

Síntesis de hidrogel natural como sustrato para cultivo sin suelo en hortalizas de fruto asistido por manufactura aditiva

Ángel Iván Belmonte Torres, Dr. Guillermo Amaya Parra.,
Dr. Julián Israel Aguilar Duque.

Universidad Autónoma de Baja California, Ivan.Belmonte@uabc.edu.mx,
Ensenada, Baja California, México.

Universidad Autónoma de Baja California, Amaya@uabc.edu.mx ,Ensenada,
Baja California ,México.

Universidad Autónoma de Baja California, Julian.Aguilar@uabc.edu.mx

Resumen

Los sustratos utilizados en el cultivo sin suelo por lo general, carecen de una o más propiedades esenciales para un buen desarrollo de las plantas, hasta la fecha no se ha reportado un sustrato que sea idóneo para esta técnica, el uso de hidrogeles naturales plantean una buena alternativa como sustrato por sus propiedades hidrofílicas, por lo que este material parece prometedor para un buen desarrollo en hortalizas de fruto, se propone sintetizar un hidrogel como sustrato para cultivo sin suelo a través de manufactura aditiva para darle una estructura que favorezca el desarrollo de las plantas. Se espera obtener un hidrogel química y biológicamente inerte a partir de monómeros naturales, mediante DLP (procesamiento de luz digital) para darle la estructura deseada.

Palabras clave: Cultivo sin suelo, hidrogel, hidroponía, horticultura, manufactura aditiva

Abstract

Keywords: Soil-less culture, hydrogel, hydroponics, horticulture, additive manufacturing.

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos sin suelo y la hidroponía son definidos como “la ciencia del crecimiento de las plantas sin utilizar el suelo”[1]. En otras palabras, se le conoce como sistema agrícola para cultivar en agua compuesta de nutrientes minerales apoyados por un medio físico (fibra de coco, perlita, etc.), esta técnica ha tenido una excelente respuesta debido a la baja demanda de nutrientes y al corto período de crecimiento de los cultivos [2]. En el cultivo sin suelo, el sustrato reemplaza el suelo (la tierra), el suelo natural suele ser poco adecuado para el cultivo debido a limitaciones químicas (reacción, disponibilidad de nutrientes, etc.), físicas (densidad, estructura, retención de agua, etc.) o biológicas (presencia de hongos, virus, bacterias etc.)[3]. Los sustratos utilizados actualmente se dividen en sustratos orgánicos (fibra de coco, turba, restos de madera, cascarilla de arroz, entre otros) y sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, piedra volcánica, arena, etc.), dichos sustratos suelen presentar algunas deficiencias como una compactación del sustrato [4], [5], la necesidad de tratamientos químicos para que el sustrato sea inerte [6][7] y recursos limitados que a su vez generan impactos negativos al

medio ambiente[8]. En los últimos años, los investigadores informaron que los hidrogeles naturales pueden servir como medios de cultivo para conservar el agua y los nutrientes, por lo tanto, tienen un gran potencial en el cultivo sin suelo para el crecimiento de las hortalizas de fruto[9][10][11]. Las hortalizas de fruto son aquellas plantas que su fruto tiene forma de baya (pepino, tomate, berenjena, pimiento, etc.) y suelen tener un crecimiento mínimo de 1.5 m. cuando la planta es madura, por lo que es necesario tener un buen anclaje radicular. Debido a su propiedad de retención de agua, los hidrogeles tienen la capacidad de mejorar la soltura y la porosidad del suelo, mejorar la capacidad de acumulación de humedad y promover la capacidad de los sistemas de raíces de las plantas, la germinación de semillas y la supervivencia de las plantas[12].

La manufactura aditiva (MA) permite la creación de formas geométricas complejas que se pueden personalizar en masa, debido a que no se requiere matriz o molde para fabricación, por lo que son elaboradas mediante diseño asistido por computadora (CAD) [13]. Existen varias técnicas de la MA que ya han sido probadas utilizando hidrogeles para aplicaciones médicas en ingeniería de tejidos, como órganos artificiales [14], injerto de hueso [15] y aplicaciones biomédicas [16]. Sin embargo, en la literatura no se han reportado aplicaciones en la horticultura. Reproducir un hidrogel para su posterior uso como sustrato, permitirá obtener un medio de anclaje para la planta con mejores propiedades físicas y químicas, además de poder manipular su geometría de manera que sea favorable para el crecimiento radicular.

2. CONTENIDO

1. Cultivo sin suelo:

En el cultivo sin suelo los sustratos se definen como todos aquellos materiales utilizados solos o mezclados adecuadamente y que pueden proporcionar al sistema radicular mejores condiciones (en términos de uno o más aspectos del crecimiento de la planta) que las que ofrece la tierra [17]. El uso de un sustrato tiene la finalidad de resolver los problemas de control de condiciones y cuantificación de nutrientes. Siempre es difícil controlar los nutrientes y los microbiomas alrededor de las plantas y las interacciones entre estos y las plantas [18], esta práctica surge de la necesidad de buscar alternativas a la agricultura tradicional en la cual la mayoría de las áreas agrícolas ya no son tan productivas como lo fueron alguna vez, esto debido a los escasos del agua, la falta de nutrientes disponibles en el suelo y los cambios climáticos[19].

1.2. Sustratos

Cualquier material orgánico, inorgánico o sintético puede servir como sustrato, siempre y cuando cumpla con ciertas propiedades ver tabla 1.

Propiedades	Valor optimo
Propiedades físicas	
Granulometría	-----
Densidad Real	1,45 - 2,65 g.cm-3
Densidad aparente	0,50 a 0,75 g.cm-3
Porosidad total	85% o superior Tamaño de microporo 0.2 a 30 µm
capacidad de aireación	10-30%
Agua fácilmente disponible	20-30%
Agua de reserva	Valor óptimo es del 4-10%.
Agua total disponible	24 y el 40% de volumen.
distribución del tamaño de las partículas	distribución de tamaño de los poros entre 30 y 300 micras
Estructura estable	-----
Propiedades químicas	
Capacidad de intercambio catiónico C.I.C	Baja o nula C.I.C.
Disponibilidad de nutrientes	Casi nulo o sin ningún nutriente inicial
Salinidad	Nula (inicialmente) valores de conductividad eléctrica superior a 3,5 mS/cm son excesivamente altos
PH	Entre 5.5 y 6.8 (varía dependiendo el cultivo)
Relación C/N	Depende de la solución nutritiva
Propiedades biológicas	
Velocidad de descomposición	Lenta
Actividad reguladora del crecimiento	Se soluciona con la solución nutritiva
Malas hierbas y patógenos	-----
Fitotoxicidad	Baja o nula

Tabla.1 propiedades óptimas para un sustrato [5], [20]–[22]

Los sustratos más utilizados suelen ser la fibra de coco, perlita, tezontle, vermiculita, lana de roca y turba, sin embargo, estos carecen de una o más propiedades vitales para el desarrollo de la planta. Hasta la fecha no se ha reportado un sustrato que sea idóneo para la siembra de hortalizas de fruto [23].

2. Hidrogeles

Los hidrogeles son redes poliméricas que tienen un alto nivel de hidratación y microestructuras tridimensionales que tienen similitudes con los tejidos naturales, ofreciendo una variedad de características como microestructurado intrínseco que promueven el transporte de cargas iónicas y moléculas[24]. Los hidrogeles se pueden producir a partir de algunos de los polímeros más abundantes en la tierra típicamente derivados de proteínas o polisacáridos. Estos representarían materiales adecuados para aplicaciones a gran escala debido a su gran disponibilidad y bajo costo[25]. De acuerdo con Burket [26] es posible diseñar y sintetizar redes de polímeros con control a escala molecular sobre la estructura, como la densidad de reticulación con propiedades personalizadas, como la biodegradación, la resistencia mecánica, la respuesta química y biológica a los estímulos. pueden responder a diferentes estímulos como temperatura, pH, luz, fuerza mecánica, entre otros. Estas propiedades los hacen útiles para la fabricación de sistemas biomiméticos por lo que se les considera hidrogeles inteligentes [27].

El hidrogel se puede clasificar en dos grupos: hidrogeles de base natural e hidrogeles de base sintética.

El hidrogel de base natural y sus derivados generalmente se extraen de plantas (celulosa [28], almidón [29] colágeno de origen animal [30] bacterias (goma xantana) [31] y algas (agar, alginato, phytigel) [32].

Mientras que los hidrogeles sintéticos más utilizados son ácido acrílico [33], acrilamida [34], etilenglicol [35] y alcohol vinílico [36].

En el presente escrito nos limitamos al estudio de hidrogeles naturales.

2.1. Hidrogeles naturales como sustrato

En la actualidad, hay pocos informes sobre hidrogel como sustratos de cultivo sin suelo directamente. Por lo tanto, es muy necesaria la fabricación de hidrogel para el cultivo sin suelo de forma ecológica [9]. La mayoría de los sustratos de hidrogel está formada por polisacáridos (poliazúcar), que son polímeros de cadena larga compuestos por monosacáridos, de bajo costo, abundancia, renovabilidad y biodegradabilidad. Los polisacáridos naturales que pueden formar gel más como hidrogel superabsorbente [37]. Con la finalidad de entender el desarrollo de los hidrogeles se presenta la línea de tiempo de desarrollo de hidrogeles a base de polisacardios, Figura 1,

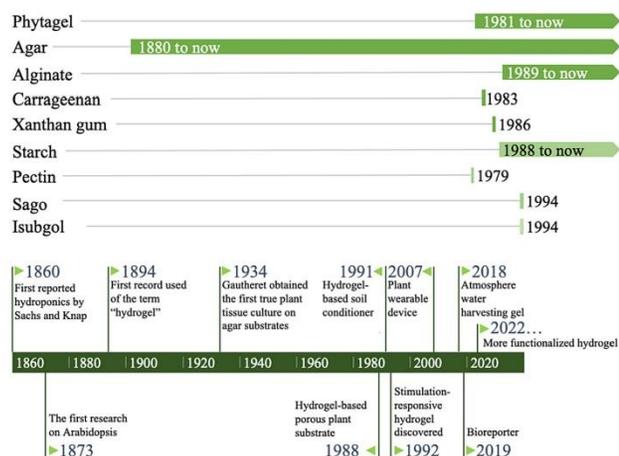


Figura 1: La línea de tiempo del desarrollo de hidrogeles de polisacáridos como sustratos vegetales.[38]

La goma xantana (XG) es un polisacárido microbiano[39]. Este biomaterial ha sido ampliamente investigado debido a su aprobación de seguridad por parte de la FDA (Food and Drug Administration), como aditivo alimentario en 1969[40]. La goma xantana muestra varias ventajas como sustrato vegetal, incluida la promoción del crecimiento de las plantas, un costo económico y una resistencia prolongada [41].

El almidón está formado por numerosas glucosas unidas y conectadas por enlaces glucosídicos [42], este ha sido utilizado para germinar papas. Un estudio desarrollado por [43], mostro que los medios gelificados con almidón soportan significativamente más embriones formados que el medio de agar, sin embargo, el almidón carece de un buen soporte para las plantas.

3. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) también conocida como impresión 3D ofrece muchas ventajas en la fabricación de compuestos, incluida una geometría personalizada, rentable y de alta precisión.[44], parte de un modelo echo por computadora en 3D en malla que se puede crear mediante datos de imagen adquiridos o estructuras construidas en un software de diseño asistido por computadora (CAD) [45].

los hidrogeles impresos en 3D facilitan las aplicaciones de materiales de gel en diversos campos figura 2.

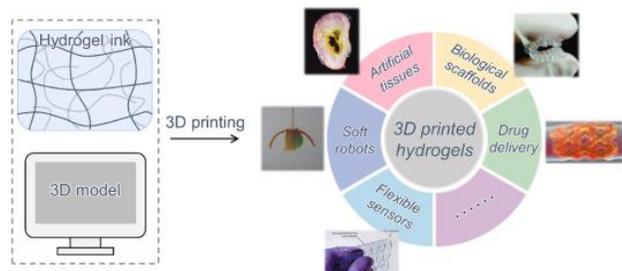


Figura 2. Impresión 3D de hidrogeles y sus aplicaciones versátiles en campos biomédicos y de ingeniería[46].

Los hidrogeles junto con los procesos MA tienen el potencial de crear sustratos de cultivo sin suelo [25], esto sería un área de oportunidad para la MA en la agricultura, pues esta técnica permite un control arquitectónico de los hidrogeles con alta precisión, con el potencial de integrar aún más los elementos que permiten el cambio de las configuraciones del hidrogel[47]. Lo cual podría impulsar un área de oportunidad en las ciencias agrícolas.

Un estudio de impresión volumétrica de tejidos [48] reporto que en los procesos DLP (procesamiento de luz digital) el tiempo de impresión aumenta linealmente en función de la altura de la construcción, independientemente del área a imprimir en cada capa individual. Por lo tanto, las tecnologías DLP tienen un potencial prometedor para usarse en la reproducción de sustratos de hidrogel que equilibren la resolución y la velocidad de impresión.

La tomografía computarizada de rayos X es una herramienta capaz de obtener imágenes detalladas de la estructura de poros de los materiales porosos [49][50]. Por lo que es posible seleccionar un material con una porosidad total mayor a 85% y mediante impresión 3D con hidrogel poder replicar esa estructura porosa que tenga previamente las propiedades químicas y biológicas necesarias para un sustrato.

4. Metodología

Se plantea el uso de un polisacárido(almidón, Celulosa, Goma Xantana, quitosano, , un fotoiniciador (carbonílicos, Cetonas aromáticas,) que polimerice en un rango de 250 a 580 nm y un reticulante (formaldehído, epiclorhidrina) para la formación de una disolución acuosa con un control sobre sus propiedades químicas y biológicas necesarias (PH,C.I.C,fitotoxicidad, etc.) para formar un hidrogel que pueda ser utilizado como sustrato , mediante CAD (diseño asistido por computadora) y microtomografía computarizada de rayos X (microCT) se diseñara una estructura favorable para el crecimiento radicular de la planta , con una porosidad controlada de 30 µm o mayor de tal manera que se obtenga una porosidad total 85 % para una aireación adecuada para la raíz, esta disolución acuosa será introducido en una impresora con tecnología DLP, donde la fotopolimerización capa por capa le dará la estructura previamente diseñada. Se utilizará el microscopio electrónico de barrido como método de caracterización morfológico para determinar el tamaño de la porosidad y la composición química mediante EDS, complementaremos con una caracterización de la porosimetría, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para determinar la presencia de grupos funcionales en la matriz del hidrogel, relación aire-agua del sustrato, permite conocer la curva de liberación de agua del material. y pruebas de tracción uniaxial para obtener un diagrama de tensión-deformación para obtener el módulo de elasticidad.

Tras terminar las pruebas de caracterización, se utilizará un cultivo local, el pepino persa debido a su buen rendimiento

ante factores abióticos en la región, su tolerancia a cambios de temperatura (8 a 40 °C), humedad relativa entre 65 a 85%, con un tiempo de germinación de 20 a 30 días, producción de fruto 40. Se hará una comparación de biomasa del cultivo con otro sustrato bajo las mismas condiciones (producción de fruto, crecimiento de tallo, tamaño de hoja, peso de cada órgano natural y en seco.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Hidrogeles naturales a base de polisacáridos son prometedores para su uso como sustrato en el cultivo sin suelo, estos hidrogeles cuentan con propiedades de retención de agua, microporosidad y bajo costo, dichas características que la mayoría de los sustratos utilizados actualmente carecen. Por otro lado, la manufactura aditiva podría ser una excelente adición para el desarrollo de dichos sustratos debido a su versatilidad de fabricar estructuras complejas que favorezcan el anclaje y desarrollo de las hortalizas de fruto, sin embargo no se ha reportado el uso de la MA e hidrogel para un uso afín a la hidroponía por lo que se requiere de una investigación exhaustiva sobre el tema, no obstante el uso de la manufactura aditiva ha reportado avances en la producción de estructuras mediante hidrogel, como injertos de piel y órganos artificiales, que de cierto modo da certeza de la posibilidad de elaborar hidrogeles por este modo.

4. REFERENCIAS

- [1] m resh Howard, *CULTIVOS HIDROPONICOS Nuevas técnicas de producción*, 5th ed., vol. 1. Barcelona: Mundi-prensa, 2001.
- [2] M. S. Gumisiriza, J. M. L. Kabirizi, M. Mugerwa, P. A. Ndakidemi, and E. R. Mbega, "Can soilless farming feed urban East Africa? An assessment of the benefits and challenges of hydroponics in Uganda and Tanzania," *Environmental Challenges*, vol. 6, p. 100413, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENVC.2021.100413.
- [3] N. Gruda, "Sustainable peat alternative growing media," *Acta Hortic*, vol. 927, pp. 973–980, Feb. 2012, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2012.927.120.
- [4] M. Raviv, "Composts in growing media: What's new and what's next?," *Acta Hortic*, vol. 982, pp. 39–52, Mar. 2013, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2013.982.3.
- [5] A. Prácticos Experiencias and C. M. Baixauli Soria José Aguilar Olivert, "Cultivo sin Suelo de Hortalizas".
- [6] M. A. Nichols, "Coir - A XXIst century sustainable growing medium," *Acta Hortic*, vol. 747, pp. 91–95, 2007, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2007.747.8.
- [7] R. Poulter, "Quantifying differences between treated and untreated coir substrate," *Acta Hortic*, vol. 1018, pp. 557–564, Jan. 2014, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2014.1018.61.
- [8] P. D. Alexander *et al.*, "Peat in horticulture and conservation: the UK response to a changing world," vol. 3, p. 8, 2008, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.mires-and-peat.net/>,
- [9] L. Cao and N. Li, "Activated-carbon-filled agarose hydrogel as a natural medium for seed germination and seedling growth," *Int J Biol Macromol*, vol. 177, pp. 383–391, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2021.02.097.
- [10] O. Adrianes and G. M. Soto Zarazúa, "Potassium acrylate: A novelty in hydroponic substrates," in *2017 13th International Engineering Congress, CONIIN 2017*, 2017. doi: 10.1109/CONIIN.2017.7968177.
- [11] A. H. Tadevosyan, S. K. Mayrapetyan, J. S. Aleksanyan, L. M. Ghalachyan, B. T. Stepanyan, and A. H. Tovmasyan, "Influence of superabsorbent polymers on the productivity of pepper under soilless culture," in *Acta Horticulturae*, 2014, vol. 1033. doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1033.3.
- [12] C. Liu, F. Lei, P. Li, J. Jiang, and K. Wang, "Borax crosslinked fenugreek galactomannan hydrogel as potential water-retaining agent in agriculture," *Carbohydr Polym*, vol. 236, p. 116100, May 2020, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2020.116100.
- [13] E. MacDonald and R. Wicker, "Multiprocess 3D printing for increasing component functionality," *Science (1979)*, vol. 353, no. 6307, Sep. 2016, doi: 10.1126/SCIENCE.AAF2093/ASSET/EBF82CEF-73AB-4A9D-8C88-548C0D6FA95D/ASSETS/GRAPHIC/353_AAF2093_FA.JPEG.
- [14] F. B. Coulter *et al.*, "Bioinspired Heart Valve Prosthesis Made by Silicone Additive Manufacturing," *Matter*, vol. 1, no. 1, pp. 266–279, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.MATT.2019.05.013.
- [15] M. M. Germaini, S. Belhabib, S. Guessasma, R. Deterre, P. Corre, and P. Weiss, "Additive manufacturing of biomaterials for bone tissue engineering – A critical review of the state of the art and new concepts," *Prog Mater Sci*, vol. 130, p. 100963, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2022.100963.
- [16] A. J. Sheoran, H. Kumar, P. K. Arora, and G. Moona, "Bio-Medical applications of Additive Manufacturing: A Review," *Procedia Manuf*, vol. 51, pp. 663–670, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.10.093.
- [17] "View of From soil to soil-less in horticulture: quality and typicity." <https://www.agronomy.it/index.php/agro/article/view/ija.2013.e30/511> (accessed Nov. 26, 2022).
- [18] L. Ma *et al.*, "Hydrogel-based transparent soils for root phenotyping in vivo," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 166, no. 22, pp. 11063–11068, May 2019, doi: 10.1073/PNAS.1820334116/SUPPL_FILE/PNAS.1820334116.SM03.MP4.
- [19] C. : Ingeniería *et al.*, "Que presenta la C. MONTIEL MONTIEL YURIDIA N° de Control '12870093,'" 2016.

- [20] F. Pedro and R. Dolores, "Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo." pp. 3–42.
- [21] A. R. Campaña, "Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes".
- [22] E. A. Czyz, "Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley," *Soil Tillage Res*, vol. 79, no. 2, pp. 153–166, Dec. 2004, doi: 10.1016/J.STILL.2004.07.004.
- [23] M. Leonardo, "Manejo de sustratos para el cultivo de plantas en contenedores." Ministerio de agricultura, ganadería y pesca.
- [24] L. Pan *et al.*, "Hierarchical nanostructured conducting polymer hydrogel with high electrochemical activity," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 109, no. 24, pp. 9287–9292, Jun. 2012, doi: 10.1073/PNAS.1202636109/-/DCSUPPLEMENTAL.
- [25] L. M. Kalossaka, G. Sena, L. M. C. Barter, and C. Myant, "Review: 3D printing hydrogels for the fabrication of soilless cultivation substrates," *Appl Mater Today*, vol. 24, p. 101088, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.APMT.2021.101088.
- [26] S. Burkert, T. Schmidt, U. Gohs, H. Dorschner, and K. F. Arndt, "Cross-linking of poly(N-vinyl pyrrolidone) films by electron beam irradiation," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 76, no. 8–9, pp. 1324–1328, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.RADPHYSHEM.2007.02.024.
- [27] H. L. Lim, Y. Hwang, M. Kar, and S. Varghese, "Smart hydrogels as functional biomimetic systems," *Biomater Sci*, vol. 2, no. 5, pp. 603–618, Apr. 2014, doi: 10.1039/C3BM60288E.
- [28] V. Miljković, I. Gajić, and L. Nikolić, "Waste Materials as a Resource for Production of CMC Superabsorbent Hydrogel for Sustainable Agriculture," *Polymers 2021, Vol. 13, Page 4115*, vol. 13, no. 23, p. 4115, Nov. 2021, doi: 10.3390/POLYM13234115.
- [29] S. Park and Y. R. Kim, "Clean label starch: production, physicochemical characteristics, and industrial applications," *Food Sci Biotechnol*, vol. 30, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2021, doi: 10.1007/S10068-020-00834-3/FIGURES/1.
- [30] M. D. Shoulders and R. T. Raines, "COLLAGEN STRUCTURE AND STABILITY," *Annu Rev Biochem*, vol. 78, p. 929, 2009, doi: 10.1146/ANNUREV.BIOCHEM.77.032207.120833.
- [31] S. Chaturvedi, S. Kulshrestha, K. Bhardwaj, and R. Jangir, "A Review on Properties and Applications of Xanthan Gum," *Microbial Polymers*, pp. 87–107, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-0045-6_4.
- [32] M. Beaumont *et al.*, "Hydrogel-Forming Algae Polysaccharides: From Seaweed to Biomedical Applications," *Biomacromolecules*, vol. 22, no. 3, pp. 1027–1052, Mar. 2021, doi: 10.1021/ACS.BIOMAC.0C01406/ASSET/IMAGES/LARGE/BM0C01406_0008.JPEG.
- [33] C. R. F. Junior, R. da S. Fernandes, M. R. de Moura, and F. A. Aouada, "On the preparation and physicochemical properties of pH-responsive hydrogel nanocomposite based on poly(acid methacrylic)/laponite RDS," *Mater Today Commun*, vol. 23, p. 100936, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2020.100936.
- [34] J. Liang, J. J. Struckhoff, H. Du, P. D. Hamilton, and N. Ravi, "Synthesis and characterization of in situ forming anionic hydrogel as vitreous substitutes," *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, vol. 105, no. 5, pp. 977–988, Jul. 2017, doi: 10.1002/JBM.B.33632.
- [35] K. Brewer, B. Gundsambuu, P. F. Marina, S. C. Barry, and A. Blencowe, "Thermoresponsive Poly(ϵ -Caprolactone)-Poly(Ethylene/Propylene Glycol) Copolymers as Injectable Hydrogels for Cell Therapies," *Polymers 2020, Vol. 12, Page 367*, vol. 12, no. 2, p. 367, Feb. 2020, doi: 10.3390/POLYM12020367.
- [36] Y. Meng, J. Cao, Y. Chen, Y. Yu, and L. Ye, "3D printing of a poly(vinyl alcohol)-based nanocomposite hydrogel as an artificial cartilage replacement and the improvement mechanism of printing accuracy," *J Mater Chem B*, vol. 8, no. 4, pp. 677–690, Jan. 2020, doi: 10.1039/C9TB02278C.
- [37] "Understanding and Controlling the Microstructure of Complex Foods - Google Libros." https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=RLmjAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=Lk5QzaggqA&sig=QSrR4bl_QnKwgy9gYiNyXp1NX1U&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jan. 17, 2023).
- [38] L. Ma, C. Chai, W. Wu, P. Qi, X. Liu, and J. Hao, "Hydrogels as the plant culture substrates: A review," *Carbohydr Polym*, vol. 305, p. 120544, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2023.120544.
- [39] J. Patel, B. Maji, N. S. H. N. Moorthy, and S. Maiti, "Xanthan gum derivatives: review of synthesis, properties and diverse applications," *RSC Adv*, vol. 10, no. 45, pp. 27103–27136, Jul. 2020, doi: 10.1039/D0RA04366D.
- [40] Y. Luo and Q. Wang, "Recent development of chitosan-based polyelectrolyte complexes with natural polysaccharides for drug delivery," *Int J Biol Macromol*, vol. 64, pp. 353–367, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2013.12.017.
- [41] T. Ichi, T. Koda, and I. Asai, "Akikazu Hatanaka & Jiro Sekiya (1986) Effects of Gelling Agents on *in vitro* Culture of Plant Tissues," *Agric Biol Chem*, vol. 50, no. 9, pp. 2397–2399, 2014, doi: 10.1080/00021369.1986.10867756.
- [42] J. N. Bemiller, "Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations," *Carbohydr Polym*, vol. 86, no. 2, pp. 386–423, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2011.05.064.
- [43] E. Huokuna, A. K. Maijala, and K. & Suomi, "Annales Agriculturae Fenniae Seria ANIMALIA DOMESTICA N. 72-Sarja KOTIELÄIMET n:o 72

SUITABILITY OF UNCASTRATED BOARDS FOR MEAT PRODUCTION KAIJA SUOMI and TIMO ALAVILHKOLA,” *ANNALES AGRICULTURAE FENNIAE*, vol. 25, pp. 81–90, 1986.

- [44] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, “3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,” *Compos B Eng*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034.
- [45] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, “3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,” *Compos B Eng*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034.
- [46] X. N. Zhang, Q. Zheng, and Z. L. Wu, “Recent advances in 3D printing of tough hydrogels: A review,” *Compos B Eng*, vol. 238, p. 109895, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2022.109895.
- [47] Y. S. Zhang and A. Khademhosseini, “Advances in engineering hydrogels,” *Science (1979)*, vol. 356, no. 6337, May 2017, doi: 10.1126/SCIENCE.AAF3627/ASSET/DA9C967B-F098-46FD-8612-68D9054A7DF3/ASSETS/GRAPHIC/356_AAF3627_FA.JPEG.
- [48] J. R. Tumbleston *et al.*, “Continuous liquid interface production of 3D objects,” *Science (1979)*, vol. 347, no. 6228, pp. 1349–1352, Mar. 2015, doi: 10.1126/SCIENCE.AAA2397/SUPPL_FILE/TUMBLESTON.SM.PDF.
- [49] N. D. Ferro and F. Morari, “From Real Soils to 3D-Printed Soils: Reproduction of Complex Pore Network at the Real Size in a Silty-Loam Soil,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 79, no. 4, pp. 1008–1017, Jul. 2015, doi: 10.2136/SSSAJ2015.03.0097.
- [50] W. Otten, R. Pajor, S. Schmidt, P. C. Baveye, R. Hague, and R. E. Falconer, “Combining X-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries,” *Soil Biol Biochem*, vol. 51, pp. 53–55, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.SOILBIO.2012.04.008.