Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Polímeros de origen microbiano con aplicaciones agroindustriales

Microbial origin polymers with agro-industrial applications

Barrera-Martínez, C.L.[1], Meléndez-Rentería, N.P.[1], De León-Zapata, M.A.[1], Salinas-Jasso, T.A.[1], Aguilar-González, C.N.[2], Laredo-Alcalá, E.I.[2]

[1] Centro de Investigación en Química Aplicada. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo, No.140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila México.
[2] Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila (CICBEC). Universidad Autónoma de Coahuila, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.
aihtnyc_lbm@hotmail.com; paola.melendez@uadec.edu.mx; miguel.leon@uadec.edu.mx; thaliasalinas_jasso@hotmail.com; cristobal.aguilar@uadec.edu.mx; elan_laredo@uadec.edu.mx

Innovación tecnológica: Propuesta de materiales biodegradables y sustentables para su aplicación en las industrias biotecnológicas y agrícolas.

Área de aplicación industrial: Agroindustria y materiales.

Enviado: 29 enero 2021
Aceptado: 22 abril 2021

Abstract

Microorganisms can produce a great diversity of compounds through specific biosynthetic pathways; being polymers those with the most scientific and technologic importance. Compared to synthetic polymers, microbial polymers have unique properties like biocompatibility, biodegradability, mechanical resistance, gelling capacity, flexibility, thermal stability, among others. Moreover, most of them have a low cost and are easy to operate. Due to their characteristics, microbial polymers are greatly used in a wide variety of applications, including the agro-industrial sector, where they would have the ability to solve problems related to pests and pathogens control, soils, and crops treatments, improving the efficiency of pesticides and herbicides, contributing to the proper application of sustainable agriculture. In this review, some of the most relevant microbial polymers are described, as well as their main agro-industrial applications.

Key words: Agro-industrial, microbial, polymer.

Resumen

Los microorganismos son capaces de producir una gran diversidad de compuestos mediante vías de biosíntesis específicas, siendo los polímeros de los de mayor importancia científica y tecnológica. A diferencia de los polímeros sintéticos, los polímeros de origen microbiano son compuestos con propiedades únicas de biocompatibilidad, biodegradabilidad, resistencia mecánica, capacidad de gelificación, flexibilidad y estabilidad térmica, entre otros; además, la mayoría de ellos son de bajo costo y sencillos de manejar. Debido a sus características son ampliamente utilizados en gran variedad de aplicaciones, incluyendo el sector agroindustrial, donde tendrían la capacidad de resolver problemáticas relacionadas con control de plagas y patógenos, tratamiento en suelos y cultivos, mejoramiento de la eficiencia de pesticidas y herbicidas contribuyendo en la adecuada aplicación de la agricultura sostenible. En el presente documento de revisión, se describen algunos de los polímeros microbianos de mayor relevancia, así como sus principales aplicaciones agroindustriales.

Palabras clave: Polímero, microbiano, agroindustrial.

Introducción

El aumento acelerado en la población mundial ha obligado a desarrollar nuevas tecnologías que simplifiquen las actividades cotidianas, favoreciendo el crecimiento económico global. Sin embargo, muchas de estas actividades han afectado radicalmente al ambiente. El impacto antropogénico es uno de los principales generadores de contaminación ambiental, ocasionando daños irreversibles principalmente en áreas como la agricultura y la salud pública. Un ejemplo de esto es el uso excesivo de polímeros sintéticos (debido a la versatilidad de los mismos) en una vasta variedad de aplicaciones, lo que genera un desgaste ambiental a lo largo de todo su ciclo de obtención; desde la síntesis de monómeros, transformación del material polimérico y finalmente su eliminación. Esto, ocasiona anualmente la acumulación de 400 millones de toneladas de residuos que el planeta difícilmente puede biodegradar y se espera que esta cifra sea cuatro veces mayor en el año 2050 [1, 2, 3]. El uso de este tipo de materiales se ha extendido para casi todas las necesidades básicas de la sociedad, desde el desarrollo de productos y maquinaria en la industria automotriz hasta la producción de alimentos en la agricultura [4].

Entre las aplicaciones más importantes de los materiales poliméricos se encuentra la del sector agroindustrial, con un 2 al 4% de la producción total de plástico utilizada en esta área. La cantidad estimada de residuos plásticos agrícolas está por encima de 5 millones de toneladas por año, cifra que se encuentra en aumento constante. La versatilidad de los materiales poliméricos les ha permitido participar en una gran variedad de aplicaciones en este sector, desde contenedores de productos plaguicidas, protección de cultivos expuestos a condiciones climáticas extremas, dispositivos de riego y uso eficaz de agua, en contribuyendo a mejorar la productividad de las prácticas agrícolas [5, 6]. A pesar de las ventajas que los materiales poliméricos proporcionan, los desechos plásticos derivados de la industria agrícola contribuyen en gran medida al incremento de la contaminación ambiental. Hasta el momento las alternativas de combate para este problema son diversas, ya que van desde la destrucción de residuos, hasta el reciclaje; sin embargo, estas alternativas tienden a

presentar desventajas económicas y ambientales, limitando su empleo [7, 8]. Por lo anterior, la necesidad de reducir el uso de polímeros sintéticos se ha vuelto de vital importancia, dando lugar a la búsqueda de nuevos polímeros que generen un menor impacto ambiental (sin la necesidad de implementar técnicas de reciclado), por lo que aquellos polímeros con un enfoque biodegradable se presentan como una gran alternativa biotecnológica. Este tipo de materiales se conocen como biopolímeros y derivan de fuentes biológicas, es decir, son producidos por organismos vivos como plantas y microorganismos [9, 10].

Uno de los principales retos en la agricultura moderna ha sido la búsqueda y el uso de productos bioactivos compatibles con el ambiente, por lo que el uso de biopolímeros en esta área puede presentarse como una alternativa directa de resolución [11]. Este documento se centrará en presentar una revisión de las aplicaciones más utilizadas de los biopolímeros en el ámbito agrícola, específicamente los biopolímeros de origen microbiano.

Polímeros en la agricultura

La plasticultura (uso de plásticos en la agricultura) comprende aquellas actividades agrícolas en las que los materiales poliméricos puedan ser aplicados y cuyo propósito principal sea el mejoramiento del proceso en cuestión. En 1957, el investigador Emery Emmert (conocido como el padre de la plasticultura), fue pionero en utilizar coberturas plásticas para la producción de hortalizas, evaluando el impacto de estas sobre la temperatura del suelo, retención de humedad y rendimiento vegetal [12]. Los materiales poliméricos; además de contar con notables propiedades fisicoquímicas y mecánicas, tienen como ventajas adicionales su bajo costo y facilidad de manejo [13]. Dentro de los polímeros más utilizados en la agricultura se encuentran el polietileno (PE), polipropileno (PP), copolímero de etileno y acetato de vinilo (EAV) y policloruro de vinilo (PCV), entre otros [14].

Algunas de las aplicaciones de mayor importancia de los polímeros en la agricultura son los sistemas de riego, dispositivos de recolección, almacenamiento y transporte de cultivos, redes de sombreado, invernaderos, por mencionar algunos [14]. Este tipo de aplicaciones permite a las pequeñas, medianas y grandes empresas agroindustriales un aumento en su producción, mejorando sus procesos y disminuyendo las pérdidas que se hubieran presentado de no haber utilizado este tipo de tecnologías.

Con las ventajas que los materiales poliméricos proporcionan en el sector agroindustrial, se puede estimar que existirá un incremento en la demanda de los plásticos en la agricultura; sin embargo, a pesar de la proyección futura de esta aplicación, también se ha reportado que estos materiales no son eliminados de manera apropiada. Generalmente, la eliminación de los residuos poliméricos se realiza en rellenos sanitarios, mediante incineración o reciclaje. No obstante, con frecuencia, estas técnicas no son aplicadas de manera correcta, lo cual conlleva a la liberación de contaminantes tóxicos al ambiente [14, 15]. La búsqueda de nuevas alternativas que disminuyan el impacto negativo que los polímeros sintéticos presentan, es de gran importancia. Una de estas alternativas es el uso de polímeros derivados de fuentes naturales también conocidos como biopolímeros.

Polímeros microbianos y sus aplicaciones agroindustriales

Los biopolímeros pueden ser clasificados de diversas maneras, de acuerdo con su unidad monomérica, degradabilidad y fuente de

extracción. Dentro de esta última clasificación, se encuentran los biopolímeros derivados de plantas, animales o microorganismos [16]. Diversos microorganismos como bacterias, arqueas, hongos y algas, producen intra y extracelularmente diversos grupos de macromoléculas biológicas, tales como polisacáridos, poliésteres y poliamidas, los cuales son denominados biopolímeros o polímeros microbianos (Figura 1) [17, 18].



Figura 1. Clasificación de polímeros microbianos [18].

Los polímeros producidos por microorganismos son en su mayoría polisacáridos naturales, no tóxicos y biodegradables que cubren la superficie de las células, brindándole diversas cualidades biológicas como: mecanismos de respuesta inmune, adhesión y capacidad infectiva [19]. Generalmente, la producción de polímeros microbianos requiere de un proceso de fermentación, en el cual el polímero se acumula como material de reserva de carbono y energía que pueden ser utilizados por los microorganismos, normalmente esto ocurre bajo condiciones de carencia nutricional [20, 21]. La polimerización inducida por microorganismos es la base para la producción de plásticos biodegradables y aunque ha sido ampliamente estudiada, el uso de estos materiales como una estrategia comercial es un tema relativamente reciente de la llamada química verde [22, 23]. Los polímeros biodegradables han sido poco utilizados en la agricultura, sin embargo, tienen el potencial de ofrecer ventajas específicas en esta industria. Algunas de las aplicaciones agrícolas que se pueden resaltar son: desarrollo de tuberías de riego, invernaderos y almacenamiento.

El uso de este tipo de materiales se presenta como una alternativa biotecnológica debido a que podrían conservar la humedad reduciendo el riego del cultivo, tendrían la capacidad de disminuir el crecimiento de malezas y aumentar la temperatura del suelo, lo cual limitaría la competencia por los nutrientes, aminorando los costos de los fertilizantes; Además, también podrían utilizarse para la protección de cultivos bajo condiciones climáticas adversas [24, 25]. Otra de las grandes aplicaciones de los polímeros microbianos en la agricultura es el uso de películas biodegradables para la solarización, las cuales ofrecen ciertas ventajas que no tienen las películas no biodegradables, siendo la principal ventaja que una película biodegradable no se tiene que retirar de la tierra después de haberse utilizado [26].

Algunos de los polímeros de origen microbiano y una revisión detallada de sus

aplicaciones en la agricultura se describen a continuación.

Polisacáridos

Alginato

Los alginatos son polisacáridos iónicos lineales ampliamente utilizados en la industria y en la medicina. Están compuestos de dos monómeros, los ácidos β-D-manurónico (M) y α-L-gulurónico (G), unidos entre sí por enlaces 1,4 (Figura 2) [27]. En la mayoría de los casos es utilizado en forma de gel, el cual se forma mediante la unión del ácido algínico a cationes como calcio, sodio o magnesio creando así redes tridimensionales [28, 29, 30].

Actualmente, los alginatos comerciales se obtienen a partir de algas marinas pardas, pero el polímero también es producido por bacterias de los géneros *Pseudomonas* y *Azotobacter* [31] (Tabla 1). El gel producido por los organismos, una vez secado, se denomina aerogel y se encuentra entre los materiales de densidad más baja conocida. Los aerogeles se han utilizado ampliamente en aislamientos térmicos, en las industrias alimentarias y farmacéuticas, así como en biomedicina [30, 12, 33, 34] (Tabla 1).

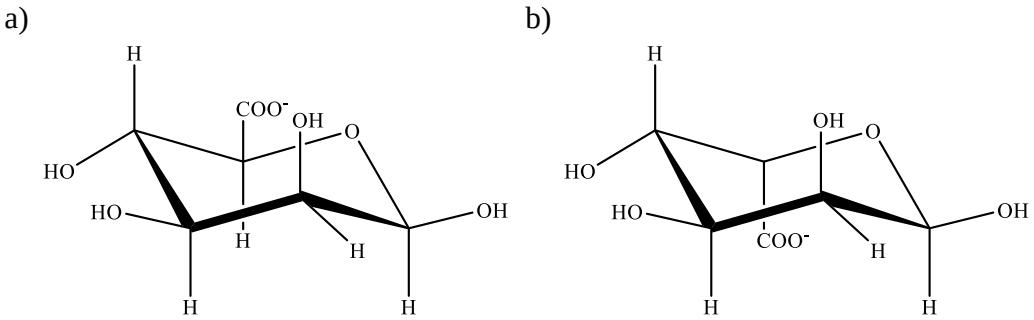


Figura 2. Estructura química de alginato: a) monómero ácido β-D-manurónico (M) y b) monómero ácido α-L-gulurónico (G) [27]. Software: Chem Draw Professional 15.

Una de las aplicaciones más importantes del alginato en la agricultura, es como acondicionador de suelo, ya que, como hidrogel, tiene la capacidad de retener grandes cantidades de agua, aportando humedad al suelo [29]. Otra valiosa aplicación del alginato en la agricultura es como material para la preparación de dispositivos de liberación de ingredientes activos en el campo. En 2020, Sathisaran y Balasubramanian [34], realizaron la preparación de complejos biopoliméricos de quitosano y gelatina, utilizando el alginato como agente de fortalecimiento y encapsulación del fertilizante, urea. Estos sistemas, contribuyeron a la preservación de la fertilidad del suelo a través de la liberación controlada de urea. Por otro lado, Santos y colaboradores [35], utilizaron alginato para la preparación de películas biodegradables para favorecer el crecimiento de cultivos, la calidad de las frutas y mejorar el aprovechamiento del agua. En definitiva, las películas biodegradables de alginato son una opción prometedora para reducir el uso de polímeros sintéticos en la agricultura.

Celulosa bacteriana

La celulosa (Figura 3) [36] es el biopolímero natural más abundante en la naturaleza, dotado de propiedades únicas, por lo que podría ser un punto de partida ideal para su transformación en materiales con aplicaciones multidisciplinarias. La celulosa está presente en una amplia variedad de especies vegetales como el algodón [37] y se puede producir a partir de microorganismos. A este tipo de polímero se le conoce como

celulosa bacteriana, la cual se produce extracelularmente en forma de nano fibras por bacterias de los géneros *Acetobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Rhizobium* y *Agrobacterium*, entre otras [38] (Tabla 1). Siendo *Acetobacter xylinum***,** renombrado a *Gluconacetobacter xylinus* el más investigado y el que mayor rendimiento genera [39].

Se ha demostrado que la celulosa bacteriana tiene una fórmula química similar a la de la celulosa de las plantas, pero con propiedades físicas únicas, tales como la elevada capacidad de absorción de agua. La celulosa se ha utilizado ampliamente en el área biomédica específicamente en la ingeniería de tejidos, así como en la purificación de sustancias químicas, en la industria de los alimentos como recubrimientos para envasado, etc. [40] (Tabla 1).

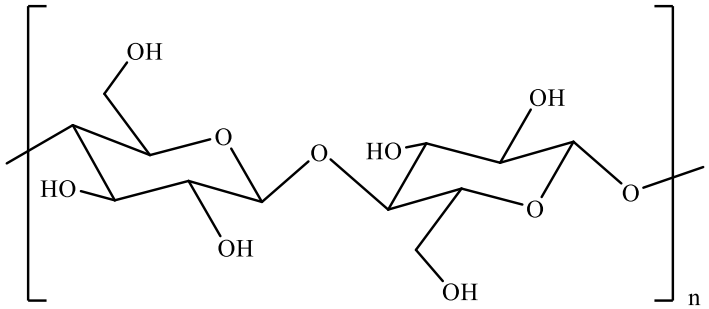


Figura 3. Estructura química de la celulosa [36]. Software: Chem Draw Professional 15.

Dentro de las aplicaciones agroindustriales de la celulosa se encuentra la relacionada con los alimentos y su envasado. Kwak y colaboradores [41], reportaron la preparación de películas comestibles utilizando nanofibras de celulosa carboximetiladas. Las películas comestibles fueron utilizadas con la finalidad de recubrir una fruta perecedera (fresa) para prolongar el tiempo de almacenamiento y su vida útil, manteniendo la frescura del fruto. El uso de biopolímeros como la celulosa, es una opción biodegradable muy prometedora para el envasado de alimentos ya que podría reducir en gran medida el uso de empaques poliméricos sintéticos. Xie y colaboradores [42], desarrollaron empaques biodegradables a base de cáscara de patata, utilizando como agente de refuerzo, celulosa bacteriana obtenida a partir de *Gluconacetobacter hansenii*. La celulosa bacteriana presenta propiedades mecánicas adicionales como fuerza tensil y capacidad de retención de agua en comparación con la celulosa extraída de las plantas, lo cual potencia su aplicación en el desarrollo de películas y empaques para alimentos.

Pululano

El pululano es un homopolisacárido formado principalmente de maltotriosa (Figura 4) [43]. También se conoce como α-1,4- y α-1,6-glucano que consiste en 0,6% de maltotetraosa. Este polímero es formado por un hongo dimórfico (Tabla 1). La estructura del pululano está compuesta de unidades repetitivas de maltotriosa unidas a través de enlace (1-6) usando un residuo de glucosa terminal del trisacárido [23]. La producción de pululano varía con las condiciones de cultivo y del tipo de cepa microbiana que se utiliza, sin embargo, se ha observado que la concentración puede disminuir debido a la producción de pululanasa en el medio [44]. El pululano tiene propiedades adhesivas aplicadas durante la formación de fibras y películas impermeables utilizadas para el propósito de conservación, las cuales se

utilizan para el revestimiento de envases de alimentos para la conservación de frutas y verduras perecederas, así como en los sectores biomédico y farmacéutico [45, 23] (Tabla 1).

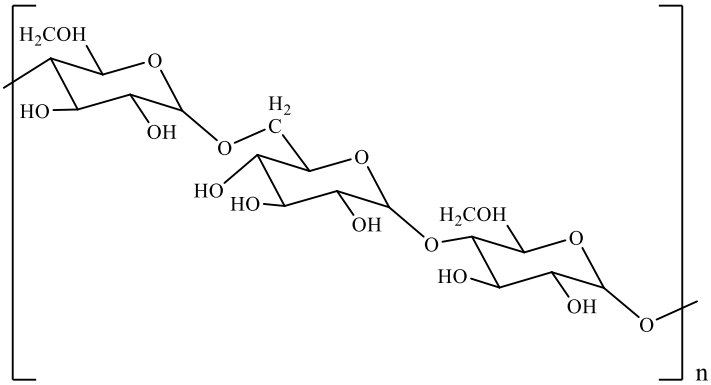


Figura 4. Estructura química del pululano [43]. Software: Chem Draw Professional 15.

Agroindustrialmente, el pululano ha sido utilizado para realizar recubrimientos en alimentos que de igual manera que los polisacáridos mencionados anteriormente, es una alternativa biodegradable para mejorar la vida útil de los alimentos. Chu y colaboradores [46], reportaron la preparación de nanoemulsiones de pululano cargadas con aceite esencial de canela como recubrimiento de fresas frescas; los autores evaluaron el efecto de los recubrimientos en el fruto, expuesto a seis días de almacenamiento, revelando que las nanoemulsiones tendrían gran potencial para alargar la vida útil del fruto ya que se redujo notablemente la pérdida de masa, firmeza y acidez del mismo. Algunas de las propiedades más importantes por las que el pululano es ampliamente utilizado para la preparación de películas y recubrimientos para alimentos se debe a que no es toxico ni mutagénico, es incoloro e inodoro, promueve la retención de sabores, es resistente a aceites y grasas y además crea una barrera contra el oxígeno. Priyadershi y colaboradores [47], prepararon películas comestibles para envasado de alimentos utilizando mezclas de pectina y pululano en diversas proporciones, encontrando que a medida que aumentaba el contenido de pululano se formaba una película más densa, pero mantenía flexibilidad y aumentaba la barrera de vapor de agua, mostrando estabilidad térmica e hidrofobicidad superficial.

Xantano

La goma de xantano o goma xantana es un exopolisacárido aniónico microbiano producido por *Xanthomonas campestris* (Tabla 1). Es un hetero-polisacárido con unidades repetidas de pentasacárido que consta de dos estructuras moleculares de glucosa, manosa y una unidad de ácido glucurónico (Figura 5) [23, 48, 49, 50]. Generalmente, la goma xantana se usa en la industria alimenticia, farmacéutica, cosmética, agrícola, textil, cerámica y petrolera [51, 52] (Tabla 1). Actualmente, la producción industrial de esta goma se realiza mediante un sistema de fermentación utilizando glucosa y sacarosa como fuente de carbono [51, 53]. La tendencia a utilizar materiales de bajo costo para la producción de la goma xantana ha tomado auge en la última década, siendo los residuos de la pulpa de remolacha azucarera, la pulpa de tapioca, el residuo de jugo de manzana, el extracto de castaño y el suero de queso, algunos de los más representativos [49, 54].

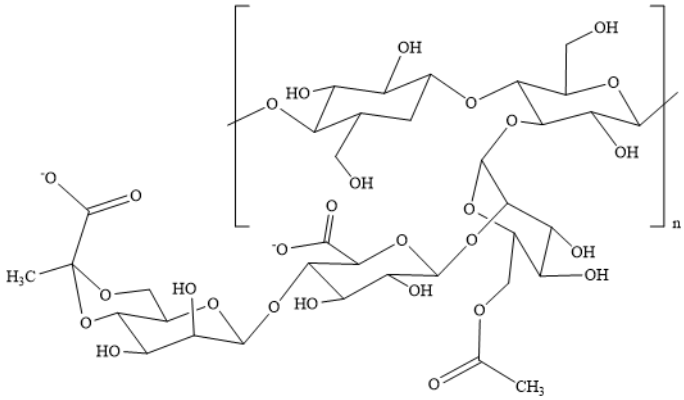


Figura 5. Estructura química del xantano [23]. Software: Chem Draw Professional 15.

La goma xantana es altamente estable en un amplio intervalo de temperatura, pH y fuerza iónica; además actúa como un eficiente espesante, aumentando la viscosidad de la disolución, incluso agregando bajas concentraciones del polímero [55]. Las propiedades mencionadas anteriormente, hacen de la goma xantana un polímero con gran variedad de aplicaciones. En cuanto a sus aplicaciones agroindustriales, se encuentran aquellas relacionadas con el mantenimiento de suelos. En 2020, Joga y Varaprasad [56], aplicaron goma xantana a suelos dispersivos. Los suelos dispersivos son aquellos que en contacto con el agua son más susceptibles a la erosión, afectando presas de agua y canales de riego, siendo los biopolímeros una alternativa de bajo costo, biodegradable y sostenible para el ambiente. La evaluación de suelos tratados con goma xantana demostró durabilidad al ser expuestos a ciclos de humedad y secado, mostrando un efecto significativo sobre la degradación y resistencia del suelo.

Levano

El levano es un polisacárido inusual no estructural producido por varios microorganismos (Tabla 1) y también está presente en algunas especies de plantas. Consiste casi exclusivamente en residuos fructosilados conectados a través de los carbonos 2 y 6, y se ensambla en formas esféricas, de tamaño nanométrico, dotándolo de una viscosidad intrínseca notablemente baja y una estabilidad mayor que la de sus homólogos lineales (Figura 6) [57, 58, 59, 60] Comercialmente, la producción de levano se realiza mediante sistemas de fermentación utilizando especies del género de *Bacillus* (Tabla 1), siendo este género el que mejor rendimiento ha presentado [23, 61, 62]. La combinación única de propiedades que distinguen al levano, como su viscosidad, capacidad adhesiva y actividad inmunogénica de la mayoría de otros polisacáridos ha atraído mucho la atención. Sin embargo, su uso comercial se ha visto limitado, siendo el mercado de la biomedicina y el farmacéutico los que se han beneficiado más de este polímero [60] (Tabla 1).

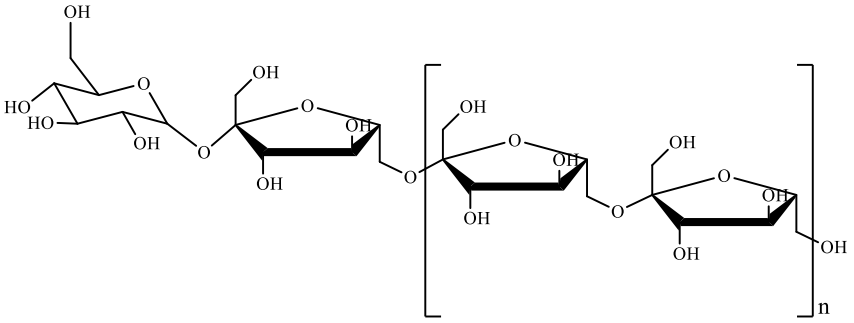


Figura 6. Estructura química del levano [57]. Software: Chem Draw Professional 15.

Gelano

El gelano o goma gelana es un polisacárido bacteriano extracelular aniónico compuesto de unidades repetitivas de tetrasacáridos de dos residuos de -D-glucosa, uno de -D-glucuronato y uno de -L-ramnosa (Figura 7) [63, 64]. Gracias a sus convenientes propiedades físico-químicas, la goma gelana se ha aplicado ampliamente en la industria de los alimentos, materiales de recubrimiento, la medicina y cosméticos [64, 65, 66] (Tabla 1). Este polisacárido es producido a nivel industrial por bacterias (Tabla 1) usando un proceso de fermentación a través del método de inmersión y usando almidón de maíz como fuente de sustrato [67, 68, 69].

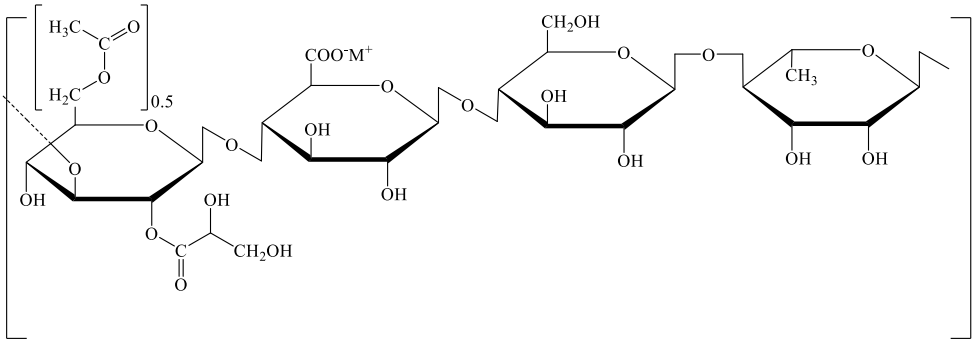


Figura 7. Estructura química del gelano [63]. Software: Chem Draw Professional 15.

Dentro de las aplicaciones agroalimentarias de la goma gelana se encuentra la preservación de alimentos mediante la preparación de películas inteligentes. Así, Wu y colaboradores [70], reportaron el uso de goma gelana para la preparación de películas inteligentes donde incorporaron *Clitoria ternatea*; extracto que actúa como indicador colorimétrico por cambios de pH y es utilizado principalmente en el mantenimiento de la frescura de los mariscos. Lo anterior se realizó mediante la incorporación Por su parte, Zhang y colaboradores [71], utilizaron la goma gelana para la preparación de nanoemulsiones cargadas con hasta 6% de aceite esencial de tomillo y mediante la técnica de multicapa dar lugar a la formación de empaques alimenticios antimicrobianos. Las películas realizadas mediante esta técnica mostraron una mejora en las propiedades mecánicas, en el bloqueo de luz ultravioleta y una mayor actividad antimicrobiana sobre *E. coli*, siendo de gran potencial para su uso en aplicaciones agroalimentarias.

Poliésteres

Poli hidroxialcanoatos (PHAs)

Los PHAs son bio-poliésteres producidos por diferentes géneros de bacterias utilizando diversas fuentes de carbono. Estos polímeros se acumulan en las células bajo la forma de

gránulos de carbono, utilizados como almacenamiento de energía [72, 73]. Los PHAs están compuestos de monómeros de ácidos 3-hidroxialcanoicos, y pueden presentar diferentes grupos laterales y número de carbonos en la unidad repetitiva (Figura 8) [74].

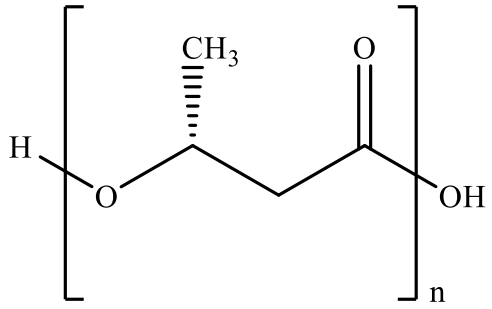


Figura 8. Estructura química de los PHAs [23]. Software: Chem Draw Professional 15.

Los PHAs pueden ser producidos por una mezcla de cultivos microbianos ya sean puros o mixtos, los cultivos puros son asociados con los mejores rendimientos de proceso y productividades de PHA, ya que son elegidos por su alta capacidad de almacenamiento y de alta densidad celular [75]. Generalmente la producción de PHAs a escala industrial se ha realizado mediante el uso de bacterias Gram-negativas [76] (Tabla 1). Hasta el momento, se conocen una gran variedad de compuestos utilizados como substrato para la producción de este polímero, de entre los cuales destacan los carbohidratos como glucosa y celulosa, lignina, proteínas y lípidos. Estos se pueden obtener a partir de desechos agroindustriales en la producción de caña de azúcar y maíz [77]. Los PHAs cuentan con una amplia gama de usos en el sector de la biomedicina, embalajes, ingeniería de tejidos, y farmacéutica, con alto potencial en el área agrícola [78].

Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (Figura 9) [79] es un poliéster alifático biocompatible y biodegradable, derivado de fuentes renovables como almidón y caña de azúcar. Es producido por la polimerización de ácido láctico y a nivel industrial se realiza a través de la polimerización de ácido láctico o por la apertura de anillo de la lactida, el cual es un dímero cíclico del ácido láctico [10, 80]. Por otra parte, puede ser producido a partir de recursos naturales renovables no fósiles, por medio de una fermentación de un polisacárido, por ejemplo, carbohidratos del maíz, patata, melaza de caña, remolacha, entre otros [81, 82]. Las propiedades de este polímero dependen primordialmente de su peso molecular y grado de cristalinidad. Por lo general, el PLA es altamente transparente, es fácil de manejar y presenta resistencia a diferentes cambios de clima [10].

Los microorganismos más utilizados en la producción de este polímero han sido bacterias especiales del género *Lactobacillus* (Tabla 1), las cuales se utilizan bajo condiciones de un intervalo de pH 5,4 a 6,4, un intervalo de temperatura 38-42 °C, y una baja concentración de oxígeno [25]. Los nutrientes que se utilizan para alimentar a las bacterias pueden ser azúcares simples, como la glucosa y la maltosa a partir de maíz y de patata o de otras fuentes, como vitamina B, aminoácidos y nucleótidos proporcionados por licor de maíz fermentado. Sin embargo, en los últimos años se han buscado nuevas alternativas como fuentes de carbono de origen biológico, como pude ser la biomasa celulósica no alimentaria, residuos agroindustriales, cultivos no alimentarios, entre otros [83]. Durante el siglo pasado los principales usos de PLA se limitaron a aplicaciones médicas (Tabla 1) debido a su alto costo, baja disponibilidad y peso molecular limitada. Sin embargo, se han desarrollado nuevos métodos de obtención que han abaratado su producción y han ampliado sus aplicaciones [84].

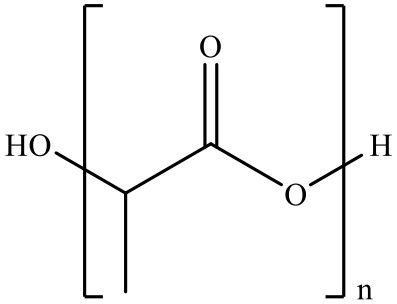


Figura 9. Estructura química del PLA [79]. Software: Chem Draw Professional 15.

Una de las aplicaciones de mayor importancia del PLA es el sector agroindustrial ya que en los últimos años ha aumentado significativamente la acumulación de residuos poliméricos sintéticos utilizados en acolchado y túneles para cultivos, generando contaminación de agua y suelos; en este sentido, García y colaboradores [85], reportaron la preparación de películas de PLA con la finalidad de utilizarlas en aplicaciones agroindustriales generando menor impacto negativo al ambiente, ya que las películas de PLA tendrían la capacidad de degradarse directamente en el suelo mediante la acción de bacterias, hongos y algas. Los autores utilizaron aceite de karanja, un insecticida orgánico que además actúa como plastificante, mejorador de algunas propiedades del PLA; se comprobó que utilizando solo el 5% de aceite de karanja, mejorando las propiedades mecánicas en un 77% y que todas las películas de PLA evaluadas en condiciones de descomposición se degradaron. Otra de las aplicaciones que llama poderosamente la atención acerca del PLA es que ha sido utilizado para sintetizar nanocapsulas para la encapsulación de diferentes compuestos con actividad biológica. En 2020, Antonioli y colaboradores [86], encapsularon aceite esencial de limón en un 99% en nanocapsulas de PLA para su aplicación en alimentos poscosecha, ya que se ha reportado que los aceites esenciales poseen actividad anti fúngica. Los autores evaluaron las nanocapsulas en manzanas poscosecha y reportaron que existía una potencialización del efecto del aceite esencial cuando este estaba encapsulado, mostrando lesiones de pudrición tres veces más pequeñas en comparación con el aceite aplicado en su forma libre y el tratamiento control.

Poliamidas

Ácido poliglutámico (PGA)

El ácido poliglutámico (PGA) (Figura 10), es un polímero aniónico natural que es biodegradable, comestible, y no tóxico para el humano y el ambiente. Se ha sugerido que es un buen candidato para diversas aplicaciones industriales en el sector alimenticio, farmacéutico, biorremediación y regeneración de tejidos [87, 88] (Tabla 1). El PGA es generalmente producido por bacterias pertenecientes al género *Bacillus* [88] (Tabla 1).

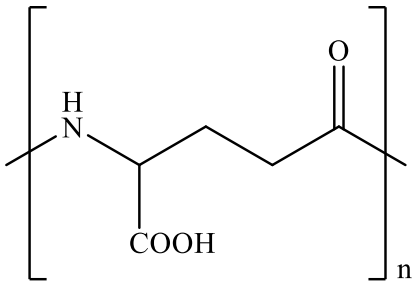


Figura 10. Estructura química del PGA [87]. Software: Chem Draw Professional 15.

Algunas de las aplicaciones agroindustriales del PGA han sido como material para la preparación de nanoparticulas como sistemas de encapsulación de compuestos activos de interés biológico. En 2018, Liang y colaboradores [89], utilizaron este polímero en conjunto con el polisacárido quitosano para preparar nanoparticulas y encapsular el bio- nematicida avermectina; lo anterior con la finalidad de aplicar estos sistemas en el árbol de pino, el cual sufre ampliamente enfermedades causadas por nematodos. Además, la excesiva aplicación de este nematicida provoca elevadas pérdidas de

producto y contaminación ambiental. Los autores reportaron una eficiencia de encapsulación de avermectina en las nanoparticulas de 30.5% con lo cual lograron obtener una tasa de mortalidad de nematodos de 98.6% notablemente superior al 69.9% obtenido con la aplicación del nematicida libre. Por lo tanto, las nanoparticulas de PGA para la encapsulación de compuestos activos como nematicidas, tienen gran potencial para el control o reducción de plagas en la agricultura. De igual manera este tipo de nanoparticulas también han sido utilizadas para la encapsulación de reguladores de crecimiento vegetal. En 2017, Pereira y colaboradores [90], encapsularon 61% de ácido giberélico en nanoparticulas de PGA producido por la cepa *Bacillus licheniformis* y quitosano. El ácido giberélico ha sido utilizado para mejorar la germinación y el desarrollo de las plantas. Los autores encontraron que al evaluar las nanoparticulas en semillas de *Phaseolus vulgaris* la tasa de germinación se mejoró en un 50-70% en comparación con la aplicación de la hormona en su forma libre (10-16%). Además, la hormona encapsulada en las nanoparticulas de PGA-quitosano también mostró una mayor eficiencia que la hormona libre en el aumento del área foliar y el desarrollo de raíces, demostrando así que este tipo de sistemas son potencialmente favorables para su uso en el sector agroindustrial.

Tabla 1. Aplicaciones agroindustriales de polímeros microbianos.

Microorganismo	Polímero microbiano	Aplicaciones convencionales	Aplicaciones agroindustriales	Referencias
Alcaligenes eutrophus, Alcaligenes latus, Ralstonia eutropha, Pseudomonas extorquens y *Pseudomonas oleovorans, Azotobacter vinelandii* recombinante y *Escherichia coli* recombinante	Poli hidroxialcanoatos (PHAs)	Envases, botellas maquinillas de afeitar desechables, vasos, cuchillos y tenedores, forros de pañales, andamios biológicos para la regeneración de tejidos, portadores de fármacos o como material para implantes y sistemas de liberación controlada, injertos de tejidos, implantes biocompatibles y no inmunogénicos, y portadores micro o nanométricos de fármacos	Películas biodegradables de acolchado, herbicidas, insecticidas, e inoculantes bacterianos. Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[76, 78, 91, 92, 93, 94, 95]
Lactobacillus delbrueckii, L. amylophilus, L. bulgaricus y *L. leichmannii*	Ácido poliláctico (PLA)	Dispositivos de implante de tejidos	Películas biodegradables para la solarización, cinta plástica para la protección del suelo, para control de malezas, y retención de fertilizantes, macetas biodegradables y compostables, y en la biorremediación del suelo. Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[25, 84, 96, 97, 98]
B. licheniformis, B. subtilis, B. megaterium, b. pumilis, B. mojavensis y *B. amyloliquefaciens*	Ácido poliglutámico (PGA)	Espesante, crioprotector, material de liberación sostenida, portador de medicamentos, adhesivo biológico curable, es capaz de desarrollar fibras biodegradables, hidrogeles altamente absorbentes, floculantes de biopolímero y absorbentes de metales pesados	Aumento del peso seco, altura y numero de brotes en cultivos agrícolas. Potencial aplicación para el desarrollo de hidrogeles altamente absorbentes de agua y en la biorremediación de	[87, 88, 99]

			suelos y agua contra metales pesados.	
Pseudomonas spp. y *Azotobacter vinelandii*	Alginato	Espesantes, regeneradores de tejidos, retenedores de agua, formadores de gel y películas a partir de una serie de reacciones químicas de intercambio iónico (iones sodio por cationes divalentes), micro y/o nano encapsulados de fármacos.	Películas, recubrimientos y embalajes para frutas y vegetales. Potencial aplicación para el desarrollo de hidrogeles altamente absorbentes de agua, micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[30, 32, 33, 45, 100, 101, 102]
Acetobacter xylinum, Aerobacter, Acetobacter xylinum, Alcaligenes, Rhizobium, y *Agrobacterium*	Celulosa bacteriana	Regeneración de piel (quemaduras, heridas y ulceras), regeneración de tejido óseo, desarrollado de biosensores electroquímicos para la detección de lactato en sudor, matrices para inmovilizar enzimas, andamios para la proliferación y adhesión celular en 3D, y recubrimientos comestibles.	Películas, recubrimientos y embalajes para frutas y vegetales. Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[38, 40, 45, 102, 103, 104, 105].
Aureobasidium pullulans	Pululano	Recubrimientos comestibles, embalajes para alimentos, portador de genes y proteínas, regenerador del tejido de la piel, agente formador de películas para el recubrimiento de diversos fármacos, expansor de plasma, estabilizador de proteínas, y formador de andamios para ingeniería de tejidos.	Películas, recubrimientos y embalajes para frutas y vegetales. Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[23, 45, 102, 106, 107, 108]
Xanthomonas campestris	Xantano	Espesante, agente emulsionante, agente estabilizador, formador gel estable como matriz para fármacos de liberación controlada.	Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[48, 51, 52]
Bacillus spp	Levano	Regeneradores de tejidos, y micro y/o nano encapsulados de fármacos.	Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[23, 60]
Sphingomonas elodea (también denominado *Sphingomonas paucimobilis*)	Gelano	Agente estabilizante, espesante, emulsionante y gelificante.	Potencial aplicación para el desarrollo de micro y/o nano portadores de nutrientes para cultivos agrícolas y sistemas de liberación controlada, y matrices para injertos de tejidos vegetales.	[23, 64, 65, 66, 109, 110]

Conclusiones

Aunque las aplicaciones agroindustriales de los polímeros de origen microbiano han sido poco estudiadas, este tipo de materiales han tomado gran importancia debido a sus cualidades fisicoquímicas, las cuales son comparables o superiores a las de los polímeros obtenidos a base de materias primas fósiles, junto a su capacidad de biodegradación, de la cual carecen los

polímeros sintéticos. Por lo anterior, la búsqueda y aplicación de nuevos materiales poliméricos obtenidos a partir de microorganismos puede ser considerada como una nueva solución afín con los principios de la agricultura sostenible, que día a día toma mayor importancia y relevancia en el mercado económico mundial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por el apoyo financiero brindado para la realización de este estudio.

Literatura citada

1. González, Y., Meza, J., González, O., Córdova, J. (2013). Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29,1, 77-115. http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v29n1/v29n1a7.pdf.

2. Reddy, C., Ghai, K., Rashmi, R., Kalia, V. (2003). Polyhydroxyalkanoates: an overview. Bioresource Technology, 87, 2, 137-146. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00212-2.

3. Maraveas, C. (2020). Production of Sustainable and Biodegradable Polymers from Agricultural Waste. Polymers, 12, 5, 1127. https://doi.org/10.3390/polym12051127.

4. Frías, A., Ize, I., Gavilán, A. (2003). La situación de los envases de plástico en México. Gaceta Ecológica, 69,67-82. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906905.

5. Picuno, P. (2014). Innovative Material and Improved Technical Design for a Sustainable Exploitation of Agricultural Plastic Film. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 53. https://doi.org/10.1080/03602559.2014.886056.

6. Vox, G., Loisi, R., Blanco, I., Scarascia, G., Schettini, E. (2016). Mapping of Agriculture Plastic Waste. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 8, 583-591. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.080.

7. Arihilam, N., & Arihilam, E. (2019). Impact and control of anthropogenic pollution on the ecosystem – A review. Journal of Bioscience and Biotechnology Discovery, 4, 54-59. http://dx.doi.org/10.31248/JBBD2019.098.

8. Gross, R., Kalra, B. (2002). Biodegradable polymers for the environment. Science, 297, 803-807. https://doi.org/10.1126/science.297.5582.803.

9. Avérous, L., Poller, E. (2012). Biodegradable polymers. Environmental Silicate Nano-Biocomposites. Springer. New York. USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4108-2.

10. Mohan, S., Oluwafemi, O., Kalarikkal, N., Thomas, S., Songca, S. (2016). Biopolymers – Application in Nanoscience and Nanotechnology. Recent Advances in Biopolymers, 47-72. https://doi.org/10.5772/62225.

11. Ramírez, M., Rodríguez, A., Alfonso, L., Peniche, C. (2010). La quitina y sus derivados, biopolímeros con potencialidades de aplicación agrícola. Biotecnología Aplicada, 27,4, 262-269. http://scielo.sld.cu/pdf/bta/v27n4/bta02410.pdf.

12. Lamont, W. (2017). Plastic Mulches for the Production of Vegetable Crops. Plastics Design Library, 45-60.https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00003-8.

13. Orzolek, M. (2017). 1 – Introduction. Editor(s): Michael D. Orzolek, In Plastics Design Library, A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture, Elsevier, 1-20, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00001-4.

14. Shah, F., Wu, W. (2020). Use of plastic mulch in agriculture and strategies to mitigate the associated environmental concerns, 164, 231-287 https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.06.005 .
15. Stubenrauch, J., Ekardt, F. (2020). Plastic Pollution in Soils: Governance Approaches to Foster Soil Health and Closed Nutrient Cycles. Environments, 7, 38. https://doi.org/10.3390/environments7050038.
16. Ibrahim, S., Riahi, O., Said, S., Mohd, S., Mohd, F., Rozali, S. (2019). Biopolymers From Crop Plants. Materials Science and Materials Engineering. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11573-5.
17. Singh, M, Kumar P, Ray S, Kalia V. 2015. Challenges and opportunities for customizing polyhydroxyalkanoates. Indian Journal of Microbiology, 55, 234-249. https://doi.org/10.1007/s12088-015-0528-6.
18. Moradali, M., Rehm, B., Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials. Nat Rev Microbiol 18, 195–210 (2020). https://doi.org/10.1038/s41579-019-0313-3.
19. Kumara, S., Mody, K., Jha, B. (2007). Bacterial exopolysaccharides-a perception. Journal of Basic Microbiology, 47,103-117. https://doi.org/10.1002/jobm.200610203.
20. Donot, F., Fontana, A., Baccoua, A., Schorr, S. (2012). Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction. Carbohydrate Polymers, 87. 951-962. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.083.
21. Nicolaus, B., Kambourova, M., Toksoy, E. (2010). Exopolysaccharides from extremophiles: from fundamentals to biotechnology. Journal Environmental Technology, 31, 1145–1158. https://doi.org/10.1080/09593330903552094 .
22. Gasser, E., Ballmann, P., Droge, S., Bohnm, J., Konig, H. (2014). Microbial production of biopolymers from the renewable resource wheat Straw. Journal of Applied Microbiology, 117, 1035-1044. https://doi.org/10.1111/jam.12581.
23. Dake, M. (2015). Biodegradable Polymers: Renewable Nature, Life Cycle, and Applications. In: Kalia V, editors. Microbial Factories. New Delhi, Springer, 29-56. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2595-9_4.
24. Lambert, S. (2015). Biopolymers and Their Application as Biodegradable Plastics. In: Kalia V, editors. Microbial Factories. New Delhi, Springer, 1-11. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2595-9_1.
25. Castro, E., Iñiguez, F., Samsudin, H., Fang, X., Auras, R. (2016). Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 333-366. https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010.
26. Ekebafe, L., Ogbeifun, D., Okieimen, F. (2011). Polymer Applications in Agriculture. Biokemistri, 23,2,81 -89. http://www.bioline.org.br/bk.
27. Santacruz, I., Jiménez, M., Moreno, M. (2011). Nuevas aplicaciones de los alginatos en el conformado cerámico. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 44. Bol. Soc. Esp. Ceram., 44,1, 45-52 https://doi.org/10.3989/cyv.2005.v44.i1.402.
28. Liu Y, Tong Y, Wang S, Deng Q, Chen A. 2013. Influence of different divalent metal ions on the properties of alginate microcapsules and microencapsulated cells. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 67, 66-76, http://dx.doi.org/10.1007/s10971-013-3051-4.
29. Pereira. L. & Cotas. J. (2020). Introductory Chapter: Alginates - A General Overview, Alginates - Recent Uses of This Natural Polymer, Leonel Pereira,

IntechOpen, https://doi.org/10.5772/intechopen.88381.
30. Tkalec, G., Kranvogl, R., Perva, A., Knez, Z., Novak, Z. (2016). Optimisation of critical parameters during alginate aerogels' production. Journal of Non-Crystalline Solid, 443, 112-117. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.04.014.
31. Maleki, S., Mærk, M., Hrudikova, R., Valla, S., Ertesvåg, H. (2017). New insights into *Pseudomonas fluorescens* alginate biosynthesis relevant for the establishment of an efficient production process for microbial alginates. New Biotechnology, 37, 2-8. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.08.005.
32. Veronovski, A., Tkalec, G., Knez, Z., Novak, Z. (2014). Characterisation of biodegradable pectin aerogels and their potential use as drug carriers. Carbohydrate Polymers, 113, 272–278. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.054.
33. Balyura, M., Gelfgat, E., Ehrhart, M., Ludwig, B., Gendler, Z., Barkai, U., Zimerman, B., Rotem, A., Block, N., Schally, A., Bornstein, R. (2015). Transplantation of bovine adrenocortical cells encapsulated in alginate. PNAS, 112, 2527-2532. https://doi.org/10.1073/pnas.1500242112.
34. Sathisaran, I., Balasubramanian, M. (2020). Physical characterization of chitosan/gelatin-alginate composite beads for controlled release of urea. Heliyon, 6,11, e05495. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05495.
35. Santos, N., Ragazzo, G., Cerri, B., Soares, M., Kieckbusch, T., Silva, M. (2020). Physicochemical properties of konjac glucomannan/alginate films enriched with sugarcane vinasse intended for mulching applications. International journal of biological macromolecules, 165, Part B, 1717-1726. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.049.
36. Manoukian, O., Sardashti, N., Stedman, T., Gailiunas, K., Ojha, A., Penalosa, A., Mancuso, C., Hobert, M., Kumbar, S. (2018). Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. Encyclopedia of Biomedical Engineering, 462-482. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.64098-9.
37. Gomes, H., da Silva, R., da Silva, H., Tercjak, A., Gutierrez, J., Rogério, W., de Oliveira, B., Ribeiro, S. (2016). Multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. Carbohydrate Polymers, 153, 406-420. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.059.
38. El-Saied, H., Basta, A., Gobran, R. (2004). Research progress in friendly environmental technology for the production of cellulose products (Bacterial Cellulose and its Application). Polymer-Plastics Technology and Engineering, 43, 3, 797-818. https://doi.org/10.1081/PPT-120038065.
39. Ul-Islam, M., Khan, T., Park, J. (2012). Water holding and release properties of bacterial cellulose obtained by in situ and ex situ modification. Carbohydrate Polymers, 88, 596-603. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.01.006.
40. Chang, C., Zhang, L. (2011). Cellulose-based hydrogels: Present status and application prospects. Carbohydrate Polymers, 84, 40-53. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.023.
41. Kwak, H., Shin, S., Kim, J., Kim, J., Lee, D., Lee, H., Lee, E., Hyun, J. (2021). Protective coating of strawberries with cellulose nanofibers. Carbohydrate Polymers, 258, 117688. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117688.
42. Xie, Y., Niu, X., Yang, J., Fan, R., Shi, J., Ullah, N., Feng, X., Chen, L. (2020). Active biodegradable films based on the whole potato peel incorporated with bacterial

cellulose and curcumin. International Journal of Biological Macromolecules. 150. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.291.
43. Yang, J., Sato, T. (2020). Micellar Structure of a Hydrophobically Modified Pullulan in an Aqueous Solution. Macromolecules 53, 18, 7970-7979. https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c01319.
44. Pollock, T., Throne, L., Armentrout, R. (1992). Isolation of new *Aureobasidium* strains that produce high-molecular-weight pullulan with reduced pigmentation. Applied and environmental microbiology, 58, 3, 877–883. https://doi.org/10.1128/AEM.58.3.877-883.1992.
45. Sakata, Y., Otsuka, M. (2009). Evaluation of relationship between molecular behaviour and mechanical strength of pullulan films. International Journal Pharmaceutics, 374, 33-38. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.02.019.
46. Chu, Y., Gao, C., Liu, X., Zhang, N., Xu, T., Feng, X., Yang, Y., Shen, X., Tang, X. (2020). Improvement of storage quality of strawberries by pullulan coatings incorporated with cinnamon essential oil nanoemulsion. LWT., 122, 109054. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109054.
47. Priyadarshi, R., Kim, S., Rhim, J. (2021). Pectin/Pullulan blend films for food packaging: effect of blending ratio. Food Chemistry, 347, 129022. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129022.
48. Dragoljub, B., Starosvetsky, J., Armon, R. (2016). Preparation of biodegradable xanthan–glycerol hydrogel, foam, film, aerogel and xerogel at room temperature. Carbohydrate Polymers, 148, 243-250. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.058.
49. Panyu, L., Ting, L., Yu, Z., Xiang, L., Xiaolong, J., Yabo, W., Tonghui, X., Yongkui, Z. (2015). Biosynthesis of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* LRELP-1 using kitchen waste as the sole substrate. Carbohydrate Polymers, 151, 684–691. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.017.
50. Gilani, S., Najafpour, G., Heydarzadeh, H., Zare, H. (2011). Kinetic models for xanthan gum production using Xanthomonas Campestris from molasses. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 17,2, 179-187. https://doi.org/10.2298/CICEQ101030002G.
51. Brunchi, C., Bercea, M., Morariu, S., Avadanei, M. (2016). Investigations on the interactions between xanthan gum and poly (vinyl alcohol) in solid state and aqueous solutions. European Polymer Journal, 84, 161-172. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.09.006.
52. Bhunia, T., Giri, A., Nasim, T., Chattopadhyay, D., Bandyopadhyay, A. (2013). Uniquely different PVA-xanthan gum irradiated membranes as transdermal diltiazem delivery device. Carbohydrate Polymers, 95, 252-261. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.043.
53. Gunasekar, V., Reshma, K., Treesa, R., Gowdhaman, G., Ponnusami, V. (2014). Xanthan from sulphuric acid treated tapioca pulp: influence of acid concentration on xanthan fermentation. Carbohydrate Polymers, 102, 669-673. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.006.
54. Druzian, J., Pagliarini, A. (2007). Xanthan gum production by fermentation from residue of apple juice. Food Science and Technology, 27,1, 26-31. https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000100005.
55. Petri, D. (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. Journal of Applied Polymer Science, 132, 23. https://doi.org/10.1002/app.42035.

56. Joga, J., Varaprasad, B. (2020). Long-term and durability properties of xanthan gum treated dispersive soils -An eco-friendly material. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.472.
57. Zhang, W., Xu, W., Ni, D., Dai, Q., Guang, C., Zhang, T., Mu, W. (2019). An overview of levan-degrading enzyme from microbes. Appl Microbiol Biotechnol. 103, 7891–7902. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10037-4.
58. Arvidson, S., Rinehart, B., Gadala, F. (2006). Concentration regimes of solutions of levan polysaccharide from Bacillus sp. Carbohydrate Polymers, 65, 144-149. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.12.039.
59. Srikanth R, Sundhar Reddy CHSS, Siddartha G, Ramaiah G, Uppuluri, KB. 2015. Review on production, characterization and applications of microbial levan. Carbohydrate Polymers, 120, 102–114. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.003.
60. Toksoy, E., Hernández, L., Combie, J. (2016). Review of Levan polysaccharide: From a century of past experiences to future prospects. Biotechnology Advances, 34, 5, 827-844. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.05.002.
61. De Oliveira, M., Ferreira, R., Batista, J., Colabone, M. (2007). Study of levan production by *Zymomonas mobilis* using regional low-cost carbohydrate sources. Biochemical Engineering Journal, 37, 2, 177-183. https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.04.009.
62. Shih, I., Chen, L., Wang, C., Wu, J., Liaw, K. (2010). Tandem production of levan and ethanol by microbial fermentation. Green Chemistry, 12, 1242-1247. https://doi.org/10.1039/B924765C.
63. Jindal, N., Khattar, J.I.S. (2018). Chapter 4 - Microbial Polysaccharides in Food Industry, Editor(s): Alexandru Mihai Grumezescu, Alina Maria Holban, In Handbook of Food Bioengineering, Biopolymers for Food Design, Academic Press, 95-123. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811449-0.00004-9.
64. Zhua, G., Sheng, L., Tong, Q. (2013). A new strategy to enhance gellan production by two-stage culture in *Sphingomonas paucimobilis*. Carbohydrate Polymers, 98, 1, 829-834. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.06.060.
65. Banerjee, S., Ravi, R., Bhattacharya, S. (2013). Textural characterisation of gellan and agar based fabricated gels with carrot juice. LWT-Food Science and Technology, 53, 255-261. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.011.
66. Prajapati, V., Jani, G., Zala, B., Khutliwala, T. (2013). An insight into the emerging exopolysaccharide gellan gum as a novel polymer. Carbohydrate Polymers, 93, 2, 670–678. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.030.
67. Banik, R., Kanari, B., Upadhyay, S. (2000). Exopolysaccharides of gellan family: prospects and potential. World Journal of Microbiology and Biotechnology 16, 407-414. https://doi.org/10.1023/A:1008951706621.
68. Bhunia, T., Giri, A., Nasim, T., Chattopadhyay, D., Bandyopadhyay, A. (2013). Uniquely different PVA-xanthan gum irradiated membranes as transdermal diltiazem delivery device. Carbohydrate Polymers, 95, 252-261. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.043.
69. Banik, R., Santhiagu, A., Upadhyay, S. (2007). Optimization of nutrients for gellan gum production by *Sphingomonas paucimobilis* ATCC-31461 in molasses based medium using response surface methodology. Bioresource Technology, 98, 792-797. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.012.

70. Wu, Li., Tsai, I., Ho, Y., Hang, Y., Lin, C., Tsai, M., Mi, F. (2021). Active and intelligent gellan gum-based packaging films for controlling anthocyanins release and monitoring food freshness. Carbohydrate Polymers. 254, 117410. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117410.
71. Zhang, X., Liu, D., Jin, T., Chen, W., He, Q., Zou, Z., Zhao, H., Ye, X., Guo, M. (2020). Preparation and characterization of gellan gum-chitosan polyelectrolyte complex films with the incorporation of thyme essential oil nanoemulsion. Food Hydrocolloids. 114. 106570. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106570.
72. Rojas, E., Hoyos, J., Mosquera, S. (2016). Producción de polihidroxialcanoatos (Phas) a partir de *Ralstonia eutropha* en un medio con harina de yuca como fuente de carbono. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14,1, 19-26. http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n1/v14n1a03.pdf.
73. Kahar, P., Tsuge, T., Taguchi, K., Doi, Y. (2004). High yield production of polyhydroxyalkanoates from soybean oil by *Ralstonia eutropha* and its recombinant strain. Polymer Degradation and Stability, 83, 79-86. https://doi.org/10.1016/s0141-3910(03)00227-1.
74. Tortajada, M., Da Silva, L., Prieto, M. (2013). Second generation functionalized medium chain-length polyhydroxyalkanoates: the gateway to high-value bioplastic applications. International Microbiology, 16, 1-15. 10.2436/20.1501.01.175.
75. Reis, M., Albuquerque, M., Villano, M., Majone, M. (2011). Mixed culture processes for polyhydroxyalkanoate production from agro-industrial surplus/wastes as feedstocks. In: Moo-Young M, editors. Comprehensive Biotechnology. USA, Academic Press. P., 669–683. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00464-5.
76. Swannasing, W., Imai, T., Kaewkannetra, P. (2015). Cost-effective defined medium for the production of polyhydroxyalkanoates using agricultural raw materials. Bioresource Technology, 194, 67-74. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.087.
77. Kabasci, S. (2013). Bio-Based Plastics-Introduction, in Bio-Based Plastics: Materials and Applications. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. https://doi.org/10.1002/9781118676646.
78. Anjum, A., Zuber, M., Mahmood, K., Noreen, A., Naveed, M., Tabasum, S. (2016). Microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and its copolymers: A review of recent advancements. International Journal of Biological Macromolecules, 89,161-174. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.069.
79. Mahapatro, A., Singh, D. (2011). Biodegradable Nanoparticles are Excellent Vehicle for Site Directed in-vivo Delivery of Drugs and Vaccines. Journal of nanobiotechnology, 9, 55. https://doi.org/10.1186/1477-3155-9-55.
80. Auras, R., Harte, B., Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. Macromol Bioscienc, 4, 835-864. https://doi.org/10.1002/mabi.200400043.
81. Yamanaka, T., Ohme, H., Inoue, T. (2007). Future directions for the research and development of polyesters: from high-performance to environmentally friendly. Pure and Applied Chemistry, 79, 9, 1541–1551. https://doi.org/10.1351/pac200779091541.
82. Vink, E., Davies, S. (2015). Life cycle inventory and impact assessment data for 2014 Ingeo™ Polylactide Production. Industrial Biotechnology, 11, 3, 167-180. https://doi.org/10.1089/ind.2015.0003.
83. Lim, L., Auras, R., Rubino, M. (2008). Processing technologies for poly (lactic acid). Progress in Polymer Science, 33, 820-852.

https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.
84. Datta, R., Henry, M. (2006). Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies—a review. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 28, 119-29. https://doi.org/10.1002/jctb.1486.
85. García, D., Carbonell, A., Arrieta, M., López, J., Samper, M. (2020). Improvement of PLA film ductility by plasticization with epoxidized karanja oil. Polymer Degradation and Stability, 179, 109259. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109259.
86. Antonioli, G., Fontanella, G., Echeverrigaray, S., Longaray, P., Fernandes, G., Barcellos T. (2020). Poly (lactic acid) nanocapsules containing lemongrass essential oil for postharvest decay control: In vitro and in vivo evaluation against phytopathogenic fungi, Food Chemistry, 326, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126997.

87. Shih, I., Van, Y. (2001). The production of poly (c-glutamic acid) from microorganism and its various applications. Bioresource Technology, 79, 3, 207-225. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00074-8.
88. Bajaj, I., Singhal, R. (2011). Poly (glutamic acid): An emerging biopolymer of commercial interest. Bioresource Technology, 102, 5551-5561. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.047.
89. Liang, W. Yu, A., Wang, G., Zheng, F., Jia, J., Xu, H. (2018). Chitosan-based nanoparticles of avermectin to control pine wood nematodes. International Journal of Biological Macromolecules, 112, 258-263. https://doi.org/112.10.1016/j.ijbiomac.2018.01.174.
90. Pereira, A., Sandoval, I., Zavala-t, S., Oliveira, H., Ledezma, A., Romero, J., & Fraceto, L. (2017). γ-Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity. Carbohydrate polymers, 157, 1862–1873. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.073.
91. Lee, S. (1996). Plastic bacteria? Progress and prospects for polyhydroxyalkanoate production in bacteria. Trends in Biotechnology, 14, 11, 431-438. https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)10061-5.
92. Chen, G., Hajnal, I., Wu, H., Lv, L., Ye, J. (2015). Engineering Biosynthesis Mechanisms for Diversifying Polyhydroxyalkanoates. Trends in Biotechnology, 33, 10, 565-574. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.07.007.
93. Michalak, M., Kurcok, P., Hakkarainen, M. 2017. Polyhydroxyalkanoate-based drug delivery systems. Polymer international, 66, 617-22. https://doi.org/10.1002/pi.5282.
94. Rodriguez, A. (2019). Recent Advances in the Use of Polyhydroyalkanoates in Biomedicine. Bioengineering, 6, 3, 82. https://doi.org/10.3390/bioengineering6030082.
95. Volkov, A., Muraev, A., Zharkova, I., Voinova, V., Akoulina, E., Zhuikov, V., Khaydapova, D., Chesnokova, D., Menshikh, K., Dudun, A., Makhina, T., Bonartseva, G., Asfarov, T., Stamboliev, I., Gazhva, Y., Ryabova, V., Zlatev, L., Ivanov, S., Shaitan, K., Bonartsev, A. (2020). Poly (3-hydroxybutyrate)/hydroxyapatite/alginate scaffolds seeded with mesenchymal stem cells enhance the regeneration of critical-sized bone defect. Materials Science and Engineering: C, 114, 110991. https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110991.
96. Russo, R., Giuliani, A., Immirzi, B., Malinconico, M., Romano, G. (2004). Alginate/polyvinyl alcohol blends for agricultural applications: Structure properties correlation, mechanical properties and greenhouse effect evaluation.

Macromolecular Symposia, 218, 241-250. https://doi.org/10.1002/MASY.200451425.
97. Tin, L., Rahmat, A., Rahman, W. (2013). Applications of Poly (lactic Acid). In: Sina Ebnesajjad, editors. In Plastics Design Library, Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. USA, William Andrew Publishing, 55-69. https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2834-3.00003-3.
98. Caruso, G. (2015). Plastic degrading microorganisms as a tool for bioremediation of plastic contamination in aquatic environments. Journal of Pollution Effects & Control, 3, 112. https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112.
99. Wang, Q., Chen, S., Zhang, J., Sun, M., Liu, Z., Yu, Z. (2008). Co-producing lipopeptides and poly-gamma-glutamic acid by solid-state fermentation of Bacillus subtilis using soybean and sweet potato residues and its biocontrol and fertilizer synergistic effects. Bioresource Technology, 99, 8, 3318-3323. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.052.
100. Garcia, C., Foggetti, U., Da Silva, A. (2008). Alginato bacteriano: Aspectos tecnológicos, características e produção. Química Nova, 31,7, 1800-1806. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700035.
101. Liao, Y., Wu, H., Ding, Y., Yin, S., Wang, M., Cao, A. (2012). Engineering thermal and mechanical properties of flexible fiber-reinforced aerogel composites. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 63, 445-456. http://.doi.org/10.1007/s10971-012-2806-7.
102. Tavassoli, E., Shekarchizadeh, H., Masoudpour, M. (2016). Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans. Carbohydrate Polymers, 137, 360-374. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.074.
103. Gomes, N., Carrilho, E., Machado, S., Sgobbi, L. (2020). Bacterial cellulose-based electrochemical sensing platform: A smart material for miniaturized biosensors. Electrochimica Acta, 349, 136341. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136341.
104. Pang, M., Huang, Y., Meng, F., Zhuang, Y., Liu, H., Du, M., Ma, Q., Wang, Q., Chen, Z., Chen, L., Cai, T., Cai, Y. (2020). Application of bacterial cellulose in skin and bone tissue engineering. European Polymer Journal, 122, 109365. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109365.
105. Unal, S., Arslan, S., Karademir, B., Kazan, D., Oktar, F., Gunduz, O. (2020). Glioblastoma cell adhesion properties through bacterial cellulose nanocrystals in polycaprolactone/gelatin electrospun nanofibers. Carbohydrate Polymers, 233,115820. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115820.
106. Singh RS, Kaur N, Rana V, Kennedy JF. 2017. Pullulan: A novel molecule for biomedical applications. Carbohydrate Polymers, 171, 102-121. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.089.
107. Moraes, F., Antunes, J., Forero, L., Aprile, P., Franck, G., Chauvierre, C., Chaubet, F., Letourneur, D. (2020). Synthesis of cationic quaternized pullulan derivatives for miRNA delivery. International Journal of Pharmaceutics, 577, 119041. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119041.
108. Thangavel. P., Vilvanathan, S., Kuttalam, I., Lonchin, S. (2020). Topical administration of pullulan gel accelerates skin tissue regeneration by enhancing collagen synthesis and wound contraction in rats. Int J Biol Macromol, 149, 395-403. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.187.

109. Fialho, A., Moreira, L., Granja, A., Popescu, A., Hoffmann, K., Sá-Correia, I. (2008). Occurrence, production, and applications of gellan: Current state and perspectives. Appl Microbiol Biotechnol, 79, 889-900. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1496-0.

110. Moscovici, M. (2015). Present and future medical applications of microbial exopolysaccharides. Front Microbiol, 6, 1-11. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01012.