Agua limpia con zeolitas, proceso ecológico

Clean water with zeolites, an ecological process

Por Irvin Alejandro Valdés Franco, Elia Alejandra Teutli Sequeira, Guadalupe Vázquez Mejía, Perla Tatiana Almazán Sánchez

Resumen: El incremento poblacional, de la urbanización y la actividad industrial generan más cantidad de aguas residuales a nivel global, y los tratamientos convencionales no eliminan por completo los contaminantes orgánicos e inorgánicos persistentes. Ante este desafío, los procesos avanzados de oxidación, especialmente el de Fenton, han demostrado alta eficacia en la degradación de esos compuestos. En este contexto, los catalizadores basados en zeolitas con este proceso son una alternativa sostenible y económica al integrar la capacidad oxidativa del hierro con materiales naturales abundantes. Este artículo examina sus fundamentos, su relevancia ambiental y su potencial de aplicación en la remediación de aguas residuales.

Palabras clave: aguas residuales, tratamientos avanzados, proceso de Fenton, zeolitas.

Abstract: Population growth, urbanization, and industrial activity are generating increasing amounts of wastewater worldwide, and conventional treatment methods do not completely remove persistent organic and inorganic pollutants. In response to this challenge, advanced oxidation processes–particularly the Fenton process–have demonstrated high efficacy in degrading these compounds. In this context, zeolite-based catalysts using this process offer a sustainable and cost-effective alternative by combining the oxidative capacity of iron with abundant natural materials. This article examines their fundamentals, environmental relevance, and potential for application in wastewater remediation.

Keywords: wastewater, advanced treatment, Fenton process, zeolites.

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo económico. No obstante, el crecimiento industrial acelerado, la urbanización y las actividades antropogénicas en el mundo generan aproximadamente 380 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales anuales (UNESCO, 2023). De este volumen, alrededor de 56% recibe tratamiento seguro antes de ser descargado al medio ambiente (Al-Khatib y AlHanaktah, 2025). En el Estado de México, en 2025, se colectaron 236 millones de metros cúbicos de aguas residuales; sin embargo, únicamente se trataron alrededor de 47 millones, dato que evidencia una insuficiente capacidad en la infraestructura de tratamiento (Alcántara *et al.*, 2026). Esto significa que enormes volúmenes de agua contaminada llegan a ríos, lagos y acuíferos, lo cual genera graves consecuencias para la salud, los ecosistemas y el desarrollo humano sostenible.

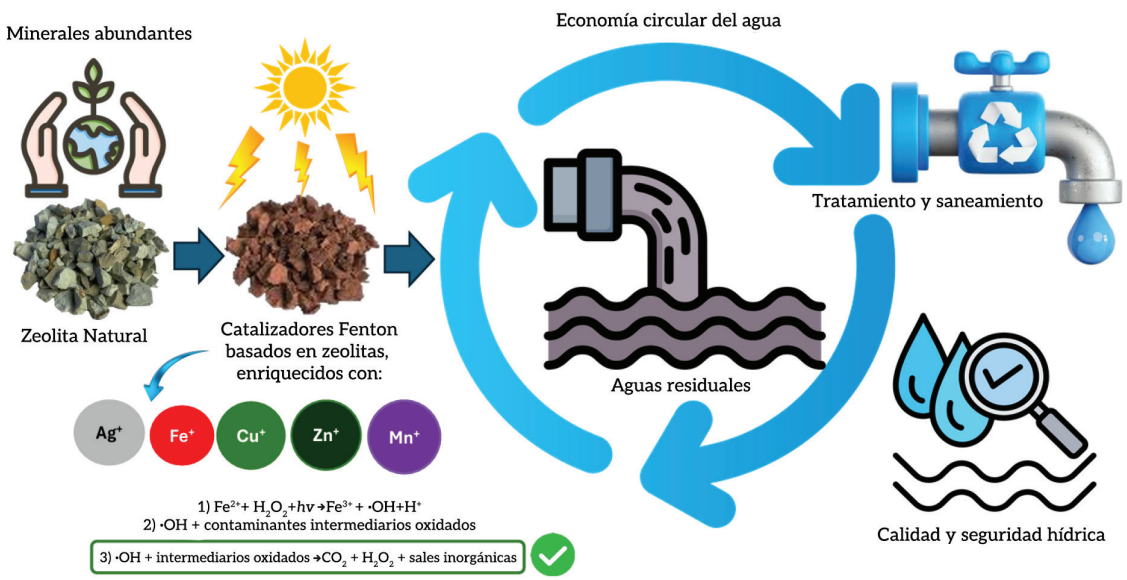
Las aguas residuales contienen materia orgánica, patógenos, compuestos tóxicos industriales, plaguicidas y

fármacos que muchos tratamientos convencionales no eliminan de manera eficiente. Esto no solo afecta su calidad, sino que también compromete actividades humanas, como la agricultura, la pesca o el consumo directo, especialmente en contextos con infraestructura de saneamiento limitada. La creciente demanda de agua potable y la escasez hídrica global hacen necesario reutilizar este recurso mediante métodos más eficaces y sostenibles.

El proceso de Fenton es una tecnología de oxidación avanzada en la que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) reacciona en presencia de hierro para generar radicales hidroxilo (·OH), variedades altamente reactivas que pueden degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Lin *et al.*, 2025). Las reacciones principales incluyen la activación del peróxido (H_2O_2) por hierro ferroso (Fe^{2+}) para formar radicales, que oxidan compuestos complejos hasta su mineralización completa (dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas no tóxicas).

A diferencia de los tratamientos biológicos clásicos, los radicales (·OH) no dependen de la biodegradabilidad de los contaminantes, por lo que pueden atacar de manera no selectiva compuestos no biodegradables o tóxicos. Sin embargo, su aplicación tradicional presenta limitaciones técnicas, entre ellas la generación de lodos férricos y la necesidad de operar en condiciones ácidas (cercanas a 3, pH ≈ 3). Para superar estas restricciones, la investigación ha orientado esfuerzos hacia el sistema de Fenton heterogéneo, en el que el hierro se encuentra soportado en un material sólido, lo cual facilita su recuperación y reutilización. Esto provoca la necesidad de cambiar los catalizadores clásicos (homogéneos) por alternativas heterogéneas que sean económicamente viables y ambientalmente sostenibles, favoreciendo así la escalabilidad y la comercialización del proceso (Figura 1).

Figura 1. Tratamiento sostenible de aguas residuales con catalizadores Fenton basados en zeolitas



Fuente: Elaboración propia

LAS ZEOLITAS SON MINERALES NATURALES QUE SE USAN PARA TRATAR EL AGUA, PURIFICAR GASES Y COMO CATALIZADORES EN PROCESOS QUÍMICOS

Las zeolitas son minerales naturales formados por aluminio, silicio y oxígeno (aluminosilicatos), con estructura cristalina porosa y elevada área superficial. Se utilizan ampliamente para tratar el agua, purificar gases y como materiales catalizadores en procesos químicos (Breck, 1973; Tsitsishvili *et al*., 1993). México cuenta con importantes yacimientos de zeolitas, especialmente de clinoptilolita, localizados en regiones de origen volcánico como Oaxaca, Puebla, Hidalgo, Sonora, San Luis Potosí, Chihuahua, Durango y Tlaxcala (De la Rosa-Gómez *et al*., 2010; Novo-Fernández y Costafreda-Mustelier, 2018). Esta riqueza mineral representa una ventaja estratégica para el país, al ofrecer materia prima accesible y de bajo costo, con alto potencial para aplicaciones ambientales. Su aprovechamiento en el tratamiento de aguas residuales abre la puerta al desarrollo de tecnologías sostenibles, económicamente viables y con enfoque de innovación local, alineadas con las necesidades actuales de gestión hídrica y de economía circular.

Mediante procesos de intercambio iónico o de impregnación, el hierro puede incorporarse a la estructura de la zeolita (Thomas *et al*., 2021). De manera similar, también es posible incorporar otros metales activos con alta eficiencia catalítica y potencial en remediación ambiental, como zinc, cobre o manganeso, los cuales favorecen reacciones tipo Fenton y contribuyen a una degradación más eficiente de contaminantes orgánicos. En este sentido, se obtiene un catalizador Fenton basado en zeolita. La principal innovación de estos materiales radica en transformar el proceso Fenton homogéneo (hierro disuelto) en un sistema heterogéneo (hierro soportado). Este cambio ofrece diversas ventajas: reducción de la generación de lodos, disminución de la lixiviación del hierro, posibilidad de recuperar y reutilizar el catalizador, mayor estabilidad operativa, entre otras.

Investigaciones recientes han demostrado que las zeolitas modificadas con hierro pueden funcionar como catalizadores altamente eficaces en el proceso de Fenton para eliminar contaminantes en aguas residuales, como antibióticos, herbicidas e incluso genes asociados a la resistencia bacteriana (Tian *et al*., 2024; Changduang *et al*., 2025; Prieto-Laria *et al*., 2025) antibiotic-resistant bacteria (ARB). Estos materiales no solo permiten degradar compuestos difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales, sino que también reducen significativamente la toxicidad del agua tratada. Debido a su alta eficiencia, bajo costo, potencial de reutilización y capacidad de operar en un amplio rango de pH, se consolidan como una alternativa innovadora y sostenible para el tratamiento de diversas matrices de aguas residuales, pues los métodos convencionales no alcanzan a ser eficientes en la remoción de contaminantes persistentes.

Estos sistemas promueven la economía circular mediante la reutilización de materiales naturales y la regeneración de aguas residuales para su reincorporación en procesos productivos. De este modo, ayudan a mejorar la calidad del agua y a avanzar hacia sistemas de saneamiento más eficientes y accesibles. Al facilitar la reutilización del recurso hídrico, contribuyen directamente al cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento) promovido por las Naciones Unidas. De este modo, articulan la sostenibilidad ambiental, la eficiencia tecnológica y la gestión responsable del agua. El desafío actual consiste en escalar estos desarrollos del laboratorio a aplicaciones reales que actúen de manera efectiva al tratamiento y al saneamiento del agua.

Referencias

Alcántara Valladolid, Ana Elisa *et al.* (2026). "Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México", en *Geografía Aplicada*, vol. 2, núm. 1, pp. 112–135. <https://doi.org/10.36677/geografiaaplicada.v2i1.27556>.

Al-Khatib, Laila A. y AlHanaktah, AhmadM. (2025). "Wastewater treatment plant upgrade and its interlinkages with the sustainable development goals", en *Resources*, vol. 14, núm. 4. <https://doi.org/10.3390/resources14040062>.

Breck, Donald W. (1973). Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use. Wiley. 771 pp.

Changduang, Athitaya *et al.* (2025). "Application of heterogeneous Fenton-like reaction with modified zeolite for removal of antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and antibiotic-resistant genes from swine farm wastewater", en *Journal of Environmental Management*, vol. 384, p. 125486. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125486>.

De la Rosa-Gómez, Isaías, María Teresa Olguín y David Alcántara (2010). "Silver-modified mexican clinoptilolite-rich tuffs with various particle sizes as antimicrobial agents against escherichia coli silver-modified mexican clinoptilolite-rich tuffs with various particle sizes as antimicrobial agents against escherichia coli", en *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol. 54, núm. 3, pp. 139–142. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2010000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=en>.

Lin, Yimin *et al.* (2025). "The profound review of Fenton process: What's the next step?", en *Journal of Environmental Sciences*, vol. 147, pp. 114–130. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2023.10.005>.

Novo-Fernández, Rosa y Jorge Luis Costafreda-Mustelier (2018). "Las zeolitas naturales de Mexico", en *Las zeolitas naturales de Iberoamérica*, pp. 280–321. Available at: http://oa.upm.es/50786/.

Prieto-Laria, Paula *et al.* (2025). "From the lab to the river: Bimetallic clinoptilolite photocatalyst for antibiotic-resistant bacteria and emerging contaminants removal", en *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, núm. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116663>.

Thomas, Nishanth, Dionysios D. Dionysiou y Suresh C. Pillai (2021). "Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances", en *Journal of Hazardous Materials*, vol. 404, part B, p. 124082. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124082>.

Tian, Kian *et al.* (2024). "Fe-ZSM-5 zeolite catalyst for heterogeneous Fenton oxidation of 1,4-dioxane: effect of Si/Al ratios and contributions of reactive oxygen species", en *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, núm. 13, pp. 19738–19752. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32287-0>.

Tsitsishvili, G.V., T. G. Andronikashvili y G.N. Kirov (1993). *Natural zeolites* (Ellis Horwood Series in Inorganic Chemistry), 274 pp.

UNESCO (2023). Partnerships and cooperation for water | UN World Water Development Report. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en>.



Irvin Alejandro Valdés Franco es Licenciado en Ciencias Ambientales por la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la UAEMéx y Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental por el Tecnológico Nacional de México. Miembro activo del Capitulo Estudiantil Clúster Estado de México Región 1, perteneciente a la Sociedad Mexicana de Materiales. Actualmente estudia el Doctorado en Ciencias Ambientales en la Facultad de Química de la UAEMéx, en la línea de investigación e incidencia en tratamiento de aguas residuales industriales y control de la contaminación.



Elia Alejandra Teutli Sequeira es Doctora en Ciencias del Agua por la UAEMéx y SNII nivel 1. Forma parte del programa Cátedra-Secihti en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), adscrita a la UAEMéx. Su línea de investigación es el tratamiento de aguas residuales industriales y control de la contaminación.



Guadalupe Vázquez Mejía es Doctora en Ciencias del Agua por la UAEMéx. Es profesora-investigadora del IITCA. Colabora en los posgrados de Ciencias del Agua y de Ciencias Ambientales. Sus áreas de investigación son la remoción de contaminantes mediante técnicas de adsorción y la recuperación mediante procesos de oxidación avanzados.



Perla Tatiana Almazán Sánchez es Doctora en Ciencias del Agua por la UAEMéx y SNII nivel 1. Forma parte del programa Investigadoras e Investigadores por México de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), comisionada al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Ha realizado investigaciones encaminadas a la evaluación y mejoramiento de la calidad del agua y del suelo contaminado con compuestos orgánicos e inorgánicos, mediante la aplicación de tratamientos avanzados y sustentables, como los procesos de oxidación avanzada y la adsorción con materiales naturales y sintéticos con propiedades catalíticas y adsorbentes.