

## Hydrogels: advances and applications in biotechnology

## Hidrogeles: avances y aplicaciones en la biotecnología

### Autores:

Sevilla-Carrasco, Jaime David  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Docente  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Milagro – Ecuador



[jsevillac@unemi.edu.ec](mailto:jsevillac@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0001-5257-299X>

Guillen-Bonilla, Alex Edwin  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Docente  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Milagro – Ecuador



[aguillenb@unemi.edu.ec](mailto:aguillenb@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0009-0007-2989-0333>

Amaguay-Gómez, Ronny Fabian  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Técnico de Laboratorio  
DOTLA  
Milagro – Ecuador



[ramaguayg@unemi.edu.ec](mailto:ramaguayg@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0009-0002-6380-552X>

Fechas de recepción: 19-SEP-2025 aceptación: 06-NOV-2025 publicación: 30-DIC-2025



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>

## Resumen

La creciente demanda de materiales funcionales y sostenibles ha impulsado el desarrollo de hidrogeles inteligentes, redes poliméricas tridimensionales capaces de retener gran cantidad de agua y adaptarse a diversos estímulos ambientales. Estos materiales, caracterizados por su biocompatibilidad, alto contenido de agua y potencial biodegradabilidad, se sintetizan mediante diversas estrategias (reticulación química, física o mixta) que determinan sus propiedades estructurales finales y su funcionalidad. En esta revisión se abordan la clasificación y síntesis de hidrogeles (naturales, sintéticos e híbridos), así como sus propiedades estructurales y funcionales (capacidad de respuesta a estímulos ambientales como pH, temperatura o campos eléctricos, y mecanismos de liberación controlada). Además, se examinan sus aplicaciones biotecnológicas principales, incluyendo la agricultura (mejora de la retención de agua y nutrientes del suelo), la medicina (liberación controlada de fármacos, ingeniería de tejidos y medicina regenerativa) y la biotecnología ambiental (remediación y tratamiento de aguas). Se discuten los avances recientes en hidrogeles multifuncionales y nanocompuestos que posibilitan tecnologías emergentes como la bioimpresión 4D, y se destacan los desafíos actuales relacionados con la producción a escala, la sostenibilidad económica y los aspectos regulatorios (toxicidad de monómeros y ausencia de normativa estándar). Finalmente, se plantean perspectivas futuras, enfatizando la integración de nanotecnología, bioimpresión 3D y biosensores para mejorar el desempeño de los hidrogeles en aplicaciones biotecnológicas.

**Palabras clave:** Hidrogeles; Materiales inteligentes; Biocompatibilidad; Liberación controlada; Biotecnología.

## Abstract

The growing demand for functional and sustainable materials has driven the development of smart hydrogels, three-dimensional polymer networks capable of retaining large amounts of water and adapting to various environmental stimuli. These materials, characterized by their biocompatibility, high water content, and biodegradability potential, are synthesized using diverse strategies (chemical, physical, or mixed crosslinking) that determine their final structural properties and functionality. This review addresses the classification and synthesis of hydrogels (natural, synthetic, and hybrid), as well as their structural and functional properties (responsiveness to environmental stimuli such as pH, temperature, and electric fields, and controlled release mechanisms). Furthermore, it examines their main biotechnological applications, including agriculture (improving soil water and nutrient retention), medicine (controlled drug release, tissue engineering, and regenerative medicine), and environmental biotechnology (water remediation and treatment). This paper discusses recent advances in multifunctional hydrogels and nanocomposites that enable emerging technologies such as 4D bioprinting, and highlights current challenges related to large-scale production, economic sustainability, and regulatory aspects (monomer toxicity and the lack of standard regulations). Finally, it outlines future perspectives, emphasizing the integration of nanotechnology, 3D bioprinting, and biosensors to improve the performance of hydrogels in biotechnological applications.

**Keywords:** Hydrogels; Smart materials; Biocompatibility; Controlled release; Biotechnology.

## Introducción

La biotecnología ha impulsado el desarrollo de materiales inteligentes y sostenibles en diversos sectores productivos (Backx, 2021). En este contexto emergen los hidrogeles, redes poliméricas tridimensionales con elevada capacidad de retención de agua o fluidos biológicos que imitan los tejidos vivos (Ho et al., 2022). La alta hidratación de los hidrogeles y su biocompatibilidad inherente los hacen especialmente adecuados para aplicaciones biomédicas (liberación controlada de fármacos, ingeniería de tejidos, medicina regenerativa (Majee, 2016). Además, los avances en la síntesis y funcionalización de hidrogeles han generado materiales “inteligentes” que responden a estímulos (pH, temperatura, luz), lo que permite modular la liberación de compuestos y usar hidrogeles como biosensores (Lupu et al., 2023). Por otra parte, técnicas avanzadas de fabricación (por ejemplo, impresión 3D y polimerización por dos fotones) han permitido crear estructuras de hidrogel tridimensionales precisas, empleables como andamios celulares (Ciuciu y Cywiński, 2014). En suma, estas características hacen de los hidrogeles una herramienta versátil y prometedora en la biotecnología actual.

La investigación sobre hidrogeles ha evolucionado de manera interdisciplinaria, integrando conocimientos de química, ingeniería, biotecnología y ciencias de materiales. Este enfoque transversal ha permitido pasar de hidrogeles convencionales con propiedades pasivas a materiales inteligentes con comportamiento dinámico y multifuncional. Su desarrollo se ha visto impulsado por la necesidad de crear sistemas capaces de responder de forma controlada a estímulos externos y mantener la compatibilidad con entornos biológicos complejos (Singh, 2017; Melia et al., 2021). El uso de técnicas como la informática de materiales, la ciencia de datos y la inteligencia artificial ha facilitado el diseño racional de hidrogeles con propiedades predictibles y reproducibles, optimizando su desempeño en entornos biomédicos, agrícolas o ambientales. Esta integración tecnológica ha marcado un punto de inflexión en la biotecnología contemporánea, permitiendo acelerar la experimentación y mejorar la precisión en la caracterización de materiales poliméricos. Por ello, los hidrogeles no solo representan un avance en el campo de los biomateriales, sino también una herramienta clave para desarrollar soluciones sostenibles e innovadoras que respondan a los desafíos globales de salud, medio ambiente y producción eficiente de recursos.

El crecimiento sostenido de publicaciones científicas sobre hidrogeles refleja el interés mundial en sus aplicaciones y su potencial para redefinir la relación entre la biotecnología y la sostenibilidad. No obstante, a pesar de los avances logrados, persisten desafíos en la comprensión de sus propiedades fisicoquímicas, en la estandarización de sus procesos de síntesis y en la evaluación de su impacto ambiental (Baykara, 2019; Li et al., 2021). En este sentido, la presente revisión bibliográfica tiene como propósito integrar la información científica más relevante sobre la clasificación, síntesis, propiedades y aplicaciones de los

hidrogeles, con especial énfasis en su papel dentro de los sistemas biotecnológicos sostenibles. Al reunir evidencias recientes y contrastarlas con los desarrollos históricos, esta revisión busca ofrecer una visión global del progreso técnico y científico alcanzado, identificando al mismo tiempo las brechas de conocimiento que limitan su adopción a gran escala. Asimismo, pretende destacar la importancia de los hidrogeles como materiales clave en la transición hacia una biotecnología circular y responsable, orientada al diseño de soluciones que contribuyan simultáneamente al bienestar humano y a la preservación ambiental.

### **Clasificación y síntesis de hidrogeles**

Los hidrogeles pueden clasificarse según su origen en naturales, sintéticos e híbridos. Los hidrogeles naturales, derivados de biopolímeros como el colágeno o la quitina, son altamente biocompatibles e imitan la matriz extracelular, lo que los hace ideales para aplicaciones de ingeniería tisular (Sánchez-Cid et al., 2021). No obstante, presentan limitaciones en resistencia mecánica y estabilidad térmica, aspectos que pueden mejorarse combinándolos con componentes sintéticos. Los hidrogeles sintéticos, elaborados a partir de polímeros diseñados, ofrecen propiedades mecánicas y químicas ajustables que permiten un control preciso de su estructura y función. Esto los hace adecuados para aplicaciones que requieren gran estabilidad y resistencia específica, como sistemas de liberación de fármacos y robótica blanda (Bercea, 2022).

Los hidrogeles híbridos integran los polímeros naturales y sintéticos para combinar las ventajas de ambos: mejoran la biocompatibilidad (gracias a los componentes naturales) y aumentan las propiedades mecánicas y térmicas (por los sintéticos). Estos materiales combinados son especialmente prometedores en aplicaciones biomédicas, como apósitos para heridas e ingeniería de tejidos, donde debe proporcionarse soporte estructural junto con actividad biológica (Vasile et al., 2020).

En cuanto a la síntesis, los hidrogeles con propiedades específicas se obtienen mediante métodos adaptados a su uso previsto. Por ejemplo, los hidrogeles superabsorbentes (SAH) se preparan frecuentemente a partir de polisacáridos (algas, celulosa, almidón) debido a su alta hidrofiliidad y biocompatibilidad; su capacidad de absorción hídrica se modula según los monómeros hidrófilos elegidos, el grado de reticulación y la porosidad de la red (Rather et al., 2022). Para aplicaciones en ingeniería de tejidos, se emplean estrategias de reticulación química, física o enzimática y materiales híbridos, lo que permite personalizar las propiedades mecánicas y de biodegradación del hidrogel según el tejido objetivo (Jiang et al., 2021). Asimismo, los hidrogeles de doble red (por ejemplo, una combinación de ácido poliacrílico y alginato de sodio) se refuerzan mediante reticulación iónica y nanopartículas de sílice, obteniendo materiales con gran flexibilidad y tenacidad (Fan et al., 2022).

Otros hidrogeles reticulados covalentemente, por ejemplo, basados en sulfato de celulosa oxidado y quitosano carboximetilado, se sintetizan ajustando densidad de reticulación y peso

molecular, controlando así su módulo elástico (Strätz y Fischer, 2020). Finalmente, los hidrogeles nanocompuestos se obtienen combinando polímeros con nanocelulosa (por ejemplo, poli(metil vinil éter-co-maleico) reticulado con celulosa nanofibrilada), lo cual aumenta notablemente la absorción de agua, la resistencia mecánica y la estabilidad térmica (Nair et al., 2014). Estas estrategias diversas permiten diseñar hidrogeles a medida, adaptando sus propiedades finales (absorción, resistencia, biodegradabilidad) a necesidades específicas en biomedicina, agricultura y gestión ambiental.

### Propiedades estructurales y funcionales

Los hidrogeles poseen características fisicoquímicas únicas que les permiten retener grandes cantidades de agua y responder a estímulos. Su red hidrofílica puede absorber más del 90% de agua en peso manteniendo la forma gelificada (Sood et al., 2016). Además, esta red dinámica responde a factores externos (pH, temperatura, campos eléctricos o magnéticos, luz), experimentando transiciones reversibles entre gel y sol (Bordbar-Khiabani y Gasik, 2022). Por ejemplo, perlas de hidrogel de quitosano con microalgas *Chlorella* han demostrado mayor estabilidad mecánica y sensibilidad al pH y la temperatura, lo que permite regular la absorción de agua y la liberación de compuestos activos (Li et al., 2022).

La modificación química de la red (funcionalización) o la incorporación de rellenos biológicos y nanopartículas refuerza aún más estas respuestas dinámicas y mejora las propiedades mecánicas del hidrogel, ampliando sus posibles aplicaciones en administración de fármacos y biosensores (Willner, 2017; Li et al., 2022).

Por otro lado, la biocompatibilidad, la degradabilidad y el rendimiento mecánico de los hidrogeles dependen en gran medida del pH, la temperatura y la composición polimérica. Los hidrogeles sensibles al pH pueden degradarse o hincharse según el entorno: por ejemplo, hidrogeles de poliglicerol reticulados con ácido oxálico liberan fármacos de forma más eficaz a pH neutro que en medio ácido (de Campos et al., 2023). La temperatura corporal puede inducir transiciones sol-gel en hidrogeles termosensibles, mejorando su aplicabilidad en administración médica e ingeniería tisular (Lin et al., 2022).

La combinación de polímeros (como colágeno y quitosano) puede reforzar las propiedades térmicas y mecánicas del hidrogel, aumentando la integridad estructural y la viabilidad celular en tejidos implantados (Sánchez-Cid et al., 2021). Asimismo, la inclusión de nanomateriales reticulantes incrementa la resistencia mecánica del hidrogel, esencial en aplicaciones que requieren materiales robustos (Wang et al., 2023).

En general, la composición polimérica (naturales vs. sintéticos) permite modular las propiedades biofísicas y bioquímicas del hidrogel, lo que influye en la interacción celular y promueve la regeneración tisular adecuada (Li et al., 2018). Los hidrogeles sensibles a estímulos tienen un gran potencial en biodetección, administración dirigida de fármacos e

ingeniería de tejidos, pues pueden imitar la matriz extracelular y adaptarse dinámicamente a las condiciones fisiológicas (Serna et al., 2021).

### **Aplicaciones biotecnológicas**

Los hidrogeles han demostrado un impacto significativo en múltiples campos biotecnológicos. En el sector agrícola, los hidrogeles superabsorbentes basados en polisacáridos naturales mejoran la retención de agua y nutrientes en el suelo, optimizando la producción de cultivos en condiciones áridas (Sahmat et al., 2022). Estos hidrogeles, frecuentemente obtenidos de residuos agrícolas, ofrecen soluciones ecológicas de bajo costo para la conservación del agua y la mejora del rendimiento de los suelos.

En medicina, los hidrogeles se emplean ampliamente en sistemas de liberación controlada de fármacos y en la ingeniería de tejidos gracias a su alto contenido de agua y biocompatibilidad (Chen et al., 2019; Ho et al., 2022). Se utilizan para transportar fármacos, péptidos o células a sitios específicos, regenerar tejidos dañados y mejorar la integración de implantes biomédicos, lo cual ha demostrado mejorar la eficacia terapéutica (por ejemplo, en la reparación ósea) (Correa et al., 2021). Avances recientes, como hidrogeles nanocompuestos o sensibles a estímulos, han superado limitaciones como la baja integridad mecánica, permitiendo hidrogeles que cicatrizan heridas con liberación de agentes antimicrobianos o hidrogeles inteligentes para entrega dirigida de medicamentos (Barrett-Catton et al., 2021; Tipa et al., 2022).

En el ámbito ambiental e industrial, los hidrogeles también son herramientas valiosas. Se han desarrollado hidrogeles basados en gelatina para la remediación de agua, capaces de adsorber contaminantes de ríos y efluentes de manera biodegradable y no tóxica (Andreazza et al., 2023). Asimismo, existen hidrogeles sensibles al pH para la captura y liberación controlada de gases contaminantes en tratamientos de aguas residuales industriales (Zhou et al., 2023).

En la industria textil y de procesamiento, los hidrogeles se utilizan para eliminar colorantes y iones nocivos de efluentes, mostrando excelente capacidad de adsorción de contaminantes iónicos y orgánicos presentes en aguas residuales (Flores-Valenzuela et al., 2023). Además, se han diseñado hidrogeles de doble red y nanocompuestos reforzados que resisten condiciones ambientales extremas, ampliando su uso a sensores inteligentes y captadores de iones en procesos industriales (Ning et al., 2022). En conjunto, la adaptabilidad y multifuncionalidad de los hidrogeles, junto con las mejoras continuas en nanocompuestos, los consolidan como materiales indispensables para avanzar en aplicaciones agrícolas, médicas y ambientales (Correa et al., 2021; Kundu et al., 2022).

### **Desafíos actuales**



A pesar de los avances, la producción y aplicación de hidrogeles a escala enfrenta desafíos técnicos, económicos y ambientales. Desde el punto de vista técnico, la síntesis de hidrogeles debe optimizarse para garantizar propiedades mecánicas robustas, biocompatibilidad y biodegradación controlada (Almawash et al., 2022). El traslado de técnicas avanzadas (impresión 3D, bioimpresión, electrospinning) del laboratorio a entornos clínicos es lento debido a su complejidad: fabricar estructuras precisas y cargar células simultáneamente sigue siendo un reto (Xu et al., 2022). Además, la integridad mecánica de muchos hidrogeles sigue siendo insuficiente para aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad (Chen et al., 2019).

En el aspecto económico, los altos costos de materias primas avanzadas y equipos especializados complican la producción a gran escala (Elangwe et al., 2023). En términos ambientales, aunque se prioriza el uso de biopolímeros, su extracción puede consumir muchos recursos y no siempre es sostenible (Trombino et al., 2023); asimismo, la eliminación de hidrogeles no biodegradables puede generar impactos ecológicos a largo plazo (El Sayed, 2023).

Otro grupo de limitaciones se relaciona con la seguridad y la regulación. Se ha comprobado que ciertos monómeros sintéticos (como el metacrilato de 2-hidroxietilo) pueden inducir citotoxicidad y efectos genotóxicos a concentraciones elevadas (Lee et al., 2022). La falta de normativas globales exhaustivas agrava estos riesgos: por ejemplo, trazas de elementos peligrosos (arsénico, cadmio) presentes en algunos hidrogeles podrían ser aceptables en una región y prohibidas en otra (García-Villén et al., 2020). Además, la ausencia de métodos estandarizados para evaluar la liberación de fármacos dificulta la comparación de resultados y la regulación sanitaria (Vigata et al., 2020).

La industrialización de tecnologías innovadoras de hidrogeles requiere abordar el escalado y cumplir requisitos regulatorios (biocompatibilidad, seguridad), procesos que aún no están totalmente definidos (Alonso et al., 2021). Como alternativa más segura, se propone el uso de agentes reticulantes naturales que podrían mejorar la biocompatibilidad y reducir el impacto ambiental de los hidrogeles frente a sus homólogos sintéticos (Sapula et al., 2023). En conjunto, estos desafíos destacan la urgencia de investigar procesos de síntesis sostenibles, reducir costos y establecer estándares de seguridad para habilitar el uso generalizado de hidrogeles.

### **Perspectivas futuras**

Las innovaciones tecnológicas abren vías para hidrogeles cada vez más inteligentes y multifuncionales. La incorporación de nanopartículas en la matriz de hidrogel mejora sus propiedades físico-químicas, permitiendo aplicaciones avanzadas en ingeniería tisular, administración de fármacos y dispositivos biocompatibles (Barrett-Catton et al., 2021). El

ensamblaje anisotrópico de nanofibras (por ejemplo, aramida) en hidrogeles imita las estructuras tendinosas naturales, lo que aporta gran resistencia mecánica e integra componentes bioelectrónicos para la detección fisiológica (Sun et al., 2023). Además, surgen hidrogeles sensibles a estímulos (temperatura, pH) que cambian su comportamiento en respuesta a factores externos, lo que amplía su uso en aplicaciones biomédicas avanzadas, incluida la bioimpresión 4D, capaz de generar estructuras que cambian de forma ante estímulos definidos (Malekmohammadi et al., 2021).

Los hidrogeles supramoleculares, basados en interacciones no covalentes dinámicas, ofrecen propiedades autorreparadoras y reversibles, haciéndolos prometedores para sistemas de liberación de fármacos y bioprinters tridimensionales (Omar et al., 2022). Asimismo, se están desarrollando hidrogeles multifuncionales capaces de capturar, cultivar, eliminar y detectar bacterias, abordando infecciones y resistencia a antibióticos con una sola plataforma (Dsouza et al., 2022).

La convergencia de los hidrogeles con nanotecnología, impresión 3D y sensores avanzados puede reforzar los modelos de biotecnología circular y medicina regenerativa. Los hidrogeles basados en nanocelulosa brindan materiales renovables, biodegradables y mecánicamente robustos, ideales para aplicaciones regenerativas (Wang et al., 2021). La inclusión de nanogeles en la matriz de hidrogel permite estructuras jerárquicas análogas a la matriz extracelular, posibilitando la liberación localizada de moléculas bioactivas en cultivos celulares tridimensionales (Zu et al., 2021). La tecnología de impresión 3D proporciona control espacial preciso de células y materiales, facilitando la construcción de tejidos u órganos complejos y funcionales (Fang et al., 2023).

Esto abre la puerta a integrar biosensores en apósitos de hidrogel, monitoreando en tiempo real la cicatrización y liberando agentes terapéuticos (antibióticos, nanopartículas) según las necesidades del tejido (Tsegay et al., 2022).

De manera que, los hidrogeles conductores, con polímeros o nanopartículas eléctricamente activos, pueden servir como andamios que apoyan el crecimiento celular y actúan como biosensores al detectar biomoléculas relevantes, ampliando aún más su aplicación en medicina regenerativa (Xu et al., 2020). En conjunto, estas tecnologías crean plataformas sinérgicas que no solo impulsan los avances en medicina regenerativa, sino que también fomentan prácticas sostenibles en biotecnología circular mediante el uso de materiales renovables y terapias precisas.

## Conclusiones

Los hidrogeles son materiales clave en biotecnología, pues combinan inteligencia funcional y biocompatibilidad. Esta revisión resume avances en su síntesis, propiedades y aplicaciones, mostrando cómo sus estructuras pueden diseñarse para objetivos concretos. Se demostró que, mediante métodos diversos (reticulación química, redes de doble polímero, nanocompuestos, etc.), es posible obtener hidrogeles con alta absorción de agua, resistencia mecánica mejorada y respuesta a estímulos, adaptándolos a diferentes necesidades tecnológicas.

Se recalcó que propiedades como la porosidad y la capacidad de retener más del 90% de agua en su red tridimensional permiten a los hidrogeles simular la matriz extracelular, esencial en aplicaciones médicas. Además, la red polimérica dinámica responde a estímulos externos (pH, temperatura, campos eléctricos, luz), lo que habilita transiciones reversibles aprovechables en la liberación controlada de fármacos. La incorporación de grupos funcionales, biomoléculas o nanopartículas refuerza esta respuesta a estímulos y mejora sus propiedades mecánicas. Estas características hacen posible adaptar los hidrogeles a condiciones fisiológicas específicas y optimizar la entrega terapéutica en el lugar requerido. Se detallaron las diferencias entre hidrogeles naturales, sintéticos e híbridos y sus implicaciones prácticas.

Los hidrogeles naturales (basados en biopolímeros) son muy biocompatibles, pero mecánicamente débiles, mientras que los sintéticos ofrecen estabilidad y propiedades ajustables; los híbridos combinan ventajas de ambos para usos exigentes. También se revisaron los métodos de síntesis adaptados a cada fin: hidrogeles superabsorbentes de polisacáridos para mejorar la retención hídrica en suelos, hidrogeles de doble red reforzados para mayor tenacidad y nanocompuestos con nanocelulosa para incrementar la resistencia mecánica. Cada estrategia se relaciona con el uso deseado, personalizando los hidrogeles para aplicaciones específicas.

Se evidenció la versatilidad de los hidrogeles en aplicaciones clave. En agricultura, polímeros superabsorbentes mejoran la retención de agua y nutrientes en suelos secos, incrementando el rendimiento de los cultivos. En medicina, los hidrogeles se emplean para liberar fármacos de forma sostenida y como andamios en ingeniería de tejidos, aprovechando su similitud con tejidos biológicos para acelerar la regeneración. En el ámbito ambiental e industrial, se utilizan para adsorber contaminantes en aguas residuales y desarrollar sensores sostenibles. También se destacaron hidrogeles avanzados (nanocompuestos, con actividad antimicrobiana o sensibilidad programada) con funcionalidades ampliadas, prometiendo innovaciones en estas áreas.

No obstante, se identificaron desafíos importantes. Técnicamente, es urgente reforzar la integridad mecánica de los hidrogeles y desarrollar procesos de producción escalables (por ejemplo, bioimpresión) para aplicaciones clínicas e industriales. Económicamente, los elevados costos de materias primas avanzadas y procesos especializados limitan su viabilidad comercial. Además, se advirtió que la fabricación intensiva de biopolímeros puede exigir muchos recursos y que la eliminación de hidrogeles no biodegradables plantea riesgos ecológicos a largo plazo. Adicionalmente, la toxicidad potencial de ciertos monómeros sintéticos y la falta de normativas globales requieren el desarrollo de estándares y métodos de evaluación que garanticen la seguridad de estos materiales.

Finalmente, las perspectivas apuntan a hidrogeles más inteligentes y sostenibles. Se espera que la nanotecnología, los ensamblajes supramoleculares y la bioimpresión avanzada den lugar a hidrogeles autorreparables, con memoria de forma y funciones multifuncionales (por ejemplo, detección o eliminación de patógenos). Asimismo, la integración de hidrogeles con biosensores y materiales conductores podría generar dispositivos híbridos capaces de regenerar tejidos y monitorizar procesos biológicos en tiempo real. En conjunto, estas innovaciones ampliarían el potencial de los hidrogeles como plataformas clave en biomedicina, agricultura y medio ambiente. Su futuro éxito dependerá de superar los retos de escalado, costo y regulación para transformar estas tecnologías en soluciones reales.

### Referencias bibliográficas

- Almawash, S., Osman, S. K., Mustafa, G., & El Hamd, M. A. (2022). Current and Future Prospective of Injectable Hydrogels—Design Challenges and Limitations. *Pharmaceuticals*, 15(3), 371. <https://doi.org/10.3390/ph15030371>
- Alonso, J. M., Andrade del Olmo, J., Perez Gonzalez, R., & Saez-Martinez, V. (2021). Injectable Hydrogels: From Laboratory to Industrialization. *Polymers*, 13(4), 650. <https://doi.org/10.3390/polym13040650>
- Andreazza, R., Morales, A., Pieniz, S., & Labidi, J. (2023). Gelatin-Based Hydrogels: Potential Biomaterials for Remediation. *Polymers*, 15(4), 1026. <https://doi.org/10.3390/polym15041026>
- Backx, B. P. (2021). *Smart materials and Green Synthesis: The perfect match for the future*. 3(3), 7–11. <https://doi.org/10.34256/IRJMT2132>
- Barrett-Catton, E., Ross, M. L., & Asuri, P. (2021). Multifunctional Hydrogel Nanocomposites for Biomedical Applications. *Polymers*, 13(6), 856. <https://doi.org/10.3390/polym13060856>

Baykara, T. (2019). *Towards Autonomous and Intelligent Systems: The Role of Materials Science and Technology*. 9(4), 1025–1029. <https://doi.org/10.31031/RDMS.2019.09.000716>

Bercea, M. (2022). Bioinspired Hydrogels as Platforms for Life-Science Applications: Challenges and Opportunities. *Polymers*, 14(12), 2365. <https://doi.org/10.3390/polym14122365>

Bordbar-Khiabani, A., & Gasik, M. (2022). Smart Hydrogels for Advanced Drug Delivery Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3665. <https://doi.org/10.3390/ijms23073665>

Chen, G., Tang, W., Wang, X., Zhao, X., Chen, C., & Zhu, Z. (2019). Applications of Hydrogels with Special Physical Properties in Biomedicine. *Polymers*, 11(9), 1420. <https://doi.org/10.3390/polym11091420>

Ciuciu, A. I., & Cywiński, P. J. (2014). Two-photon polymerization of hydrogels—versatile solutions to fabricate well-defined 3D structures. *RSC Advances*, 4(85), 45504–45516. <https://doi.org/10.1039/C4RA06892K>

Correa, S., Grosskopf, A. K., Lopez Hernandez, H., Chan, D., Yu, A. C., Stapleton, L. M., & Appel, E. A. (2021). Translational Applications of Hydrogels. *Chemical Reviews*, 121(18), 11385–11457. <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.0C01177>

de Campos, B. A., da Silva, N. C. B., Moda, L. S., Vidinha, P., & Maia-Obi, L. P. (2023). pH-Sensitive Degradable Oxalic Acid Crosslinked Hyperbranched Polyglycerol Hydrogel for Controlled Drug Release. *Polymers*, 15(7), 1795. <https://doi.org/10.3390/polym15071795>

Dsouza, A., Constantinidou, C., Arvanitis, T. N., Haddleton, D. M., Charmet, J., & Hand, R. A. (2022). Multifunctional Composite Hydrogels for Bacterial Capture, Growth/Elimination, and Sensing Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(42), 47323–47344. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c08582>

El Sayed, M. M. (2023). Production of polymer hydrogel composites and their applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(7), 2855–2879. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02796-z>

Elangwe, C. N., Morozkina, S. N., Olekhovich, R. O., Polyakova, V. O., Krasichkov, A., Yablonskiy, P. K., & Uspenskaya, M. V. (2023). Pullulan-Based Hydrogels in Wound Healing and Skin Tissue Engineering Applications: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4962. <https://doi.org/10.3390/ijms24054962>

Fan, W., Jensen, L. R., Dong, Y., Deloria, A. J., Xing, B., Yu, D., & Smedskjaer, M. (2022). Highly Stretchable, Swelling-Resistant, Self-Healed, and Biocompatible Dual-Reinforced Double Polymer Network Hydrogels. *ACS Applied Bio Materials*, 6(1), 228–237. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00856>

Fang, W., Yang, M., Wang, L., Li, W., Liu, M., Jin, Y., ... & Fu, Q. (2023). Hydrogels for 3D bioprinting in tissue engineering and regenerative medicine: Current progress and challenges. *International journal of bioprinting*, 9(5), 759. <https://doi.org/10.18063/ijb.759>

Flores-Valenzuela, L. E., González-Fernández, J. V., & Carranza-Oropeza, M. V. (2023). Hydrogel Applicability for the Industrial Effluent Treatment: A Systematic Review and Bibliometric Analysis. *Polymers*, 15(11), 2417. <https://doi.org/10.3390/polym15112417>

García-Villén, F., Sánchez-Espejo, R., Borrego-Sánchez, A., Cerezo, P., Perioli, L., & Viseras, C. (2020). Safety of Nanoclay/Spring Water Hydrogels: Assessment and Mobility of Hazardous Elements. *Pharmaceutics*, 12(8), 764. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12080764>

Ho, T.-C., Chang, C.-C., Chan, H.-P., Chung, T.-W., Shu, C.-W., Chuang, K.-P., Duh, T.-H., Yang, M.-H., & Tyan, Y.-C. (2022). Hydrogels: Properties and Applications in Biomedicine. *Molecules*, 27(9), 2902. <https://doi.org/10.3390/molecules27092902>

Jiang, T., Yang, T., Bao, Q., Sun, W., Yang, M., & Mao, C. (2022). Construction of tissue-customized hydrogels from cross-linkable materials for effective tissue regeneration. *Journal of Materials Chemistry B*, 10(25), 4741–4758. <https://doi.org/10.1039/D1TB01935J>

Kundu, R., Mahada, P., Chhirang, B., & Das, B. (2022). Cellulose hydrogels: Green and sustainable soft biomaterials. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100252>

Lee, C.-Y., Ho, Y.-C., Lee, S.-S., Li, Y.-C., Lai, M.-Y., & Kuan, Y.-H. (2022). Cytotoxicity and Apoptotic Mechanism of 2-Hydroxyethyl Methacrylate via Genotoxicity and the Mitochondrial-Dependent Intrinsic Caspase Pathway and Intracellular Reactive Oxygen Species Accumulation in Macrophages. *Polymers*, 14(16), 3378. <https://doi.org/10.3390/polym14163378>

Li, H., Wang, J., Luo, Y., Bai, B., & Cao, F. (2022). pH-Responsive Eco-Friendly Chitosan–Chlorella Hydrogel Beads for Water Retention and Controlled Release of Humic Acid. *Water*, 14(8), 1190. <https://doi.org/10.3390/w14081190>

Li, J., Vundrala, S. R., Jayathilaka, W. A. D. M., Chinnappan, A., Ramakrishna, S., & Ghosh, R. (2021). Intelligent Polymers, Fibers and Applications. *Polymers*, 13(9), 1427. <https://doi.org/10.3390/POLYM13091427>

Li, X., Sun, Q., Li, Q., Kawazoe, N., & Chen, G. (2018). Functional Hydrogels With Tunable Structures and Properties for Tissue Engineering Applications. *Frontiers in Chemistry*, 6, 499. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2018.00499>

Lin, F., Dimmitt, N., Perini, M. M. de L., Li, J., & Lin, C.-C. (2022). Injectable Acylhydrazone-Linked RAFT Polymer Hydrogels for Sustained Protein Release and Cell Encapsulation (Adv. Healthcare Mater. 7/2022). *Advanced Healthcare Materials*, 11(7), 2270035. <https://doi.org/10.1002/adhm.202270035>

Lupu, A., Gradinaru, L. M., Gradinaru, V. R., & Bercea, M. (2023). Diversity of Bioinspired Hydrogels: From Structure to Applications. *Gels*, 9(5), 376. <https://doi.org/10.3390/gels9050376>

Majee, S. B. (2016). *Introductory Chapter: An Overview of Hydrogels*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64302>

Malekmohammadi, S., Sedghi Aminabad, N., Sabzi, A., Zarebkohan, A., Razavi, M., Vosough, M., Bodaghi, M., & Maleki, H. (2021). Smart and Biomimetic 3D and 4D Printed Composite Hydrogels: Opportunities for Different Biomedical Applications. *Biomedicines*, 9(11), 1537. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9111537>

Melia, H. R., Muckley, E. S., & Saal, J. E. (2021). Materials informatics and sustainability—the case for urgency. *Data-Centric Engineering*, 2, e19. <https://doi.org/10.1017/DCE.2021.19>

Nair, S. S., Zhu, J., Deng, Y., & Ragauskas, A. J. (2014). Hydrogels Prepared from Cross-Linked Nanofibrillated Cellulose. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(4), 772–780. <https://doi.org/10.1021/SC400445T>

Ning, X., Huang, J., A, Y., Yuan, N., Chen, C., & Lin, D. (2022). Research Advances in Mechanical Properties and Applications of Dual Network Hydrogels. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 15757. <https://doi.org/10.3390/ijms232415757>

Omar, J., Ponsford, D., Dreiss, C. A., Lee, T. C., & Loh, X. J. (2022). Supramolecular hydrogels: Design strategies and contemporary biomedical applications. *Chemistry—An Asian Journal*, 17(9), e202200081. <https://doi.org/10.1002/asia.202200081>

Rather, R. A., Bhat, M. A., & Shalla, A. H. (2022). An insight into Synthetic, Physiological aspect of Superabsorbent Hydrogels based on Carbohydrate type polymers for various Applications: A Review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100202>

Sahmat, S. S., Rafii, M. Y., Oladosu, Y., Jusoh, M., Hakiman, M., & Mohidin, H. (2022). A Systematic Review of the Potential of a Dynamic Hydrogel as a Substrate for Sustainable Agriculture. *Horticulturae*, 8(11), 1026. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111026>

Sánchez-Cid, P., Jiménez-Rosado, M., Rubio-Valle, J. F., Romero, A., Ostos, F. J., Rafii-Idrissi Benhnia, M., & Perez-Puyana, V. (2022). Biocompatible and Thermoresistant Hydrogels Based on Collagen and Chitosan. *Polymers*, 14(2), 272. <https://doi.org/10.3390/polym14020272>

Sapula, P., Bialik-Was, K., & Malarz, K. (2023). Are Natural Compounds a Promising Alternative to Synthetic Cross-Linking Agents in the Preparation of Hydrogels? *Pharmaceutics*, 15(1), 253. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010253>

Serna, J. A., Rueda-Gensini, L., Céspedes-Valenzuela, D. N., Cifuentes, J., Cruz, J. C., & Muñoz-Camargo, C. (2021). Recent Advances on Stimuli-Responsive Hydrogels Based on Tissue-Derived ECMs and Their Components: Towards Improving Functionality for Tissue Engineering and Controlled Drug Delivery. *Polymers*, 13(19), 3263. <https://doi.org/10.3390/polym13193263>

Singh, S. (2017). Emerging Scope and Trends of Intelligent Materials for Humanity. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5(4), 805–813. <https://doi.org/10.22214/IJRASET.2017.4148>

Sood, N., Bhardwaj, A., Mehta, S., & Mehta, A. (2016). Stimuli-responsive hydrogels in drug delivery and tissue engineering. *Drug delivery*, 23(3), 748-770. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.940091>

Strätz, J., & Fischer, S. (2020). Tailored covalently cross-linked hydrogels based on oxidized cellulose sulfate and carboxymethyl chitosan by targeted adjustment of the storage modulus. *Cellulose*, 27(13), 7535–7542. <https://doi.org/10.1007/S10570-020-03279-3>

Sun, M., Li, H., Hou, Y., Huang, N., Xia, X., Zhu, H., ... & Xu, L. (2023). Multifunctional tendon-mimetic hydrogels. *Science Advances*, 9(7), eade6973. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade6973>

Tipa, C., Cidade, M. T., Borges, J. P., Costa, L. C., Silva, J. C., & Soares, P. I. P. (2022). Clay-Based Nanocomposite Hydrogels for Biomedical Applications: A Review. *Nanomaterials*, 12(19), 3308. <https://doi.org/10.3390/nano12193308>

Trombino, S., Sole, R., Di Gioia, M. L., Procopio, D., Curcio, F., & Cassano, R. (2023). Green Chemistry Principles for Nano- and Micro-Sized Hydrogel Synthesis. *Molecules*, 28(5), 2107. <https://doi.org/10.3390/molecules28052107>

Tsegay, F., Elsherif, M., & Butt, H. (2022). Smart 3D Printed Hydrogel Skin Wound Bandages: A Review. *Polymers*, 14(5), 1012. <https://doi.org/10.3390/polym14051012>

Vasile, C., Pamfil, D., Stoleru, E., & Baican, M. (2020). New Developments in Medical Applications of Hybrid Hydrogels Containing Natural Polymers. *Molecules*, 25(7), 1539. <https://doi.org/10.3390/molecules25071539>

Vigata, M., Meinert, C., Hutmacher, D. W., & Bock, N. (2020). Hydrogels as Drug Delivery Systems: A Review of Current Characterization and Evaluation Techniques. *Pharmaceutics*, 12(12), 1188. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12121188>

Wang, C., Bai, J., Tian, P., Xie, R., Duan, Z., Lv, Q., & Tao, Y. (2021). The application status of nanoscale cellulose-based hydrogels in tissue engineering and regenerative biomedicine. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 732513. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2021.732513>

Wang, Q., Zhang, Y., Ma, Y., Wang, M., & Pan, G. (2023). Nano-crosslinked dynamic hydrogels for biomedical applications. *Materials Today Bio*, 20, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100640>

Willner, I. (2017). Stimuli-Controlled Hydrogels and Their Applications. *Accounts of Chemical Research*, 50(4), 657–658. <https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.7B00142>

Xu, F., Dawson, C., Lamb, M., Mueller, E., Stefanek, E., Akbari, M., & Hoare, T. (2022). Hydrogels for tissue engineering: addressing key design needs toward clinical translation. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 849831. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.849831>

Xu, J., Tsai, Y.-L., & Hsu, S.-h. (2020). Design Strategies of Conductive Hydrogel for Biomedical Applications. *Molecules*, 25(22), 5296. <https://doi.org/10.3390/molecules25225296>

Zhou, X., Kandalai, S., Hossain, F., Zhang, N., Li, H., & Zheng, Q. (2023). pH-Responsive and Recyclable Hydrogels for Gas-Releasing and Scavenging. *Macromolecular Rapid Communications*, 44(8), e2300008. <https://doi.org/10.1002/marc.202300008>

Zu, G., Meijer, M., Mergel, O., Zhang, H., & van Rijn, P. (2021). 3D-Printable Hierarchical Nanogel-GelMA Composite Hydrogel System. *Polymers*, 13(15), 2508. <https://doi.org/10.3390/polym13152508>

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

**Financiamiento:**

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

**Agradecimiento:**

N/A

**Nota:**

El artículo no es producto de una publicación anterior.