

Ambiente y humanos coexistimos: una perspectiva inicial para el manejo de la contaminación ambiental con residuos de fármacos en Costa Rica

Aura Ledezma-Espinoza¹

Escuela de Química
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y
Microbiológicos (CEQIATEC),
Instituto Tecnológico de Costa Rica.
✉ aledezma@itcr.ac.cr

Carlos Enrique Calleja Amador

Escuela de Química
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ ccalleja@itcr.ac.cr

¹Autor para correspondencia

Resumen

La contaminación con residuos de fármacos es un problema global que puede afectar la salud ambiental y pública. Sin embargo, todavía existen muchos vacíos en monitoreo, priorización de compuestos, determinación de efectos, legislación y control, especialmente en países con un menor desarrollo. En Costa Rica, los avances se han dirigido al monitoreo, resultando escasas las acciones integradas y sostenibles para estimar realmente el riesgo. La incidencia de enfermedades, consumo de medicamentos, calidad de las aguas de consumo y el tratamiento de las aguas residuales, son parámetros que pueden utilizarse para hacer una mejor estimación de este riesgo. Altos consumos de medicamentos se han registrado en la atención de enfermedades no transmisibles causantes del 81% de la mortalidad, y múltiples residuos de fármacos como sulfametoxazol, atenolol y carbamazepina se han reportado en aguas superficiales y residuales, incluso en niveles capaces de generar efectos adversos sobre especies acuáticas. El manejo de las aguas residuales mediante tanques sépticos o plantas de tratamiento primario se ha asociado como una razón de esta contaminación. Este artículo pretende explicar el contexto general de la problemática en Costa Rica, para valorar las oportunidades de prevención y mitigación, así como la necesidad de prepararse ante una eventual regulación nacional.

Palabras clave: Salud pública, fármacos, contaminantes emergentes, agua residual.

Desarrollo

¿Sabía usted que las enfermedades más comunes que padecen los costarricenses son las denominadas ENT? Estas siglas representan las enfermedades no transmisibles, enfermedades no contagiosas que suelen ser crónicas. Según datos del Ministerio de Salud en 2019 las ENT constituyeron el 81% de la mortalidad nacional, con una incidencia de 32% por enfermedades cardiovasculares, un 27% por cáncer, 7% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica y un 5% por diabetes, con una mayor afectación sobre la comunidad masculina [1], [2]. Ante la preocupación, diversas iniciativas se han desarrollado para reducir su impacto. Como ejemplo, el Ministerio de Salud ha preparado la “Estrategia de Salud de Abordaje Integral de las Enfermedades No Transmisibles y Obesidad 2022-2030”, donde se proponen compromisos nacionales de múltiples actores para la atención de factores de riesgo de aparición, protección, condicionantes sociales y acciones para el manejo efectivo de las ENT, con el fin de mitigar sus efectos y reducir la mortalidad prematura en la población nacional [2], [3].

Las condiciones de salud y manejo de la contaminación con fármacos se relacionan con una serie de factores del individuo y del país en el que habita (Figura 1). En general se destacan, una adecuada salud física y mental, acceso al agua potable de calidad, servicios de saneamiento adecuados, condiciones climáticas y desarrollo económico [4], mientras que el envejecimiento de la población y el aumento en el acceso a sistemas para el cuidado de la salud se han relacionado con aumentos del consumo de medicamentos a nivel global [5].



Figura 1. Factores asociados a la salud pública y gestión de la contaminación con residuos de fármacos [5].

En Costa Rica, debido al acceso ampliado de medicamentos mediante la venta libre en establecimientos privados y su distribución en centros de salud públicos, se ha observado un aumento en el consumo de fármacos a través de los años. Según la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER), el mercado de medicamentos de venta libre alcanzó los 171 millones de dólares (USD) en 2021, incluyendo como principales categorías a los medicamentos distribuidos para la tos, el resfriado y las alergias (31%), analgésicos (30%) y para afecciones digestivas (22%) [6]. Por su parte en el sistema de salud pública, según datos de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), algunos de los medicamentos más consumidos en el año 2023 incluyeron la metformina para el tratamiento de la diabetes; el analgésico paracetamol; los anti-inflamatorios no esteroideos ibuprofeno y sulindaco; el fibrato gemfibrozilo utilizado en la regulación de lípidos; los anticonvulsivos gabapentina y carbamazepina; los antibióticos cefalexina y trimetoprima con sulfametoxazol; así como los fármacos irbesartán y atenolol; estos últimos utilizados en tratamientos relacionados con la presión arterial [7]. Llama la atención que, algunos de estos medicamentos han mostrado un incremento en su consumo. Para el año 2023, la

metformina de 500 mg en presentación de tableta, alcanzó una cantidad de 120 toneladas del fármaco activo [7], aumentando un 137% respecto de su consumo en el año 2015 [8]. En la Figura 2, se presentan algunos de los fármacos más consumidos en el 2023 a nivel nacional según la CCSS.

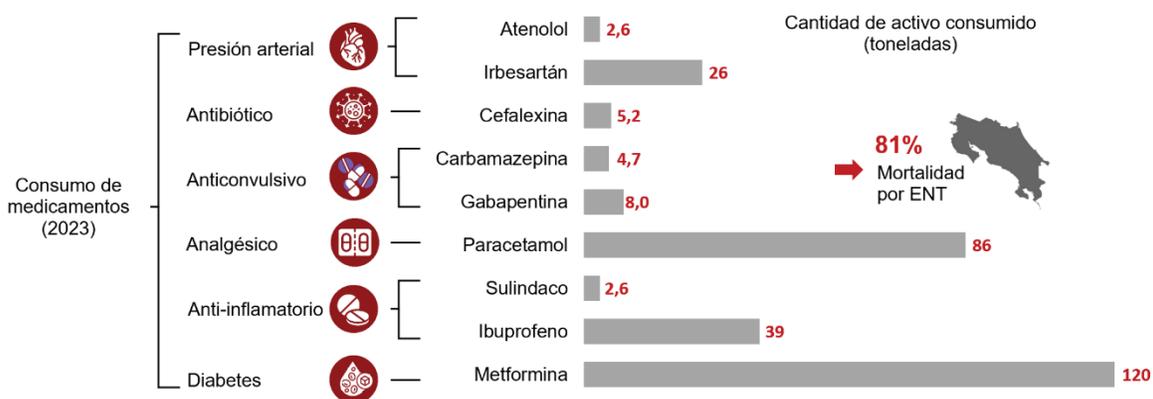


Figura 2. Medicamentos de mayor consumo reportados por CCSS en 2023 [7].

Tanto los datos de la CCSS como los de PROCOMER muestran una alta prescripción para las ENT. Esta situación implica un costo para los pacientes que podrían estar expuestos a los efectos secundarios de esos medicamentos; un costo financiero para el sistema de salud pública, pues obliga a la CCSS a adquirir cantidades crecientes de medicamentos para atender padecimientos que podrían ser prevenibles, y a su vez, un costo ambiental, cuya dimensión apenas empieza a ser comprendida en nuestro país sobre los ecosistemas expuestos.

¿Se ha detenido usted a pensar qué sucede con los fármacos una vez que fueron consumidos por el paciente? Una vez que una persona consume un medicamento, su cuerpo lo metaboliza y finalmente lo excreta, con su posterior disposición a los sistemas de tratamiento de aguas residuales; en este proceso, los fármacos pueden ser expulsados en su forma de activo original, o como metabolitos, y ambos a su vez, pueden experimentar transformaciones debido a procesos biológicos y químicos cuando se exponen al ambiente [9]. Los residuos de fármacos en el ambiente se han catalogado como contaminantes emergentes, esto es, compuestos sintéticos o de origen natural capaces de pasar inadvertidos por su falta de monitoreo y regulación, que cuentan con una amplia distribución alrededor del mundo en concentraciones de microgramos a nanogramos por litro ($\mu\text{g/L}$ a ng/L), y que tienen el potencial de causar efectos adversos al ambiente y a la salud humana [10], [11]. Dentro de los efectos más reconocidos están la resistencia a los antimicrobianos y la disrupción endocrina [12], [13]. En la Figura 3 se muestran las potenciales rutas de exposición y posibles impactos que estos residuos tienen sobre los ecosistemas acuáticos.

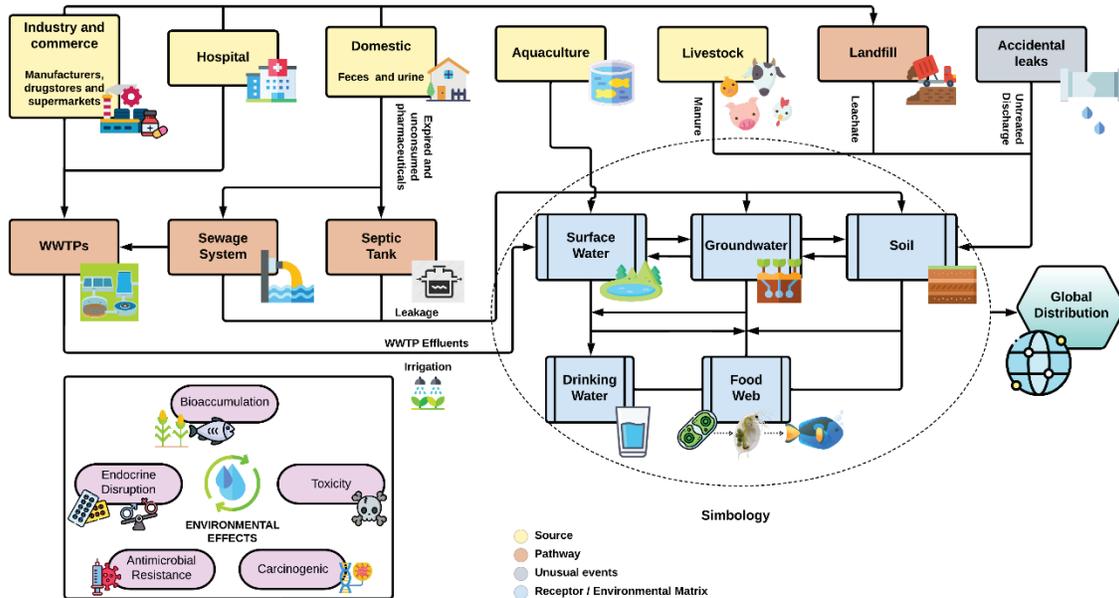


Figura 3. Potenciales rutas de exposición e impactos de los residuos de medicamentos en los ecosistemas acuáticos (elaboración propia).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales no están usualmente diseñadas para eliminar completamente los residuos de fármacos [14], normalmente, estas incluyen procesos físicos, químicos y biológicos que trabajan en la remoción de sólidos gruesos y compuestos biodegradables [15], por lo que para eliminar sustancias complejas como los fármacos se han desarrollado metodologías híbridas con procesos biológicos y procesos avanzados como la adsorción con carbón activado, utilizando ozono (ozonólisis), y otras reacciones químicas más complejas como la fotocatalisis y reacciones Fenton [16]. Aun cuando estos sistemas pueden mejorar significativamente la remoción, implican una importante inversión inicial, de operación y mantenimiento, por lo que pueden darse limitaciones en su implementación, especialmente en países con recursos limitados [17].

Según lo expuesto, las medidas de prevención, y la adecuada disposición y tratamiento de aguas residuales son fundamentales para reducir el impacto de los residuos de fármacos en el ambiente; sin embargo, en la mayoría de los casos, este no es el escenario real. En Costa Rica, la mayoría de la población carece de servicios básicos de saneamiento, y muchas de las aguas residuales se vierten en ríos o en el mar sin tratamientos que cumplan con la reglamentación técnica [18]. Según reportes del Estado de la Nación [1], a nivel nacional la cobertura de alcantarillado sanitario conectado a plantas de tratamiento de agua residual apenas pasó del 15,5% en 2021 al 17,6% en 2022, mientras que un 75% del agua residual generada sigue siendo tratada con tanques sépticos, un 1,4% de los hogares utiliza letrinas, y un mínimo del 0,3% opta por la evacuación de desechos a cielo abierto.

Ante lo anterior, en Costa Rica, se han hecho esfuerzos para evidenciar la presencia de residuos de fármacos en diferentes matrices acuáticas. Por ejemplo, en el 2011 se reportó por primera vez la presencia de doxiciclina, carbamazepina, triclosán y cafeína en áreas costeras y urbanas del país [19]. En aguas residuales de Puntarenas y Guanacaste se comprobó la presencia de cocaína, cannabis, atenolol, naproxeno y sulfametoxazol [20]. Asimismo, se han reportado fármacos como atenolol (3610 ng/L), levofloxacina (1020 ng/L) y carbamazepina (2290 ng/L) en aguas residuales del Gran Área Metropolitana, así como sulfametoxazol (hasta 400 ng/L) en muestras de agua del río Virilla; algunos incluso en concentraciones que suponen un riesgo para organismos acuáticos, tal como se ha indicado con los antibióticos sulfametoxazol y levofloxacina [5].

A nivel internacional, la regulación asociada a la presencia de residuos de fármacos en el ambiente es escasa, especialmente porque los estándares deben ser adaptados al contexto de crecimiento urbano exponencial, a la disponibilidad de recursos económicos, capacidad técnica (equipos y recurso humano) y a la voluntad pública y política [17]. En Costa Rica la situación reglamentaria no difiere mucho, pues por ejemplo, la Reglamentación para Aguas Residuales N33601 [L1], así como para Aguas Potables N38924-S [L2], actualmente no involucran parámetros asociados con residuos de fármacos, además de que hay un rezago en la revisión de los niveles permitidos de muchas sustancias que sí están reguladas.

La gestión de la contaminación por residuos de fármacos necesita una estrategia holística que priorice medidas preventivas. Se sugiere adoptar diferentes enfoques para mejorar la gestión, entre ellos, el enfoque técnico centrado en utilizar tecnologías para el tratamiento y monitoreo rutinario; el enfoque colaborativo para la cooperación entre entes como la academia, sector privado, autoridades de salud y comunidad; y el enfoque regulatorio que involucra políticas públicas y medidas generadas por las autoridades como límites de emisión mandatorios, condiciones técnicas mínimas de tratamiento, campañas de información, apoyo a la investigación y responsabilidad dentro de la cadena de valor [5], [21]. En la Figura 4, se muestran algunas acciones a nivel técnico para la atención de la problemática.

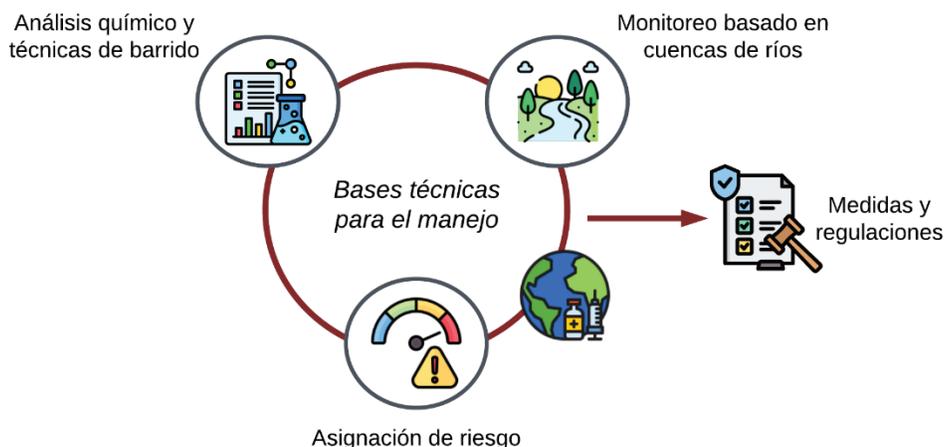


Figura 4. Estrategia técnica para el manejo de la contaminación de residuos con fármacos. Basado en Geissen *et al.* [22].

Medidas dirigidas a la prevención y reducción en el uso de fármacos pueden ser promovidas por especialistas en salud y programas educativos, entre ellas, mejorar las condiciones higiénicas en instalaciones de salud y granjas, priorizar dosis terapéuticas reducidas evitando prescripciones cuestionables, promover programas de salud preventiva y capacitación de profesionales, fomentar sistemas de devolución, incentivar el rediseño de medicamentos respetuosos con el ambiente y promover la instalación de procesos avanzados para eliminar los residuos de fármacos de las aguas residuales [23]. Por su parte, la comunidad puede contribuir apegándose a la prescripción de los medicamentos, devolviendo los medicamentos no utilizados o caducados en los puntos de recogida adecuados, no consumiendo posibles medicamentos falsificados, evitando la disposición de los residuos de medicamentos en el inodoro o el fregadero y participando de campañas educativas, y prácticas saludables como una buena nutrición y ejercicio físico [17].

En este contexto, es importante reconocer el papel de algunas instituciones en el país para generar iniciativas en el manejo de la contaminación con residuos de fármacos. Por ejemplo, la CCSS ha realizado campañas de recolección masiva para que los ciudadanos lleven sus medicamentos vencidos, no utilizados o en mal estado, y así brindarles una correcta disposición final, lo mismo han hecho varias universidades públicas y privadas. Algunos hospitales forman parte de esfuerzos colaborativos a nivel internacional como la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables, que promueve programas integrales de residuos de fármacos, y el uso optimizado de antibióticos [24], [25]. Específicamente,

el Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante la Escuela de Química y el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) con el apoyo de la Fundación Tecnológica de Costa Rica (FUNDATEC), han colaborado con el Ministerio de Salud, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la CCSS, en diferentes capacitaciones técnicas a su personal para informar sobre la problemática y medidas de manejo; mientras que en conjunto con la CCSS, se han desarrollado proyectos de evaluación de sistemas de tratamiento avanzados en escala piloto y escala real para la remoción de residuos de fármacos en plantas de tratamiento de aguas residuales de los Hospitales San Vicente de Paúl en Heredia y San Rafael de Alajuela.

Estas acciones encuentran arraigo en la Ley para la Gestión Integral de Residuos (LGIR 8839) [L3], con el Decreto N36039-S del Reglamento para la disposición final de medicamentos, materias primas y sus residuos [L4] y en la creación de la Secretaría Técnica de Coordinación para la Gestión de Sustancias Químicas [L5]. Adicionalmente, con el apoyo técnico de Colegios Profesionales como el de Químicos y el de Farmacéuticos para temas de información y consulta legal y técnica. Finalmente, es importante recordar que el artículo 50 de la Constitución Política establece nuestro derecho a gozar de un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, y que, dentro de la institucionalidad, la Ley General de la Administración Pública N6227 [L6], establece en el artículo 16 que “En ningún caso podrán dictarse actos contrarios a reglas unívocas de la ciencia o de la técnica, o a principios elementales de justicia, lógica o conveniencia.” Esta descripción demuestra que los argumentos científicos justifican la preocupación por el impacto de los residuos de fármacos, así como los mecanismos legales suficientes para respaldar acciones preventivas y correctivas que protejan la salud y ambiente costarricense.

Conclusión

Es fundamental la concienciación en el país sobre la contaminación ambiental con residuos de fármacos para tomar medidas preventivas y de mitigación que reduzcan su impacto. La gestión adecuada de residuos de fármacos debe basarse en un proceso iterativo respaldado por datos técnicos y económicos reales, en donde autoridades de salud, saneamiento, educación, sector privado, colegios profesionales, y múltiples grupos académicos deben consultarse para generar medidas alcanzables y sostenibles, así como instrumentos legales razonables que garanticen un mayor nivel de protección de los ecosistemas acuáticos y de la salud pública de nuestro país.

Agradecimientos

Gracias al Proyecto de Investigación “Evaluación de la presencia, distribución, degradación y significancia ecotoxicológica de productos farmacéuticos considerados como contaminantes emergentes de alta incidencia en aguas superficiales de la zona urbana de Costa Rica (Fase 2). COES”, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación y Extensión. A los asistentes estudiantes de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Química: Verónica Paniagua Caligaris, Andrea Fernández Arias y Enzo Villalobos Barrantes, por su gran apoyo en la elaboración de esta publicación.

Bibliografía

- [1] CONARE, “Informe de Estado de la Nación. Equidad e integración social.” 2022. [Online]. Available: <https://estadonacion.or.cr/?informes=informe-estado-de-la-nacion-2022>
- [2] Ministerio de Salud, “Estrategia Nacional de Abordaje Integral de las Enfermedades No Transmisibles y Obesidad 2022-2030,” 2022. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos-left/documentos-ministerio-de-salud/material-informativo/material-publicado/estrategias-en-salud/6091-resumen-estrategia-nacional-de-a>

- [3] AyA, "Política de Organización y Fortalecimiento de la Gestión Comunitaria de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento," 2015. [Online]. Available: <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/AyA Política Nacional de Agua Potable de Costa Rica 2017-2030.pdf>
- [4] P. Pérez-Martínez, R. Gómez-Huelgas, and F. Pérez-Jiménez, "Is the Planetary Health Diet the solution for mitigating noncommunicable diseases?," *Rev. Clínica Española (English Ed.)*, vol. 220, no. 9, pp. 573–575, 2020, doi: 10.1016/j.rceng.2019.12.001.
- [5] A. Ledezma-Espinoza, "Evaluation of the occurrence, degradation, and ecotoxicological significance of pharmaceuticals as emerging contaminants of concern in wastewaters and surface waters of the urban area in Costa Rica," 2023. [Online]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14610>
- [6] M. Alpízar, "Caracterización de la Industria de Medicamentos de Libre Venta en Costa Rica," 2022. [Online]. Available: <https://sistemas.procomer.go.cr/DocsSEM/1BF575CF-83EA-4B68-A1F6-94D4C0FDCAC7.pdf>
- [7] CCSS, "Informe de Consumos de Fármacos 2024. Memorando ARSDT-CNSF-0140-2024," 2024.
- [8] CCSS, "Informe de Consumo de Fármacos 2015. Memorando CNSF-190-06-15," 2016.
- [9] K. Fent, A. A. Weston, and D. Caminada, "Ecotoxicology of human pharmaceuticals," *Aquat. Toxicol.*, vol. 76, no. 2, pp. 122–159, 2006, doi: 10.1016/j.aquatox.2005.09.009.
- [10] M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. U. Pittman, and D. Mohan, "Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods," *Chem. Rev.*, vol. 119, no. 6, pp. 3510–3673, 2019, doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00299.
- [11] X. Tong *et al.*, "Source, fate, transport and modelling of selected emerging contaminants in the aquatic environment: Current status and future perspectives," *Water Res.*, vol. 217, no. April, p. 118418, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118418.
- [12] A. Gogoi, P. Mazumder, V. K. Tyagi, G. G. Tushara Chaminda, A. K. An, and M. Kumar, "Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review," *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 6, no. December 2017, pp. 169–180, 2018, doi: 10.1016/j.gsd.2017.12.009.
- [13] D. Montes-Grajales, M. Fennix-Agudelo, and W. Miranda-Castro, "Occurrence of personal care products as emerging chemicals of concern in water resources: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 601–614, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.286.
- [14] M. Janet Gil, A. María Soto, J. Iván Usma, and O. Darío Gutiérrez, "Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos," vol. 7, no. 2, pp. 52–73, 2012, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- [15] O. M. Rodriguez-Narvaez, J. M. Peralta-Hernandez, A. Goonetilleke, and E. R. Bandala, "Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 323, pp. 361–380, 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.04.106.
- [16] K. Nava-Andrade, G. G. Carbajal-Arízaga, S. Obregón, and V. Rodríguez-González, "Layered double hydroxides and related hybrid materials for removal of pharmaceutical pollutants from water," *J. Environ. Manage.*, vol. 288, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112399.
- [17] D. da S. Barcellos, M. Procopiuck, and H. A. Bollmann, "Management of pharmaceutical micropollutants discharged in urban waters: 30 years of systematic review looking at opportunities for developing countries," *Sci. Total Environ.*, vol. 809, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151128.
- [18] INEC, "Población y Ambiente," 2022. [Online]. Available: <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-12/anAmbientINEC2022-01.pdf>
- [19] A. L. Spongberg *et al.*, "Reconnaissance of selected PPCP compounds in Costa Rican surface waters," *Water Res.*, vol. 45, no. 20, pp. 6709–6717, 2011, doi: 10.1016/j.watres.2011.10.004.

- [20] A. Causanilles, C. Ruepert, M. Ibáñez, E. Emke, F. Hernández, and P. de Voogt, "Occurrence and fate of illicit drugs and pharmaceuticals in wastewater from two wastewater treatment plants in Costa Rica," *Sci. Total Environ.*, vol. 599–600, pp. 98–107, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.202.
- [21] S. M. Foen and M. Beer, "Implementation of the Protocol on Water and Health in Switzerland," 2010, [Online]. Available: <https://unece.org/environment-policy/water/areas-work-protocol/documents-summary-reports-1streporting>
- [22] V. Geissen *et al.*, "Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management," *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 57–65, 2015, doi: 10.1016/j.iswcr.2015.03.002.
- [23] S. Klätte, H. Schaefer, and M. Hempel, "Pharmaceuticals in the environment – A short review on options to minimize the exposure of humans, animals and ecosystems," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 5, pp. 61–66, 2017, doi: 10.1016/j.scp.2016.07.001.
- [24] SHPA, "Pharmacy Forecast Australia 2022," 2022. [Online]. Available: <https://shpa.org.au/publicassets/e2fda00d-6e01-ed11-9106-00505696223b/Pharmacy-Forecast-Australia-2022-Executive-Summary.pdf>
- [25] S. Carino, R. Sapsford, and F. Armstrong, "Pharmacy forecast Australia 2022: partner perspective – Climate and Health Alliance," *J. Pharm. Pract. Res.*, pp. 10–11, 2022, doi: 10.1002/jppr.1848.

Anexo de Normativa Nacional

- [L1] Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N33601
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524
- [L2] Reglamento para la calidad del Agua Potable N38924-S
https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80047
- [L3] Ley para la Gestión Integral de Residuos N8839
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=68300
- [L4] Reglamento para la disposición final de medicamentos, materias primas, y sus residuos N36039-S
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68197&nValor3=81183&strTipM=TC
- [L5] Decreto 33104-RE-MAG-MINAE-S
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_articulo.aspx?param1=NRA&nValor1=1&nValor2=83457&nValor3=107181&nValor5=3
- [L6] Ley General de la Administración Pública N6227
https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=13231

Sobre los autores

Aura Ledezma-Espinoza

Doctora en Ciencias Naturales para el Desarrollo, con una especialidad en contaminantes emergentes tipo fármaco. Labora para la Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: 0000-0003-0137-4306.

Carlos Enrique Calleja-Amador

Licenciado en Química, cuenta con una maestría en Química Analítica y una maestría en Administración Educativa. Labora para la Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: 0009-0002-2238-0561.