

## Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

### **Evaluación de Hidrogeles Basados en Polisacáridos y Ácido Húmico como Sustrato para la Germinación de Sorgo**

### **Evaluation of Hydrogels Based on Polysaccharides and Humic Acid as a Substrate for Sorghum Germination**

Authors/Autores: Torres-Figueroa, A.V., de los Santos-Villalobos, S., Ochoa-Meza, A., del Castillo-Castro, T., Pérez-Martínez, C.J.

ID: e2151

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2151>

Received/Fecha de recepción: January 12<sup>th</sup> 2026

Accepted /Fecha de aceptación: July 03<sup>th</sup> 2026

Available online/Fecha de publicación: September 03<sup>th</sup> 2026

*Please cite this article as/Como citar este artículo:* Torres-Figueroa, A.V., de los Santos-Villalobos, S., Ochoa-Meza, A., del Castillo-Castro, T., Pérez-Martínez, C.J. (2026). Evaluation of Hydrogels Based on Polysaccharides and Humic Acid as a Substrate for Sorghum Germination. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2151. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2151>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo breve/ Short article

## Evaluación de Hidrogeles Basados en Polisacáridos y Ácido Húmico como Sustrato para la Germinación de Sorgo

## Evaluation of Hydrogels Based on Polysaccharides and Humic Acid as a Substrate for Sorghum Germination

Hidrogeles de polisacáridos para la germinación de sorgo /

Polysaccharide Hydrogels for Sorghum Germination

Torres-Figueroa, A.V.<sup>1\*</sup> ([ORCID: 0000-0002-6313-1679](#)), de los Santos-Villalobos, S.<sup>2</sup> ([ORCID: 0000-0003-2234-7147](#)), Ochoa-Meza, A.<sup>3</sup> ([ORCID: 0000-0001-9001-9861](#)) del Castillo-Castro, T.<sup>4</sup> ([ORCID: 0000-0001-7578-3124](#)), Pérez-Martínez, C.J.<sup>1</sup> ([ORCID: 0000-0001-7138-5268](#)).

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad de Sonora. Encinas y Rosales, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>2</sup>Laboratorio de Biotecnología del Recurso Microbiano, Departamento de Ciencias Agronómicas y Veterinarias. Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de Febrero 818 Sur, Colonia Centro, 85000, Cd. Obregón, Sonora, México.

<sup>3</sup>Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora, Carr. Bahía de Kino, Km. 21, 83323, Hermosillo, Sonora, México.

<sup>4</sup>Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales. Universidad de Sonora. Encinas y Rosales, 83000, Hermosillo, Sonora, México

### \*Corresponding Author:

Ana V. Torres-Figueroa. Departamento de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad de Sonora. Encinas y Rosales, 83000, Hermosillo, Sonora, México. Teléfono: (662) 760 0141. E-mail: [anavaleria.torres@unison.mx](mailto:anavaleria.torres@unison.mx)

### RESUMEN

La agricultura en zonas áridas, como el Valle del Yaqui, Sonora, se enfrenta a limitaciones en la disponibilidad de agua que afectan la germinación y el establecimiento temprano de los cultivos, por lo que se requieren alternativas que favorezcan estos procesos bajo condiciones de estrés hídrico. En este trabajo se evaluó la germinación de semillas de *Sorghum sp.* utilizando hidrogeles biodegradables elaborados a partir de polisacáridos naturales y ácido húmico (HA) como sustrato. Se analizaron cuatro formulaciones de hidrogel (G0, G12, GK0 y GK12), comparadas con un medio control (PDA), mediante la evaluación del porcentaje de germinación y parámetros biométricos como biomasa fresca y seca, así como contenido de clorofila. Todos los tratamientos con hidrogel alcanzaron una germinación del 100 %, superando al control (55 %). Además, las plántulas desarrolladas en hidrogeles mostraron mayor biomasa y contenido de clorofila. Los tratamientos G12 y GK12 presentaron el mejor desempeño en todas las variables evaluadas. En conjunto, los resultados indican que los hidrogeles basados en polisacáridos naturales, particularmente aquellos enriquecidos con HA, pueden emplearse como sustratos efectivos para la germinación de sorgo, con potencial aplicación en sistemas agrícolas de zonas áridas.

### PALABRAS CLAVE:

Hidrogeles biodegradables, Germinación de semillas, Sorgo (*Sorghum sp.*).

## ABSTRACT

Agriculture in arid regions, such as the Yaqui Valley in Sonora, faces water availability limitations that affect seed germination and early crop establishment; therefore, alternatives are needed to improve these processes under water-stressed conditions. In this study, the germination of *Sorghum sp.* seeds was evaluated using biodegradable hydrogels based on natural polysaccharides and humic acid (HA) as a substrate. Four hydrogel formulations (G0, G12, GK0, and GK12) were analyzed and compared with a control medium (PDA) by evaluating germination percentage and biometric parameters, including fresh and dry biomass and chlorophyll content. All hydrogel treatments reached 100 % germination, outperforming the control (55 %). In addition, seedlings grown on hydrogels showed higher biomass and chlorophyll content. Treatments G12 and GK12 exhibited the best performance across all evaluated variables. Overall, the results indicate that polysaccharide-based hydrogels, particularly those enriched with HA, can serve as effective substrates for sorghum germination and have potential applications in agricultural systems in arid regions.

## KEY WORDS:

Biodegradable hydrogels, Seed germination, Sorghum (*Sorghum sp.*).

## Introducción

El agua es uno de los factores más determinantes para la germinación y el establecimiento temprano de los cultivos, particularmente en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad hídrica es limitada y altamente variable. En estos ambientes, aun especies con tolerancia relativa a la sequía pueden presentar reducciones en la emergencia y en el vigor inicial cuando la semilla no dispone de un microambiente con humedad suficiente y estable. Esta problemática es especialmente relevante en el noroeste de México. El Valle del Yaqui, Sonora, constituye un sistema agrícola de gran importancia productiva, pero al mismo tiempo vulnerable a restricciones hídricas, salinización y otros procesos asociados al manejo intensivo del agua en una región semiárida. Estudios realizados en el Valle del Yaqui han subrayado que la agricultura irrigada en estas condiciones enfrenta riesgos por escasez de agua, estrés hídrico y deterioro de la calidad del recurso, lo que refuerza la necesidad de desarrollar estrategias que mejoren el establecimiento de los cultivos con un uso más eficiente del agua (Alkhalidi et al., 2023; Barats et al., 2025; Fischer et al., 2022).

En este contexto, los hidrogeles han sido considerados como materiales de interés para aplicaciones agrícolas. Los hidrogeles son redes poliméricas tridimensionales hidrofílicas capaces de absorber, retener y liberar agua gradualmente sin perder su integridad estructural. Esta propiedad les confiere un alto potencial como sustratos o acondicionadores para favorecer la disponibilidad de agua en la zona inmediata a la semilla durante la germinación. Revisiones recientes destacan que los hidrogeles pueden emplearse como sustratos de cultivo vegetal y que, en particular, los formulados a partir de polisacáridos presentan ventajas por su estabilidad y compatibilidad con sistemas biológicos (Azeem et al., 2023; Durpekova et al., 2022; Ma et al., 2023).

Actualmente, los productos superabsorbentes de uso comercial se basan en polímeros sintéticos, incluidos materiales derivados de ácido poliacrílico, poliacrilamida o matrices híbridas relacionadas (Adjuik et al., 2022). Aunque estos materiales pueden mejorar la retención de agua, su uso agrícola ha sido cuestionado por limitaciones asociadas con menor biodegradabilidad, dependencia de materias primas fósiles y preocupaciones sobre su persistencia ambiental (Adjuik et al., 2023). Por ello, existe un interés creciente en sustituir o complementar estos materiales con alternativas biodegradables obtenidas a partir de biopolímeros renovables.

Entre estas alternativas, los hidrogeles basados en polisacáridos naturales han recibido atención creciente debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad y origen renovable (Muhammad et al., 2025). Entre los polisacáridos utilizados para la formación de hidrogeles destacan la goma gellan (GG), también conocida como Phytigel, un polisacárido producido por bacterias y ampliamente utilizado en la industria biotecnológica por su capacidad para formar geles firmes y estables (Ma et al., 2023). Por su parte, la goma karaya (KG) proviene de la resina de un árbol y destaca por su utilidad como gelificante en cultivos de tejidos vegetales (Verma et al., 2021).

Además de su función como reservorios de agua, estos materiales pueden actuar como plataformas para incorporar compuestos bioactivos con efectos favorables sobre el crecimiento vegetal. En este sentido, el ácido húmico (HA) representa un componente de especial interés. Las sustancias húmicas han sido descritas como biostimulantes capaces de aumentar la productividad y la tolerancia al estrés abiótico. Además, puede mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes, modificar el metabolismo vegetal, estimular la arquitectura radical y favorecer procesos relacionados con fotosíntesis, crecimiento y respuesta antioxidante. La incorporación de HA en hidrogeles biodegradables podría generar un microambiente más favorable para la germinación y el crecimiento inicial (De Melo et al., 2016).

El sorgo (*Sorghum sp.*) es un cereal C4 ampliamente reconocido por su adaptación a ambientes áridos y semiáridos, su importancia como cultivo alimentario y forrajero, y su valor creciente en sistemas resilientes al cambio climático. Es un cultivo estratégicamente relevante en escenarios de limitación hídrica, además de modelo experimental útil para estudiar mecanismos de tolerancia a sequía en gramíneas. A pesar de esta tolerancia, la germinación y la etapa de plántula siguen siendo fases vulnerables al estrés hídrico y a las condiciones microambientales del sustrato, por lo que evaluar materiales capaces de estabilizar la humedad y aportar compuestos bioactivos resulta pertinente (Li et al., 2025).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el desempeño de hidrogeles biodegradables basados en gomas naturales y suplementados con HA como sustrato para la germinación y el crecimiento inicial de *Sorghum sp.* Este enfoque busca aportar evidencia sobre el potencial de matrices poliméricas naturales como alternativa sostenible para favorecer el establecimiento temprano del cultivo, con especial relevancia para sistemas agrícolas de zonas áridas como las del sur de Sonora y el Valle del Yaqui, donde la eficiencia en el uso del agua es un criterio central para la sostenibilidad productiva.

## Material y Métodos

### Materiales

Todos los componentes se obtuvieron de Sigma-Aldrich. Goma gellan (Gelzan™ CM) (GG); goma karaya del árbol *Sterculia sp.* (KG); espermidina trihidroclorada, 98 % (SPD) y sal sódica de ácido húmico (HA), grado técnico. Todos los reactivos fueron de calidad analítica y se utilizaron tal como se recibieron sin purificación adicional. Las soluciones acuosas se prepararon con agua desionizada purificada mediante un sistema Milli-Q Organex (Millipore, Molsheim, Francia). Las semillas de *Sorghum sp.* fueron donadas por el Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora.

### Síntesis de los hidrogeles

Las muestras de hidrogel se obtuvieron mediante reticulación ionotrópica de cadenas de GG con SPD en presencia de HA y/o KG. La síntesis se realizó conforme a la metodología reportada

previamente (Torres-Figueroa et al., 2025). La solución resultante se vertió en placas de Petri estériles, donde se llevó a cabo el proceso de gelificación.

Se evaluaron cuatro formulaciones de hidrogel: G0, G12, GK0 y GK12. La nomenclatura empleada indica la composición de cada sistema, donde la letra G corresponde a hidrogeles basados en GG, la letra K indica la incorporación de KG, y el número (0 o 12) representa la ausencia o presencia de HA en la formulación.

### Ensayo de germinación en placa

El ensayo de germinación se realizó con base en metodologías previamente reportadas para la evaluación del efecto de materiales poliméricos sobre el crecimiento vegetal (Montesano et al., 2015; Torres-Figueroa et al., 2023).

Semillas de *Sorghum sp.* se colocaron directamente sobre placas de Petri que contenían los hidrogeles previamente gelificados (tratamientos G0, G12, GK0 y GK12), los cuales se emplearon como sustrato de crecimiento. Como tratamiento control se utilizó agar papa dextrosa (PDA).

Previo a la siembra, las placas fueron desinfectadas mediante radiación ultravioleta durante dos ciclos consecutivos de 15 min. En cada placa se colocaron cinco semillas distribuidas de manera uniforme sobre la superficie del sustrato, con tres repeticiones independientes por tratamiento (15 semillas en total por tratamiento).

Las placas se incubaron en una cámara de crecimiento para plantas (BJPX-A450, BIOBASE) bajo condiciones controladas de temperatura ( $25 \pm 2$  °C), humedad relativa (60–70 %) y fotoperiodo de 12 h luz/12 h oscuridad, bajo condiciones controladas representativas del Valle del Yaqui, Sonora. La germinación y el crecimiento inicial de las plántulas se evaluaron a los 3, 5 y 7 días, considerando como germinada aquella semilla que presentó emergencia visible de la radícula.

### Evaluación del crecimiento inicial

Al finalizar el periodo de observación, se evaluaron los parámetros biométricos de las plántulas de sorgo. Las plántulas se seccionaron transversalmente para separar la parte aérea del sistema radicular. El peso fresco de ambas fracciones se registró inmediatamente después del periodo de observación. Posteriormente, las muestras se secaron en una estufa de convección mecánica (Thermo Scientific Precision 3511, USA) a 60 °C durante 48 h, con el fin de determinar el peso seco de la parte aérea y las raíces.

El contenido de clorofila foliar se midió utilizando un medidor portátil MC-100 (Apogee Instruments, Inc., Logan, Utah, USA), como indicador del estado fisiológico de las plántulas.

Para el análisis comparativo de los datos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $p < 0.05$ , utilizando el paquete estadístico IBM SPSS Statistics versión 21.

## Resultados y Discusión

Para que un material polimérico sea propuesto como sustrato en aplicaciones agrícolas, es indispensable demostrar la ausencia de efectos fitotóxicos, así como su capacidad para favorecer la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas (Montesano et al., 2015).

En el presente estudio, todos los tratamientos con hidrogeles mostraron una germinación del 100 %, superando ampliamente al medio control de PDA, el cual alcanzó únicamente un 55 %. Este comportamiento puede observarse claramente en la Figura 1, donde se aprecia una germinación

más rápida y uniforme en los tratamientos con hidrogel en comparación con el control. En general, las semillas sembradas sobre los hidrogeles desarrollaron raíces más largas y ramificadas, capaces de penetrar la matriz del material, así como una parte aérea con hojas de color verde intenso. En contraste, el tratamiento control presentó un desarrollo radicular limitado y plántulas menos vigorosas. Estos resultados indican que los hidrogeles basados en polisacáridos no presentan efectos fitotóxicos y, por el contrario, favorecen la germinación al proporcionar un microambiente con disponibilidad de agua más estable, lo cual ha sido reportado en sistemas similares donde los hidrogeles actúan como reservorios de agua en la zona radicular, favoreciendo el desarrollo inicial de las plantas. Además, la GG ha sido evaluada como un material de soporte para aplicaciones agrícolas, especialmente para la propagación de tejidos vegetales (Buitrago-Arias et al., 2025; Ma et al., 2023).

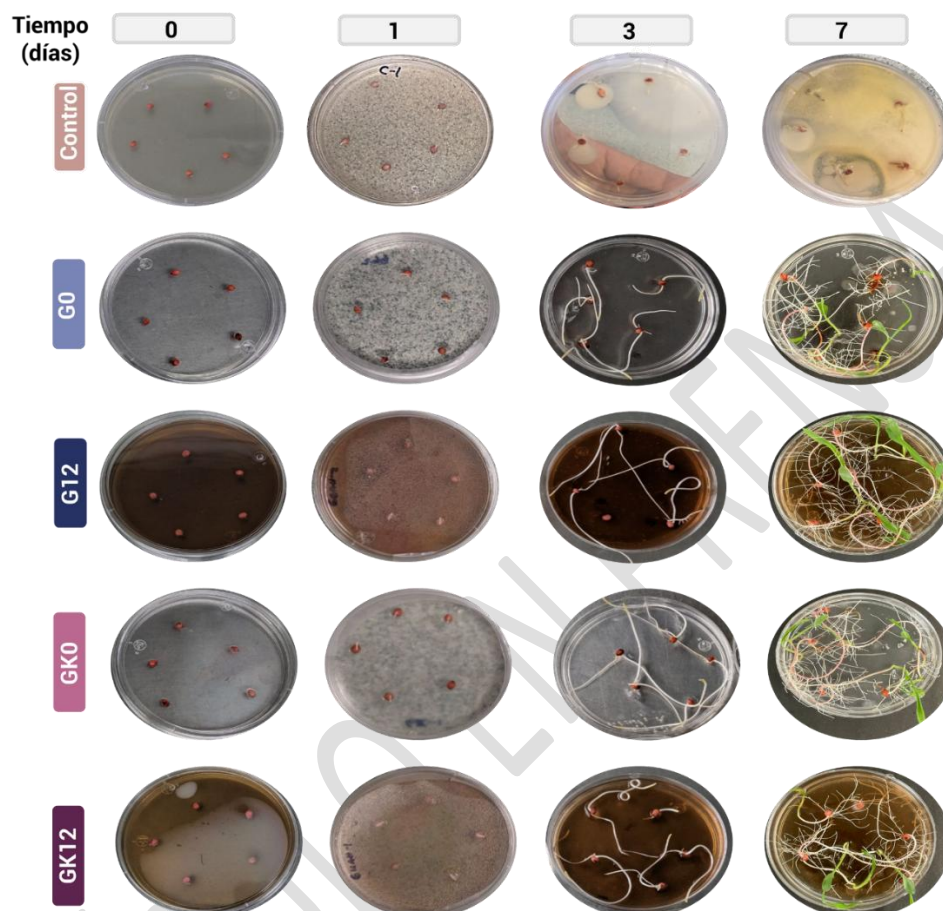
El menor desempeño del medio PDA puede explicarse por su composición y función. El PDA contiene agar como agente gelificante y dextrosa como fuente de carbono. El agar es un polisacárido estructural que forma una matriz relativamente rígida y con menor dinámica de liberación de agua en comparación con los hidrogeles evaluados (Akhter et al., 2025). Esta estructura puede limitar la disponibilidad inmediata de agua durante la imbibición de la semilla. Adicionalmente, la presencia de azúcares simples favorece el crecimiento de microorganismos, ya que este medio está diseñado específicamente para hongos y levaduras.

Este comportamiento fue consistente con las observaciones experimentales, donde se detectó crecimiento microbiano visible en las placas con PDA, mientras que las placas con hidrogeles no presentaron contaminación aparente. Aunque no se evaluó directamente la actividad antimicrobiana, este resultado sugiere que los hidrogeles podrían generar un entorno menos favorable para el desarrollo de microorganismos. Esto puede atribuirse a la ausencia de fuentes de carbono fácilmente asimilables y a la capacidad de los hidrogeles de regular la disponibilidad de agua.

Desde el punto de vista químico, los hidrogeles evaluados están compuestos por polisacáridos naturales como GG y KG, los cuales contienen grupos funcionales hidrofílicos que permiten la formación de redes tridimensionales altamente hidratadas. Estas estructuras favorecen la absorción y liberación gradual de agua, lo que resulta en un entorno más adecuado para la germinación en comparación con matrices más rígidas (Torres-Figueroa et al., 2025).

Las mediciones cuantitativas respaldaron de forma contundente lo observado visualmente durante los ensayos de germinación. Como se muestra en la Figura 2a y 2c, el peso fresco de la parte aérea y de las raíces fue mayor en todos los tratamientos con hidrogeles en comparación con el control. De manera consistente, la Figura 2b y 2d muestra que el peso seco también fue superior en los hidrogeles, lo que confirma un mayor crecimiento acumulado de biomasa. Entre los tratamientos evaluados, G12 y GK12 mostraron los valores más altos en todas las variables de biomasa, lo que indica que la incorporación de HA potencia el efecto positivo de los hidrogeles mejorando la retención de humedad y promoviendo el crecimiento vegetal al estimular procesos fisiológicos relacionados con la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular (De Melo et al., 2016).

Otro indicador clave evaluado fue el contenido de clorofila foliar (Figura 3). Las plántulas establecidas sobre hidrogeles presentaron hojas notablemente más verdes que las del control. El contenido de clorofila foliar también fue mayor en los tratamientos con hidrogel, particularmente en G12 y GK12. Este resultado sugiere una mayor actividad fotosintética y un mejor estado fisiológico de las plántulas. Se ha reportado que los hidrogeles enriquecidos con HA pueden mejorar la retención de agua, así como estimular procesos fisiológicos en plantas, incluyendo el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa (Niu et al., 2019; Rajamani et al., 2021).



**Figura 1. Secuencia fotográfica del día 1 al 7 mostrando la germinación de semillas de sorgo en PDA (control) y en hidrogeles.**

La combinación de una germinación completa, junto con un incremento en biomasa y contenido de clorofila, permite inferir que los hidrogeles evaluados no presentan efectos negativos sobre las semillas. Este comportamiento ha sido previamente reportado en hidrogeles basados en polisacáridos, los cuales no solo son no fitotóxicos, sino que también promueven el crecimiento vegetal en condiciones controladas (Krasnopeevea et al., 2022; Sorze et al., 2023).

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que todos los tratamientos con hidrogel superan al medio control en términos de germinación y crecimiento inicial. Sin embargo, los tratamientos G12 y GK12 mostraron el mejor desempeño en todas las variables evaluadas, lo que indica que la incorporación de HA potencia el efecto positivo de los hidrogeles. Estos hallazgos confirman el potencial de los hidrogeles basados en polisacáridos naturales como sustratos eficientes y sostenibles para la germinación de *Sorghum sp.*, especialmente en condiciones donde la disponibilidad de agua es limitada.

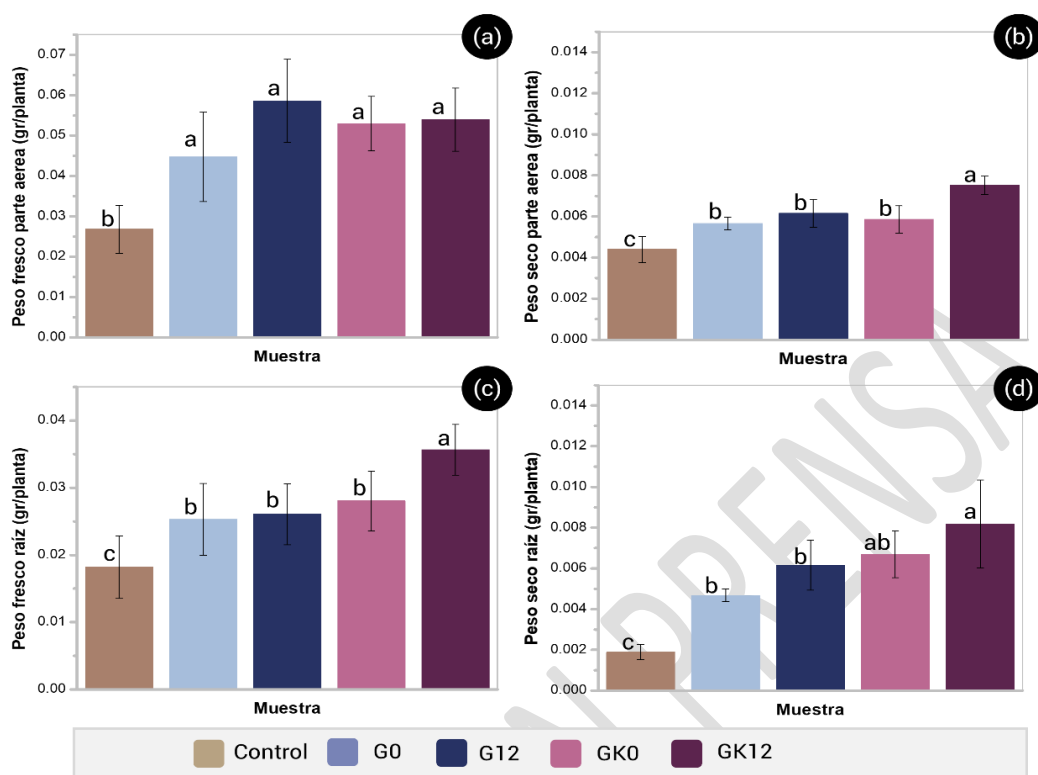


Figura 2. (a, b) Peso fresco de parte aérea y raíces, respectivamente; (c, d) Peso seco de parte aérea y raíces, respectivamente.

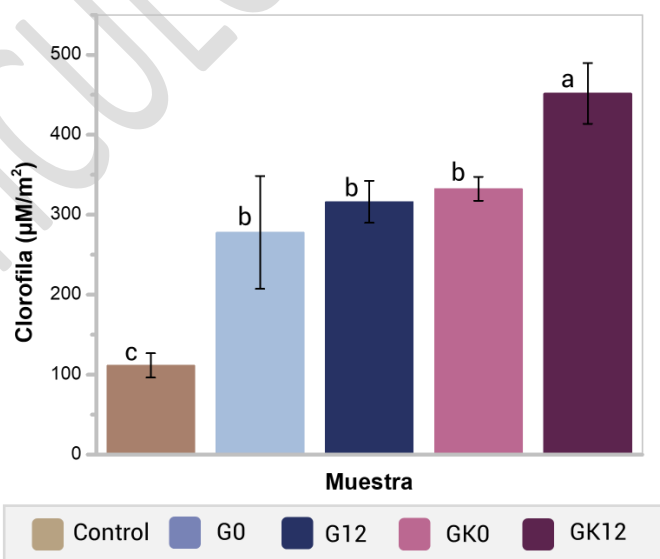


Figura 3. Contenido de clorofila foliar relativo.

## Conclusiones

Los hidrogeles basados en gomas naturales reticuladas con SPD demostraron ser un sustrato efectivo y no fitotóxico para la germinación de *Sorghum sp.*, alcanzando un 100 % de germinación en todos los tratamientos, en contraste con el 55 % observado en el medio control (PDA).

Entre las formulaciones evaluadas, los tratamientos G12 y GK12 presentaron el mejor desempeño en todas las variables analizadas, incluyendo biomasa fresca y seca, así como contenido de clorofila, lo que confirma el efecto positivo de la incorporación de HA como componente bioactivo del sistema.

Los resultados indican que estos hidrogeles generan un microambiente favorable para la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas, al mejorar la disponibilidad de agua y promover el desarrollo fisiológico. Adicionalmente, se observó que el uso de hidrogeles evitó la proliferación visible de microorganismos contaminantes en torno a las semillas, lo cual es un beneficio importante para asegurar la sanidad de la fase de germinación, especialmente en semillas susceptibles a pudriciones o de difícil desinfección; sin embargo, este efecto requiere ser evaluado mediante estudios específicos para confirmar su alcance y mecanismo.

En conjunto, estos hallazgos evidencian el potencial de los hidrogeles basados en polisacáridos naturales como una alternativa sostenible para el establecimiento temprano de cultivos, con especial relevancia para sistemas agrícolas en zonas áridas, como el Valle del Yaqui, Sonora, donde la disponibilidad de agua es un factor limitante.

## Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, TFAV, SVS, CCT; desarrollo de la metodología, TFAV; manejo de software, TFAV; validación experimental, TFAV, SVS, CCT, OMA; análisis de resultados, TFAV, SVS, CCT, OMA, PMCJ; Manejo de datos, TFAV; escritura y preparación del manuscrito, TFAV; redacción, revisión y edición, TFAV, PMCJ, CCT; administrador de proyectos, CCT; adquisición de fondos, CCT. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

## Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## Referencias

Adjuik, T. A., Nokes, S. E., & Montross, M. D. (2022). Evaluating the feasibility of using lignin–alginate beads with starch additive for entrapping and releasing *Rhizobium* spp. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(47), 1–15. <https://doi.org/10.1002/app.53181>

Adjuik, T. A., Nokes, S. E., & Montross, M. D. (2023). Biodegradability of bio-based and synthetic hydrogels as sustainable soil amendments: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(12), 1–17. <https://doi.org/10.1002/app.53655>

Akhter, Z., Ullah, S., Palevicius, A., & Janusas, G. (2025). Agar-Based Composites in Sustainable Energy Storage: A Comprehensive Review. In *Energies* (Vol. 18, Issue 21, p. 5618). <https://doi.org/10.3390/en18215618>

Alkhalidi, A., Assaf, M. N., Alkaylani, H., Halaweh, G., & Salcedo, F. P. (2023). Integrated innovative technique to assess and priorities risks associated with drought: Impacts, measures/strategies, and actions, global study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 94(June), 103800. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103800>

Azeem, M. K., Islam, A., Khan, R. U., Rasool, A., Qureshi, M. A. ur R., Rizwan, M., Sher, F., & Rasheed, T. (2023). Eco-friendly three-dimensional hydrogels for sustainable agricultural applications: Current and future scenarios. *Polymers for Advanced Technologies*, May, 1–17. <https://doi.org/10.1002/pat.6122>

Barats, A., Renac, C., Garrido- Hoyos, S., Gonzalez-Perez, B., Garcia-Mendoza, K., Esteller-Alberich, M. V., Jara-Marini, M. E., & Aguilar-Chavez, A. (2025). Assessment of the water quality in the coastal Yaqui valley (Mexico): Implications for human health and ecological risks. *Environmental Research*, 264(October 2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120275>

Buitrago-Arias, C., Gañán-Rojo, P., Torres-Taborda, M., Perdomo-Villar, L., Álvarez-López, C., Jaramillo-Quiceno, N., & Hincapié-Llanos, G. A. (2025). Analysis of the Growth of Hydrogel Applications in Agriculture: A Review. In *Gels* (Vol. 11, Issue 9, p. 731). <https://doi.org/10.3390/gels11090731>

De Melo, B. A. G., Motta, F. L., & Santana, M. H. A. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science and Engineering C*, 62, 967–974. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>

Durpekova, S., Bergerova, E. D., Hanusova, D., Dusankova, M., & Sedlarik, V. (2022). Eco-friendly whey/polysaccharide-based hydrogel with poly(lactic acid) for improvement of agricultural soil quality and plant growth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212(May), 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.053>

Fischer, T., Ammar, K., Monasterio, I. O., Monjardino, M., Singh, R., & Verhulst, N. (2022). Sixty years of irrigated wheat yield increase in the Yaqui Valley of Mexico: Past drivers, prospects and sustainability. *Field Crops Research*, 283(December 2021), 108528. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108528>

Krasnopeevea, E. L., Panova, G. G., & Yakimansky, A. V. (2022). Agricultural Applications of Superabsorbent Polymer Hydrogels. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23). <https://doi.org/10.3390/ijms232315134>

Li, H., Wang, X., Song, X., Fu, H., Yang, L., Deng, D., Xu, K., Li, L., & Li, F. (2025). Sustainably Polyanionic Hyaluronic Acid-Based Hydrogel for Efficient Removal of Fe<sup>3+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup> Ions in Soil with Enhanced Sorghum Growth. *Biomacromolecules*, 26(7), 4419–4435. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5c00427>

Ma, L., Chai, C., Wu, W., Qi, P., Liu, X., & Hao, J. (2023). Hydrogels as the plant culture substrates: A review. *Carbohydrate Polymers*, 305(January), 120544. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120544>

Montesano, F. F., Parente, A., Santamaria, P., Sannino, A., & Serio, F. (2015). Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.052>

Muhammad, N., Kader, M. A., Al-Solaimani, S. G., Abd El-Wahed, M. H., Abohassan, R. A., & Charles, M. E. (2025). A review of impacts of hydrogels on soil water conservation in dryland agriculture. *Farming System*, 3(4). <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2025.100166>

Niu, Y., Ke, R., Yang, T., & Song, J. (2019). pH-Responsively Water-Retaining Controlled-Release Fertilizer Using Humic Acid Hydrogel and Nano-Silica Aqueous Dispersion. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(4), 2286–2291. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17216>

Rajamani, K., Reddy, K. I., & Srinivas, A. (2021). Influence of Super Absorbent Polymer and Humic Acid on Maize Yield and Nutrient Uptake on Rainfed Alfisols. *International Journal of Environment and Climate Change*, 11(12), 97–106. <https://doi.org/10.9734/ijeccc/2021/v11i1230559>

Sorze, A., Valentini, F., Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2023). Development of a Xanthan Gum Based Superabsorbent and Water Retaining Composites for Agricultural and Forestry Applications. *Molecules*, 28(4). <https://doi.org/10.3390/molecules28041952>

Torres-Figueroa, A. V., de los Santos-Villalobos, S., Rodríguez-Félix, D. E., Moreno-Salazar, S. F., Pérez-Martínez, C. J., Chan-Chan, L. H., Ochoa-Meza, A., & del Castillo-Castro, T. (2023). Physically and Chemically Cross-Linked Poly(vinyl alcohol)/Humic Acid Hydrogels for Agricultural Applications. *ACS Omega*, 8(47), 44784–44795. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05868>

Torres-Figueroa, A. V, de los Santos-Villalobos, S., Rodríguez-Félix, D. E., Valenzuela-Hernandez, G., Moreno-Salazar, S. F., Pérez-Martínez, C. J., Ochoa-Meza, A., & del Castillo-Castro, T. (2025). Novel Polysaccharide Hydrogels Enriched with Humic Acid for Sustainable Agricultural Applications. *ACS Omega*, 10(51), 63189–63201. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c09496>

Verma, A., Kumar, P., Rastogi, V., & Mittal, P. (2021). Preparation and evaluation of polymeric beads composed of Chitosan–Gellan Gum–Gum Ghatti/-Gum Karaya polyelectrolyte complexes as polymeric carrier for enteric sustained delivery of Diclofenac sodium. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s43094-021-00343-y>

ARTÍCULO EN PRENSA