajo con el presente estudio, se observan diferencias significativas, como el catalizador utilizado, la concentración de catalizador, el volumen del reactor y el tiempo de tratamiento.



Sin embargo, en general, los dos estudios mencionados utilizaron de un solo componente, indicando así menos interacciones entre los componentes del proceso, a diferencia del presente estudio, que evaluó preliminarmente la degradación de los fármacos en una solución multicomponente. Sin embargo, para hacer mejores comparaciones, se necesitan más ensayos, así como estimaciones del flujo de fotones, la cinética y el rendimiento cuántico global (DA SILVA *et al.*, 2015).

4. Consideraciones finales

Como puede observarse, este trabajo ha demostrado que tras la impregnación con Pd se produjeron cambios en las propiedades del catalizador de ZrO_2 , evidenciados por la reducción de las especies superficiales y la disminución de la cristalinidad. Basándose en los resultados preliminares de FD y FH, se demuestra que el catalizador utilizado tiene potencial para su uso en la degradación de CPZ y SRT; sin embargo, se necesitan más pruebas para evaluar el rendimiento del catalizador.

También se necesitan más análisis, como estimaciones del flujo de fotones, cinética y rendimiento cuántico global. En general, este trabajo contribuye al desarrollo de nuevas tecnologías avanzadas y económicas para el tratamiento de aguas y aguas residuales, con el fin de garantizar la reducción de los impactos ambientales debidos a la presencia de CPE en el medio ambiente. De esta forma, podemos garantizar un medio ambiente con una mejor calidad de vida, tanto para la humanidad como para la flora y la fauna.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de CNPq, CAPES, FINEP y FAPERGS y a Cytel en el marco de la Red 323RT0143

6. Referencias

ALBORNOZ, L. L. *et al.* Synthesis and characterization of immobilized titanium-zirconium Sn-doped oxides onto metallic meshes and their photocatalytic activity for erythromycin mineralization. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 414, p. 128891, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138589472100485X>. Acesso em: 9 jan. 2023.

ARNNOK, P. *et al.* Selective Uptake and Bioaccumulation of Antidepressants in Fish from Effluent-Impacted Niagara River. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 51, n. 18, p. 10652–10662, 2017. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b02912>.

ARSAND, J. B. *et al.* Spatial-temporal occurrence of contaminants of emerging concern in urban rivers in southern Brazil. **Chemosphere**, [s. l.], v. 311, n. October 2022, p. 136814, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653522033070>.

BOSCH, M. E. *et al.* Analytical methodologies for the determination of sertraline. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, [s. l.], v. 48, n. 5, p. 1290–1302, 2008.

BRAUER, R. *et al.* Psychotropic medicine consumption in 65 countries and regions, 2008–19: a longitudinal study. **The Lancet Psychiatry**, [s. l.], v. 8, n. 12, p. 1071–1082, 2021. Disponível em: www.thelancet.com/psychiatryVol. Acesso em: 13 jun. 2023.

CARLSSON, a. F. *et al.* Adsorption and reaction on pristine and oxidized Co-Pd bimetallic particles supported on Al_2O_3 thin films. **Surface Science**, [s. l.], v. 545, p. 143–153, 2003.

CHEN, H. *et al.* Synthesis of Palladium Nanoparticles and Their Applications for Surface-Enhanced Raman Scattering and Electrocatalysis. **The Journal of Physical Chemistry C**, [s. l.], v. 114, n. 50, p. 21976–21981, 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp106623y>.



CRITTENDEN, J. C. *et al.* **MWH's Water Treatment**. [S. l.: s. n.], 2012.

DA SILVA, S. W. *et al.* Degradation of the commercial surfactant nonylphenol ethoxylate by advanced oxidation processes. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 282, p. 241–248, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.014>.

DWIVEDI, K. *et al.* Evaluation and optimization of Fenton pretreatment integrated with granulated activated carbon (GAC) filtration for carbamazepine removal from complex wastewater of pharmaceutical industry. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 3681–3689, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.054>.

ERICSON, J. F.; LAENGE, R.; SULLIVAN, D. E. Comment on “Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: a national reconnaissance”. **Environmental science & technology**, [s. l.], v. 36, n. 18, p. 4005–4006, 2002.

GORNIK, T. *et al.* Determination and photodegradation of sertraline residues in aqueous environment. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 256, p. 113431, 2020.

HOEFLER, R. *et al.* Trends in sales of antidepressants in Brazil from 2014 to 2020: A time trend analysis with joinpoint regression. **Journal of Affective Disorders**, [s. l.], v. 323, p. 213–218, 2023. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36436765>. Acesso em: 11 jan. 2023.

JARVIS, A. L.; BERNOT, M. J.; BERNOT, R. J. The effects of the psychiatric drug carbamazepine on freshwater invertebrate communities and ecosystem dynamics. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 496, p. 461–470, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.084>.

KENT, J.; TAY, J. H. **Treatment of 17 α -ethinylestradiol, 4-nonylphenol, and carbamazepine in wastewater using an aerobic granular sludge sequencing batch reactor**. [S. l.: s. n.], 2019.

KHALIL, K. D. *et al.* Synthesis, structural, dielectric and optical properties of chitosan-MgO nanocomposite. **Journal of Taibah University for Science**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 975–983, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tusc20>. Acesso em: 5 out. 2023.

KOSJEK, T. *et al.* Mass spectrometry for identifying pharmaceutical biotransformation products in the environment. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 26, n. 11, p. 1076–1085, 2007.

MOHAN, H. *et al.* Highly efficient visible light driven photocatalytic activity of zinc/ferrite: Carbamazepine degradation, mechanism and toxicity assessment. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 416, n. February, p. 126209, 2021.

MOHAPATRA, D. P. *et al.* Analysis and advanced oxidation treatment of a persistent pharmaceutical compound in wastewater and wastewater sludge-carbamazepine. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 470–471, p. 58–75, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.034>.

MRAGUI, A. El *et al.* Synthesis of fe-and co-doped TiO₂ with improved photocatalytic activity under visible irradiation toward carbamazepine degradation. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 23, p. 4–6, 2019.

NAGUIB, I. A. *et al.* Stability indicating spectrophotometric methods for quantitative determination of carbamazepine and its degradation product, iminostilbene, in pure form and pharmaceutical formulations. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [s. l.], v. 214, p. 21–31, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.01.080>.



NELSON, A. *et al.* Phytotoxicity and genotoxicity evaluation of 2,4,6-tribromophenol solution treated by UV-based oxidation processes. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.057>. Acesso em: 8 jan. 2024.

OMOTUNDE, O. I. *et al.* Photocatalytic behavior of mixed oxide NiO/PdO nanoparticles toward degradation of methyl red in water. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, [s. l.], v. 365, n. June, p. 145–150, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.08.005>.

PATEL, M. *et al.* Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods. **Chemical Reviews**, [s. l.], v. 119, n. 6, p. 3510–3673, 2019.

PÉREZ-LUCAS, G. *et al.* Removal of Contaminants of Emerging Concern from a Wastewater Effluent by Solar-Driven Heterogeneous Photocatalysis: A Case Study of Pharmaceuticals. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s. l.], v. 234, n. 1, p. 55, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06075-4>. Acesso em: 17 jan. 2024.

PIVETTA, R. C. *et al.* Tracking the occurrence of psychotropic pharmaceuticals in Brazilian wastewater treatment plants and surface water, with assessment of environmental risks. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 727, p. 138661, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138661>.

RABEEA, S. A. *et al.* Surging trends in prescriptions and costs of antidepressants in England amid COVID-19. **DARU, Journal of Pharmaceutical Sciences**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 217–221, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40199-021-00390-z>.

SHARAF ALDEEN, E. M. *et al.* Altered zirconium dioxide based photocatalyst for enhancement of organic pollutants degradation: A review. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135349>. Acesso em: 26 jan. 2024.

STYRISHAVE, B.; HALLING-SØRENSEN, B.; INGERSLEV, F. Environmental risk assessment of three selective serotonin reuptake inhibitors in the aquatic environment: A case study including a cocktail scenario. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 254–261, 2011.

WISHART, D. S. *et al.* DrugBank 5.0: A major update to the DrugBank database for 2018. **Nucleic Acids Research**, [s. l.], v. 46, n. D1, p. D1074–D1082, 2018.

YAN, S. *et al.* Environmentally Relevant Concentrations of Carbamazepine Caused Endocrine-Disrupting Effects on Nontarget Organisms, Chinese Rare Minnows (*Gobiocypris rarus*). **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 886–894, 2018.

