

HIDROGELES DINÁMICOS: EXPLORANDO SUS PROPIEDADES Y SU TRANSFORMACIÓN EN LA CIENCIA MODERNA

DYNAMIC HYDROGELS: EXPLORING THEIR PROPERTIES
AND THEIR TRANSFORMATION IN MODERN SCIENCE

Rubí Estrada-Ramírez¹,
José Manuel Pérez-Aguilar²,
Valeria González-Coronel³,
Brenda L. Sánchez Gaytán¹,
Guillermo Soriano-Moro¹

¹Centro de Química-Instituto de Ciencias, BUAP

²Facultad de Ciencias Químicas, BUAP

³Facultad de Ingeniería Química, BUAP

Correos:

ing.estradamx@outlook.com

jmanuel.perez@correo.buap.mx

valeria.gonzalez@correo.buap.mx

brendale@correo.buap.mx

jesus.soriano@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0002-0895-432X>

<https://orcid.org/0000-0002-9893-5992>

<https://orcid.org/0000-0002-9670-8876>

<https://orcid.org/0000-0002-3595-1063>

<https://orcid.org/0000-0003-1889-9600>

FOLIO A11N104.25/1020

Resumen

En este artículo se presentan los pilares fundamentales de los hidrogeles, abarcando su clasificación, los polímeros constitutivos, las estrategias de síntesis, las tipologías emergentes, sus propiedades distintivas y sus aplicaciones innovadoras. Los hidrogeles pueden originarse a partir de monómeros o combinaciones híbridas de monómeros naturales y sintéticos. Su fabricación integra mecanismos de reticulación física, química o combinada, empleando rutas sintéticas diversas que incluyen el colado en solución, la mezcla homogénea de dispersiones, la polimerización en masa, la iniciación por radicales libres, la reticulación inducida por radiación y la generación de redes poliméricas interpenetradas. Los hidrogeles resultantes exhiben atributos sobresalientes, tales como tenacidad mecánica, biocompatibilidad, capacidad de hinchamiento y responsividad a estímulos externos, propiedades que los posicionan como candidatos idóneos para aplicaciones biomédicas avanzadas. El desarrollo de hidrogeles, permite optimizar características clave como la robustez mecánica, la adhesión interfacial, la elasticidad, la sensibilidad a la deformación, la capacidad de autoregeneración y la capacidad de hinchamiento determinantes para garantizar la fiabilidad y durabilidad para sus aplicaciones.

Palabras clave: hidrogeles, redes tridimensionales, polímeros naturales y sintéticos, síntesis de hidrogeles, clasificación de hidrogeles.

Abstract

This article presents the fundamental pillars of hydrogels, covering their classification, constituent polymers, synthesis strategies, emerging types, distinctive properties, and innovative applications. Hydrogels can be derived from monomers or hybrid combinations of natural and synthetic monomers. Their fabrication incorporates physical, chemical, or combined cross-linking mechanisms, employing diverse synthetic routes that include solution casting, homogeneous mixing of dispersions, bulk polymerization, free-radical initiation, radiation-induced cross-linking, and the generation of interpenetrating polymer networks. The resulting hydrogels exhibit outstanding attributes, such as mechanical toughness, biocompatibility, swelling capacity, and responsiveness to external stimuli, properties that position them as ideal candidates for advanced biomedical applications. The development of hydrogels enables the optimization of key characteristics such as mechanical robustness, interfacial adhesion, elasticity, strain sensitivity, self-healing capability, and swelling capacity—all of which are critical for ensuring the reliability and durability of their applications.

Keywords: hydrogels, 3D network, polymers natural and synthetic, synthesis of hydrogels, classification of hydrogels.

Los hidrogeles, redes poliméricas tridimensionales hidrofílicas formadas mediante polimerización y entrecruzamiento de monómeros (Figura 1), han incrementado significativamente su uso en los últimos años en diversos campos, como la ciencia de materiales, la agricultura y la ingeniería ambiental, por mencionar algunas. La versatilidad de los hidrogeles se debe principalmente a la amplia gama de composición química que pueden tener, ya que pueden ser obtenidos mediante monómeros sintéticos, (como la acrilamida y sus derivados), o naturales, (como polisacáridos o péptidos) e incluso combinaciones de ambos, lo que les proporciona características altamente modulables. En específico, la capacidad que tienen los hidrogeles de absorber grandes cantidades de agua (que puede ser hasta 10^3 veces su masa seca), su biocompatibilidad y viscoelasticidad semejante a la de los tejidos biológicos (Batoöl et al., 2022), los convierte en materiales muy útiles en el área biomédica. Aunado a esto, la incorporación dentro de la estructura del hidrogel de grupos funcionales que tienen algún tipo de respuesta a estímulos externos como pH, temperatura, luz o campo magnético, los pueden convertir en sistemas inteligentes que son muy versátiles para aplicaciones de alta precisión y permite adaptaciones dinámicas de los mismos (Estrada et al., 2023). En la Figura 1 se indica la red polimérica e interacciones importantes dentro de la red, como el enredo y la unión física que es de naturaleza no covalente, como enlaces de hidrógeno, fuerzas hidrofóbicas o interacciones iónicas. También, están presentes las interacciones químicas que se dan por enlaces covalentes. Por otra parte, está el tamaño de malla identificado con ξ y (M_c) es la masa molar del polímero entre los puntos de entrecruzamiento. Es decir, el peso molecular promedio de los segmentos de cadena polimérica que conectan dos puntos.

Avances recientes han elevado el potencial de los hidrogeles en numerosas aplicaciones. Por ejemplo, son utilizados para la preparación de nanocompuestos poliméricos con memoria de forma fotoinducida con nanopartículas de óxido de tungsteno

(WO2.9, donde el 2.9 indica una proporción específica de tungsteno y oxígeno dentro de la nanopartícula) curables por UV que se utilizan para impresión 4D de alta resolución y geometrías complejas mediante procesamiento digital de luz foto conmutable (Feng et al., 2024), mientras que hidrogeles conductores basados en grafeno son usados en aplicaciones biomédicas basadas en terapias fototérmicas, ya que facilitan la cicatrización de heridas y la regeneración ósea, además de ser de gran utilidad en la terapia contra el cáncer (Croitoru et al., 2024) ya que su capacidad de autorreparación y degradación programada abre nuevas posibilidades para implantes y sistemas de entrega de fármacos.

En agricultura, los hidrogeles biodegradables suelen utilizarse para el tratamiento de aguas residuales y suelos debido a que optimizan la retención hídrica y la liberación de nutrientes en suelos áridos, reduciendo el consumo de recursos hídricos en hasta un 40 % (Agbna & Zaidi, 2025). En biomedicina, su capacidad de autorreparación y degradación programada abre nuevas posibilidades para implantes y sistemas de entrega de fármacos.

El presente artículo analiza sus características, desde su síntesis hasta sus aplicaciones prácticas, destacando cómo la optimización de sus propiedades físico-químicas está redefiniendo la interacción entre materiales sintéticos con sistemas vivos. Para ello, se presentan ejemplos concretos y proyecciones basadas en las investigaciones más actuales, subrayando su relevancia en la ciencia contemporánea.

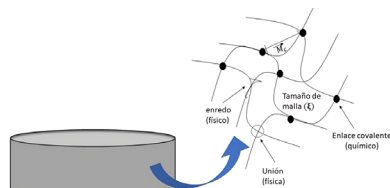


Figura 1. Representación de la estructura de un hidrogel.

Clasificación de hidrogeles

La categorización de los hidrogeles depende de un conjunto multifacético de atributos, que abarcan sus características fisicoquímicas, comportamiento de hinchamiento, metodología de síntesis, procedencia, distribución de carga iónica, materiales de origen, cinética de biodegradación y la naturaleza de su arquitectura de reticulación. Este marco de clasificación intrincado refleja los diversos perfiles estructurales y funcionales de los hidrogeles, permitiendo su aplicación personalizada en dominios avanzados de biomedicina, farmacéutica e ingeniería. Por lo tanto, los hidrogeles se pueden clasificar de diferente manera como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Clasificación de hidrogeles.

Los *hidrogeles estáticos*, se caracterizan por una reticulación covalente y presentan una estabilidad fisicoquímica bajo diversas condiciones como temperatura, pH, entre otras. Por el contrario, los *hidrogeles dinámicos* están diseñados para adaptarse a una amplia gama de estímulos externos —como el estrés mecánico, la deformación, gradientes térmicos, exposición fotónica, interacciones iónicas y campos magnéticos—, lo que resulta en funcionalidades avanzadas como la autorreparación, la modulación autónoma de forma o la actuación programable sin incurrir en un fallo estructural catastrófico. Por ejemplo, los hidrogeles dinámicos covalentes que incorporan enlaces con bases de Schiff han demostrado capacidad notable de autorreparación, destacando su potencial en aplicaciones de regeneración de tejidos (Guo et al., 2015). En otros trabajos, se ha evidenciado que la integración de glicerol o nanopartículas en redes de hidrogeles potencializa

la autorreparación y una adhesividad superior (Liu et al., 2023). Asimismo, la incorporación de complejos de metales ha permitido en los hidrogeles transformaciones morfológicas programables y controladas (Vijayavenkataraman et al., 2024), lo cual proyecta esfuerzos continuos para expandir aún más los límites en su diseño y aplicación.

Los hidrogeles estáticos y dinámicos se subclasifican según su capacidad de respuesta a estímulos externos, teniendo: i) físicos, tales como a temperatura o luz, ii) químicos, debidos a cambio en el pH o fuerza iónica y iii) biológicos, debido al efecto de enzimas. Los estímulos químicos y biológicos son de carácter interno, mientras que los físicos, salvo la temperatura, que puede ser tanto interna como externa, es de carácter externo. Dentro de esta diversidad, destacan los hidrogeles inteligentes con memoria de forma, caracterizados por: 1) una configuración permanente y 2) un código químico o físico que facilita la recuperación de su geometría original (Guo et al., 2015).

Otro tipo de clasificación que se mencionó en la Figura 2, se basa de acuerdo a su origen constitutivo, es decir, si son de origen natural (Figura 3), sintético (Figura 4) o híbridos, es decir a la unión de sintéticos y naturales. Aquellos derivados exclusivamente de polímeros naturales se denominan hidrogeles de matriz biopolimérica, abarcando polisacáridos, polinucleótidos y polipéptidos. Estos biopolímeros, obtenidos de fuentes naturales diversas, se clasifican en subgrupos de acuerdo a su perfil de carga, en neutros, catiónicos o aniónicos. De igual forma, su disponibilidad abundante, bajo costo, carácter no tóxico, biodegradabilidad inherente y propiedades biológicas ventajosas los convierten en materiales de interés destacado. Los progresos recientes en el diseño estructural y la optimización funcional durante las últimas décadas han catalizado un auge en el desarrollo de materiales avanzados para aplicaciones en tecnología biomédica (A et al., 2024).

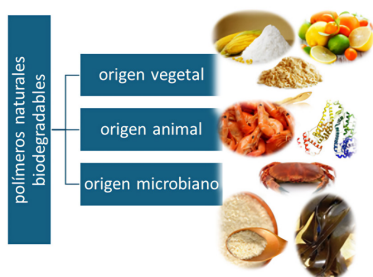


Figura 3. Clasificación de polímeros naturales.

Por otra parte, los polímeros sintéticos, destacan como materiales idóneos en la fabricación de hidrogeles debido a su capacidad para ofrecer propiedades fisicoquímicas ajustables, superando en este aspecto la versatilidad de sus contrapartes naturales. Estas macromoléculas pueden diseñarse con cadenas extendidas y masas moleculares elevadas, llegando a tener la posibilidad de controlar su arquitectura. No obstante, los hidrogeles derivados de polímeros sintéticos exhiben una bioactividad intrínsecamente inferior en comparación con los hidrogeles de origen natural, lo que representa una limitación en contextos biológicos. Su síntesis abarca diversas estrategias, incluyendo la polimerización de monómeros vinílicos o la reticulación química de cadenas previamente sintetizadas. Ejemplos de polímeros sintéticos empleados para este fin se encuentran el polialcohol vinílico (PVA), el polietilenglicol (PEG), el polioxido de etileno (PEO), el polimetacrilato de 2-hidroxietilo (PHEMA), el poliácido acrílico (PAA) y la poliacrilamida (PAM), entre otros (Jung et al., 2022).



Figura 4. Ejemplos de polímeros sintéticos.

Los hidrogeles derivados de poliacrilamida (PAM), por ejemplo, han sido extensamente desarrollados y aplicados en muchas áreas. Estos sistemas, caracterizados por su naturaleza hidrofílica y carga neutra, exhiben propiedades fisicoquímicas sobresalientes como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, por mencionar algunas, que los posicionan como materiales adecuados para su uso como: biomateriales, matrices para la inmovilización de células y biocatalizadores, plataformas de liberación controlada de fármacos, agentes de captura de iones metálicos pesados y herramientas de bioseparación (Wang et al., 2023)

Síntesis de hidrogeles

Los hidrogeles poliméricos se elaboran principalmente a través de dos enfoques ampliamente reconocidos: la polimerización de monómeros con alta afinidad por el agua o la transformación química de polímeros preexistentes, ya sean de origen natural, sintético o híbrido, un ejemplo de polímero híbrido es el elaborado con poliuretano y quitosano que se utiliza como apósito. En el caso de los hidrogeles naturales, su síntesis suele implicar la incorporación de elementos sintéticos sobre una base natural para optimizar sus propiedades (Sharma & Singh, 2024). La obtención de hidrogeles sintéticos, por su parte, se basa en la polimerización de radicales libres de monómeros vinílicos multifuncionales. Estos monómeros poseen dobles enlaces carbono-carbono que sirven como puntos de activación para la formación de cadenas poliméricas (Roy et al., 2022). La obtención de los hidrogeles poliméricos, depende de factores como el tipo de disolvente, las condiciones de reacción y los monómeros empleados, pudiendo llevarse a cabo por estímulos térmicos (mediante iniciadores térmicos), lumínicos (fotoiniciadores), enzimáticos (bioiniciadores) o incluso por radiación de haz de electrones (Morozov et al., 2024). Los hidrogeles típicamente están compuestos por tres elementos esenciales: monómeros, iniciadores y agentes de entrecruzamiento, los cuales pueden diluirse en agua o en otros disolventes para regular la liberación de calor durante el proceso. En términos

prácticos, los hidrogeles se obtienen frecuentemente a partir de monómeros polares, tanto naturales como sintéticos, mediante procesos como la polimerización por injerto, la reticulación química, la formación de redes en medios acuosos o la reticulación inducida por radiación. La formación de hidrogeles también implica la reticulación de polímeros hidrosolubles, naturales, sintéticos o híbridos, a través de diversos métodos: (1) unión química entre cadenas poliméricas, (2) generación de radicales libres en la estructura principal mediante radiación ionizante, para una formación de enlaces de reticulación, y (3) interacciones físicas, como fuerzas electrostáticas, entrelazamientos moleculares o la formación de regiones cristalinas (Sapula et al., 2023). A pesar de sus ventajas, un desafío en la preparación de hidrogeles radica en la presencia de impurezas residuales, tales como: monómeros que no reaccionaron, iniciadores, agentes de entrecruzamiento y subproductos, que pueden comprometer su pureza, funcionalidad, citocompatibilidad y biodegradabilidad.

Recientemente, en el grupo de investigación del Centro de Química del ICUAP de la BUAP se desarrolló la síntesis de nanocompuestos de nanopartículas de oro e hidrogeles de poli(acrilamida-co-DMAPMA) obtenidos por polimerización foto iniciada, usando luz solar, y en ausencia de agentes de entrecruzamiento (Estrada et al., 2023). Los hidrogeles resultantes presentaron diversas propiedades, una de ellas fue el porcentaje de hinchamiento de 2298 %, el cual es más alto que al de hidrogeles de PAM reportados en la literatura (Jayaramudu et al., 2019). Estas propiedades pueden ser moduladas por los monómeros utilizados y otros reactivos presentes en el proceso de síntesis. De igual forma, en el grupo de investigación se han sintetizado hidrogeles de PAM utilizando nanopartículas de oro (AuNPs) como agentes de entrecruzamiento. El proceso de síntesis es innovador, teniendo un enfoque de la síntesis verde, en la Figura 5 se muestra una sugerencia del mecanismo de reacción del material nanocompuesto (M. Aguilar et al., 2022).

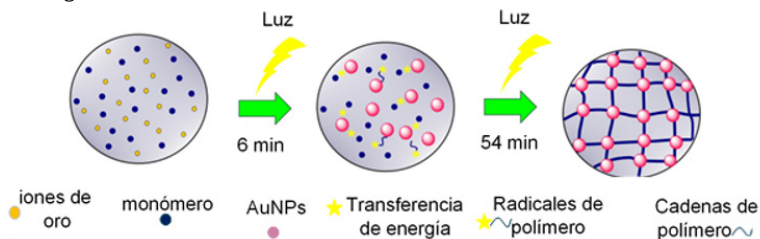


Figura 5. Representación del proceso de formación de hidrogeles (tomada de la referencia 18).

Propiedades de hidrogeles

La utilización de polímeros, ya sean de origen natural, sintético o híbrido, que tienen grupos laterales hidrofílicos en su estructura química, para la síntesis de hidrogeles destinados a aplicaciones biomédicas ofrece ventajas significativas. Estos grupos funcionales no solo promueven una elevada capacidad de absorción hídrica, sino que también favorecen interacciones específicas con tejidos biológicos, como epitelios y membranas mucosas. En su estado plenamente hinchado, los hidrogeles exhiben un comportamiento viscoelástico, con una textura blanda y elástica y un ángulo

interfacial reducido frente a fluidos biológicos, lo que minimiza la respuesta inmune. Estas características convergen en su notable biocompatibilidad, complementada por una degradabilidad variable que depende de la naturaleza del agente de entrecruzamiento empleado. Un atributo de los hidrogeles es su capacidad de hinchamiento (Figura 6), proceso que se desarrolla en tres etapas distintivas: (i) la difusión inicial de agua hacia la red polimérica, conocida como agua primaria ligada; (ii) la relajación de las cadenas poliméricas, acompañada de la incorporación de agua secundaria ligada; y (iii)

la expansión volumétrica de la malla, asociada a la entrada de agua libre. Según la teoría, este fenómeno se encuentra gobernada por la elasticidad intrínseca de las cadenas poliméricas y su afinidad con las moléculas de agua (Buenger et al., 2012).

Los hidrogeles reticulados covalentemente con grupos laterales iónicos muestran respuesta al pH. Aquellos con grupos aniónicos se expanden a pH elevado debido a la ionización y la subsiguiente repulsión electrostática, mientras que los portadores de grupos catiónicos lo hacen a pH bajo. Ahora, imagina materiales que se transforman como por arte de magia con el calor o el frío: los hidrogeles termosensibles son justo eso. Estos materiales gelatinosos, capaces de absorber agua, se dividen en tres grupos sorprendentes (J. Hu et al., 2023). Los termosensibles positivos se expanden cuando la temperatura supera la llamada temperatura crítica superior de solubilidad (UCST) (Kim et al., 2003), hinchándose como esponjas al calentarse, mientras que los termosensibles negativos hacen lo contrario, creciendo cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura crítica inferior de solubilidad (LCST). Además, están los hidrogeles térmicamente reversibles, como los hechos con poloxámero, que cambian de líquido a gel y viceversa según un umbral térmico específico, abriendo la puerta a innovaciones médicas y tecnológicas. Este comportamiento adaptable podría revolucionar desde la liberación controlada de medicamentos hasta la regeneración de tejidos (Wu et al., 2010).



Figura 6. Representación de xerogel (izquierda) e hidrogel hinchado (derecha).

Aplicaciones de hidrogeles

Los hidrogeles se pueden diseñar y modular para que su aplicación sea inyectable, por medio de atomización o implantable, abriendo un mundo de posibilidades en la medicina y la tecnología moderna. Para lograr estos modos de aplicación, es fundamental prestar atención a diversos aspectos del diseño, como la manufactura precisa de sus estructuras, la cinética de gelación que determina cuánto tiempo tarda en solidificarse una vez aplicado, las propiedades reológicas que garantizan su adaptabilidad y fluidez en el cuerpo, y la escalabilidad que asegura su producción a gran escala sin perder calidad. Otros factores, que juegan un papel clave son: la biocompatibilidad que permite su interacción segura con los tejidos vivos, la esterilidad para evitar infecciones y la capacidad de personalización según las necesidades del paciente (Correa et al., 2021).

Las aplicaciones más conocidas en el área de la biomedicina para el uso de los hidrogeles son la liberación controlada de fármacos, donde actúan como reservorios que dosifican medicamentos lentamente, como un reloj biológico interno; los apósitos para heridas, que crean un entorno húmedo ideal para acelerar la cicatrización, protegiendo al mismo tiempo contra bacterias; y la regeneración de tejidos, donde sirven como andamios que guían el crecimiento de nuevas células, como un puente para la naturaleza (Y. Hu et al., 2018; Iresha & Kobayashi, 2020; Kwiecień & Kwiecień, 2018). Pero sus usos van más allá: en el mundo de los cosméticos, los hidrogeles hidratan la piel con fórmulas ligeras que imitan sus capas naturales, mientras que en la agricultura podrían retener agua en suelos áridos como esponjas vivas, y en la ingeniería ambiental podrían capturar contaminantes del agua como filtros inteligentes. Este abanico de posibilidades transforma a los hidrogeles en herramientas innovadoras que, con cada nuevo diseño, prometen mejorar la vida cotidiana y enfrentar desafíos globales con creatividad y sostenibilidad.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la VIEP-BUAP por el financiamiento otorgado a través de los proyectos 00364 y 00611 así como a la SECIHTI por la beca de doctorado otorgada a R.E.-R. (núm. 1147935).

- Agbna, G. H. D., & Zaidi, S. J. (2025). Hydrogel Performance in Boosting Plant Resilience to Water Stress—A Review. *Gels*, 11(4), 276. <https://doi.org/10.3390/gels11040276>
- A, H., Sofini, S. P. S., Balasubramanian, D., Girigoswami, A., & Girigoswami, K. (2024). Biomedical applications of natural and synthetic polymer based nanocomposites. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 35(2), 269–294. <https://doi.org/10.1080/09205063.2023.2283910>
- Batool, Z., Muhammad, G., Iqbal, M. M., Aslam, M. S., Raza, M. A., Sajjad, N., Abdullah, M., Akhtar, N., Syed, A., Elgorban, A. M., Al-Rejaie, S. S., & Shafiq, Z. (2022). Hydrogel assisted synthesis of gold nanoparticles with enhanced microbicidal and in vivo wound healing potential. *Scientific Reports*, 12(1), 6575. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10495-3>
- Buenger, D., Topuz, F., & Groll, J. (2012). Hydrogels in sensing applications. *Progress in Polymer Science*, 37(12), 1678–1719. <https://doi.org/10.1016/j.propolymsci.2012.09.001>
- 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>
- Croitoru, A.-M., Fikai, D., & Fikai, A. (2024). Novel Photothermal Graphene-Based Hydrogels in Biomedical Applications. *Polymers*, 16(8), 1098. <https://doi.org/10.3390/polym16081098>
- Estrada, R., Soriano, J. G., & Sánchez, B. Leonor. (2023). “Síntesis de materiales nanocompuestos con nanopartículas de oro y copolímeros de acrilamida”. BUAP.
- Feng, S., Peng, X., Cui, J., Feng, R., Sun, Y., Guo, Y., Lu, Z., Gao, W., Liu, F., Liang, C., Hu, G., & Zhang, B. (2024). Photo Switchable 4D Printing Remotely Controlled Responsive and Mimetic Deformation Shape Memory Polymer Nanocomposites. *Advanced Functional Materials*, 34(28). <https://doi.org/10.1002/adfm.202401431>

- Guo, W., Lu, C., Orbach, R., Wang, F., Qi, X., Cecconello, A., Seliktar, D., & Willner, I. (2015). pH-Stimulated DNA Hydrogels Exhibiting Shape Memory Properties. *Advanced Materials*, 27(1), 73–78. <https://doi.org/10.1002/adma.201403702>
- Hu, J., Liu, X., Gao, Q., Ouyang, C., Zheng, K., & Shan, X. (2023). Thermosensitive PNIPAM-Based Hydrogel Cross-linked by Composite Nanoparticles as Rapid Wound-Healing Dressings. *Biomacromolecules*, 24(3), 1345–1354. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01380>
- Hu, Y., Zhang, Z., Li, Y., Ding, X., Li, D., Shen, C., & Xu, F. (2018). Dual-Crosslinked Amorphous Polysaccharide Hydrogels Based on Chitosan/Alginate for Wound Healing Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 39(20). <https://doi.org/10.1002/marc.201800069>
- Iresha, H., & Kobayashi, T. (2020). Smart Polysaccharide Hydrogels in Drug Delivery and Release (pp. 135–149). https://doi.org/10.1007/978-3-030-46923-8_6
- Jayaramudu, T., Ko, H.-U., Kim, H. C., Kim, J. W., & Kim, J. (2019). Swelling Behavior of Polyacrylamide–Cellulose Nanocrystal Hydrogels: Swelling Kinetics, Temperature, and pH Effects. *Materials*, 12(13), 2080. <https://doi.org/10.3390/ma12132080>
- Jung, K., Corrigan, N., Wong, E. H. H., & Boyer, C. (2022). Bioactive Synthetic Polymers. *Advanced Materials*, 34(2). <https://doi.org/10.1002/adma.202105063>
- Kim, S. J., Lee, K. J., Kim, I. Y., & Kim, S. I. (2003). Swelling Kinetics of Interpenetrating Polymer Hydrogels Composed of Poly(Vinyl Alcohol)/Chitosan. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 40(5), 501–510. <https://doi.org/10.1081/MA-120019888>
- Kwiecień, I., & Kwiecień, M. (2018). Application of Polysaccharide-Based Hydrogels as Probiotic Delivery Systems. *Gels*, 4(2), 47. <https://doi.org/10.3390/gels4020047>
- Liu, D., Huyan, C., Wang, Z., Guo, Z., Zhang, X., Torun, H., Mulvihill, D., Xu, B. Bin, & Chen, F. (2023). Conductive polymer based hydrogels and their application in wearable sensors: a review. *Materials Horizons*, 10(8), 2800–2823. <https://doi.org/10.1039/D3MH00056G>

- M. Aguilar, N., Perez-Aguilar, J. M., González-Coronel, V. J., Martínez-Gutiérrez, H., Zayas Pérez, T., Soriano-Moro, G., & Sanchez-Gaytan, B. L. (2022). Hydrolyzed Polyacrylamide as an In Situ Assistant in the Nucleation and Growth of Gold Nanoparticles. *Materials*, 15(23), 8557. <https://doi.org/10.3390/ma15238557>
- Morozov, Y. M., Wiesner (née Diehl), F., Grün, J. J., Pertiller, M., Fossati, S., Schmidt, K., Quilis, N. G., Gusenbauer, C., Zbiral, B., Toca-Herrera, J. L., Klees, S., Thiagarajan, C. R. V., Jonas, U., & Dostalek, J. (2024). Microstructuring of Thermoresponsive Biofunctional Hydrogels by Multiphoton Photocrosslinking. *Advanced Functional Materials*, 34(26). <https://doi.org/10.1002/adfm.202315578>
- Roy, A., Manna, K., & Pal, S. (2022). Recent advances in various stimuli-responsive hydrogels: from synthetic designs to emerging healthcare applications. *Materials Chemistry Frontiers*, 6(17), 2338–2385. <https://doi.org/10.1039/D2QM00469K>
- 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>
- Sharma, P., & Singh, B. (2024). Preparation and drug delivery of hydrogels based on grafting of methacrylamide (MAAm) / vinylsulphonic acid (VSA) co monomers onto psyllium. *Hybrid Advances*, 6, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100224>
- Vijayavenkataraman, S., Vialli, N., Y. H. Fuh, J., & Lu, W. F. (2024). Conductive collagen/polypyrrole-b-polycaprolactone hydrogel for bioprinting of neural tissue constructs. *International Journal of Bioprinting*, 5(1), 229. <https://doi.org/10.18063/ijb.v5i2.1.229>
- Wang, Y., Nian, G., Kim, J., & Suo, Z. (2023). Polyacrylamide hydrogels. VI. Synthesis-property relation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 170, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105099>
- Wu, C.-J., Gaharwar, A. K., Schexnailder, P. J., & Schmidt, G. (2010). Development of Biomedical Polymer-Silicate Nanocomposites: A Materials Science Perspective. *Materials*, 3(5), 2986–3005. <https://doi.org/10.3390/ma3052986>