

BIOPOLÍMEROS: DESARROLLO E INNOVACIONES EN LA CIENCIA DE LOS MATERIALES SOSTENIBLES

Biopolymers: development and innovations in sustainable materials science

MAYBELINE LISBETH TORRES RONDON¹ Y DANAEE MARÍA LÓPEZ ORTIZ²

Recibido: 16 de octubre 2024 • **Aceptado:** 15 de enero 2025

Cómo citar: Torres Rondon, M. E. y López Ortiz, D. M. (2024). Biopolímeros: desarrollo e innovaciones en la ciencia de los materiales sostenibles. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 7(2), 75-103. <https://doi.org/10.22206/cac.2024.v7i2.3341>

Resumen

El manejo incorrecto de los residuos plásticos, ha generado una problemática ambiental por la alta capacidad de durabilidad de estos en el tiempo, lo que conlleva a la generación de grandes volúmenes de estos residuos. La producción mundial de productos poliméricos, generadores de un impacto ambiental negativo, ha conllevado a la búsqueda de alternativas e innovaciones de materiales sustitutos que promueven su desintegración en el tiempo, y que a su vez constituyan una continuidad de la estructura polimérica y funcionalidad de los materiales convencionales. De esta manera, se ha comenzado el desarrollo de biopolímeros y bioplásticos degradables que sustituyan a los materiales sintéticos derivados de los hidrocarburos. En el presente trabajo se abordan los avances en la obtención y aplicación de biopolímeros como alternativas para reducir el uso de los materiales sintéticos, las conceptualizaciones y los diferentes discursos sobre biopolímeros, asumiendo que estas macromoléculas de origen biológico, destacan por su capacidad de biodegradarse en condiciones naturales, siendo menos perjudiciales para el medioambiente. Se analizan, además, los principales tipos de biopolímeros, como los polisacáridos, las proteínas y los poliésteres producidos por microor-

¹ Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), República Dominicana. ORCID: 0009-0009-4177-6511. Correo-e: maybeline.torres@intec.edu.do.

² Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), República Dominicana. ORCID: 0000-0003-3797-8574. Correo-e: danaee.lopez@intec.edu.do



ganismos, así como sus aplicaciones en diversas industrias. Asimismo, se exploran el estado actual y las perspectivas en la fabricación y aplicación de biopolímeros a nivel nacional e internacional, resaltando la importancia de adoptar tecnologías que impulsen el avance hacia una economía circular. Tras esta investigación, se han conceptualizado y clasificado la diversidad de biopolímeros, lo que promueve la utilización de recursos naturales biológicos y el descubrimiento de nuevas fuentes de materias primas para la producción de productos industriales que faciliten la circularidad.

Palabras Clave: biodegradabilidad, bioplásticos, biopolímeros, polímeros, polímeros naturales, polímeros sintéticos.

Abstract

The improper handling of plastic waste has generated an environmental issue due to the high durability of these materials over time, leading to the accumulation of large volumes of waste. The global production of polymeric products, which have a negative environmental impact, has driven the search for alternatives and innovations in substitute materials that promote degradation over time while maintaining the polymeric structure and functionality of conventional materials. Consequently, the development of degradable biopolymers and bioplastics to replace synthetic materials derived from hydrocarbons has begun. This work addresses advancements in the production and application of biopolymers as alternatives to reduce the use of synthetic materials, exploring their conceptualization and various discussions surrounding biopolymers. These biologically derived macromolecules are noted for their ability to biodegrade under natural conditions, making them less harmful to the environment. The study also analyzes the main types of biopolymers, such as polysaccharides, proteins, and polyesters produced by microorganisms, as well as their applications across different industries. Additionally, it explores the current state and perspectives on the manufacturing and application of biopolymers at both national and international levels, emphasizing the importance of adopting technologies that drive progress toward a circular economy. Through this research, the diversity of biopolymers has been conceptualized and classified, promoting the use of natural biological resources and the discovery of new raw material sources for the production of industrial products that support circularity.

Keywords: biodegradability, bioplastics, biopolymers, polymers, natural polymers, synthetic polymers.

1. Introducción

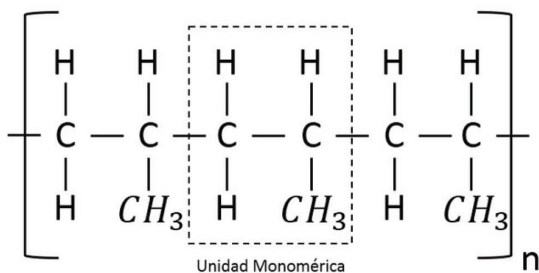
Desde la invención en 1907 de Leo Baekeland del primer plástico totalmente sintético, la baquelita (Hidalgo Betanzos, 2013), los plásticos han sido desarrollados y utilizados en la fabricación de bienes a gran escala, marcando de esta forma un hito en la petroquímica para el siglo XX (Yang et al., 2024). De acuerdo con los estudios que se han realizado, la literatura define las terminologías como “plástico”, “polímero” y “macromolécula”, para conceptualizar estas sustancias de origen orgánico.

Las macromoléculas son moléculas de gran tamaño con una elevada masa molecular relativa, cuya estructura está formada por la repetición de múltiples unidades que provienen de moléculas con una masa molecular más baja (Meira & Gugliotta, 2019). Estas pueden ser de origen biológico, como proteínas y ácidos nucleicos, o sintéticas, como los polímeros, mencionados anteriormente.

La estructura de los plásticos al igual que los polímeros se basa en la repetición de unidades estructurales denominadas monómeros; sin embargo la palabra plástico proviene del griego, y significa que puede ser moldeado, con pequeños esfuerzos, por lo que posee plasticidad (Asale & Rae, n.d.) y tienen su analogía en los polímeros sintéticos. Sus capacidades de resistencia a la corrosión, durabilidad y flexibilidad permiten su uso común; de igual forma existe una tendencia a nombrar plásticos a todos los polímeros o macromoléculas.

La Figura. 1 (Lopez-Serrano & Mendizabal, 2015), muestra la estructura del polipropileno, polímero sintético que es producto de la polimerización por adición del monómero propileno (C_3H_6), también conocido como propano-1-eno. y al que también se le conoce como material plástico (Meira & Gugliotta, 2019). Los polímeros sintéticos se clasifican en tres grandes grupos:

Termoplásticos, que se vuelven blandos al calentarse y recuperan su rigidez al enfriarse, Termoestables, que mantienen una forma fija cuando se les aplica calor y presión. (Sector plásticos, s. f.) y Elastómeros compuestos que incluyen elementos no metálicos en su composición y que muestran un comportamiento elástico, estos pueden ser termoplásticos y termoestables (Niaounakis, 2015). De igual forma, pueden clasificarse en base a

Figura 1*Estructura del polipropileno (PP)*

Fuente: Tomada de Lopez-Serrano & Mendizabal (2015).

otros criterios; según su estructura química, según su polaridad, tipo de polimerización y según su aplicación (Clasificación E Identificación De Plásticos, 2024).

En la sociedad moderna, estos compuestos orgánicos han sustituido diversidad de materiales de origen natural, como metales, madera, cerámicos y polímeros naturales; con un variado espectro de aplicaciones. Entre estas aplicaciones se encuentran contenedores para alimentos y bebidas, aislamiento térmico, mobiliario para el hogar y el lugar de trabajo, dispositivos eléctricos y electrónicos, interiores de vehículos, juguetes, telas, recubrimientos superficiales e incluso dispositivos médicos como articulaciones artificiales, incubadoras, bolsas de suero intravenoso y dispositivos de administración de medicamentos, entre otros (Hale et al., 2020).

1.1. Consecuencias del uso de polímeros sintéticos

Entre las diversas propiedades que estos materiales poseen está su durabilidad en el tiempo, es decir, se resisten ante los cambios ambientales, por lo que no se ven afectados ante las modificaciones del medio, tales como, humedad, luz, agentes químicos o microbianos, entre otros. Al no degradarse fácilmente en el ambiente y los residuos que generan son casi de nulo aprovechamiento compostable, se crea una grave problemática ambiental (Valero-Valdivieso et al., 2013). Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en su publicación “*Global Plastics Outlook*” para el año 2022, se establece que;

“El ciclo de vida actual de los plásticos está lejos de ser circular. A nivel mundial, la producción anual de plásticos se ha duplicado, aumentando de 234 millones de toneladas (Mt) en 2000 a 460 Mt en 2019. Los desechos plásticos se han más que duplicado, pasando de 156 Mt en 2000 a 353 Mt en 2019. Después de tener en cuenta las pérdidas durante el reciclaje, solo el 9% de los desechos plásticos se reciclaron finalmente, mientras que el 19% se incineró y casi el 50% se destinó a vertederos sanitarios. El 22% restante se eliminó en vertederos no controlados, se quemó en fosas abiertas o se filtró en el medio ambiente.” (Global Plastics Outlook, n.d.)

La prevalencia de los plásticos en el medio ambiente se debe a su alto grado de durabilidad, lo que resulta en una degradación limitada a lo largo del tiempo. Esta lenta descomposición puede llevar a su fragmentación en pequeñas partículas conocidas como microplásticos. Los microplásticos pueden originarse tanto de plásticos primarios, que son fabricados específicamente en tamaños pequeños, como de plásticos secundarios, que resultan de la degradación de objetos plásticos más grandes (Jambeck et al., 2015; Haque et al., 2022).

Los microplásticos adoptan diversas formas, incluyendo esferas, cuentas, pellets, espuma, fibras, fragmentos y escamas. Esta variedad en las formas se debe a los procesos de fragmentación a los que están expuestos, como el desgaste físico y químico causado por factores ambientales (Celi-Simbaña et al., 2023).

La acumulación de estas pequeñas partículas plásticas en los ecosistemas acuáticos y terrestres plantea serias preocupaciones sobre su impacto en la salud ambiental y humana (Smith et al., 2018). La capacidad de los microplásticos para absorber una variedad de contaminantes ambientales como pesticidas, metales pesados y antibióticos, es lo que los convierte en contaminantes emergentes y un riesgo potencial para humanos y animales al ingresar a la cadena alimenticia (Hale et al., 2020).

1.2. Biopolímeros: una alternativa sostenible frente a los polímeros sintéticos

Los materiales biodegradables (biopolímeros y biomateriales) son parte de la solución propuesta para mitigar el impacto ambiental y reducir el

consumo de plásticos convencionales, cuyo ciclo de vida genera graves problemas de contaminación.

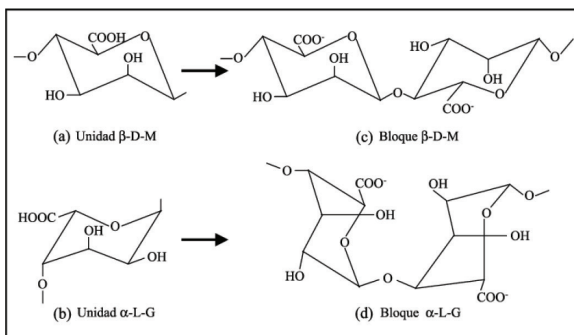
La ineficiente gestión de los residuos plásticos generados, es el principal problema de la contaminación ambiental por estos residuos; unido a esto se suman el uso indiscriminado de plásticos en todas las esferas de la sociedad. La acumulación de plásticos en el medio ambiente, resultado de una disposición y reciclaje inadecuados, ha provocado graves consecuencias ecológicas que impactan tanto a los ecosistemas marinos como a los terrestres (Jambeck et al., 2015).

Para abordar esta crisis, es fundamental promover alternativas sostenibles como los biopolímeros y biomateriales, que pueden sustituir gradualmente el uso del plástico convencional. Estos materiales en gran parte biodegradables, representan una solución viable para mitigar el impacto ambiental negativo asociado con los plásticos tradicionales, facilitando su descomposición y reduciendo la acumulación en vertederos y océanos (Giacovelli et al., 2021).

Existen polímeros naturales que se extraen de diferentes vegetales que han sido de gran interés para la producción de biomateriales, entre los que se encuentran los polisacáridos. Los polisacáridos aniónicos como el alginato (Figura 2), que se extrae de algas pardas o se produce mediante

Figura 2

Estructura del alginato, (a) y (b) monosacáridos, ácido β D-manurónico y ácido α -L-gulurónico, respectivamente, y (c) y (d) unidades que se repiten en cadena



Fuente: Tomado de Hurtado et al., (2020).

cultivos microbianos, posee excepcionales propiedades químicas, físicas y biológicas (Bezerra et al., 2024), así como solubilidad en agua, biodegradabilidad y no toxicidad. Su versatilidad permite su aplicación en múltiples sectores, incluyendo la industria farmacéutica, química, textil, gastronómica y biomédica (Hurtado et al., 2020).

El objetivo de este artículo es analizar la conceptualización, origen, clasificación y avances en el desarrollo de los biopolímeros como materiales sostenibles, destacando sus innovaciones científicas y tecnológicas para promover su integración como una solución viable en la ciencia de los materiales, con miras a la sostenibilidad y la economía circular.

2. Metodología

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó un análisis bibliográfico exhaustivo que incluyó libros, artículos y publicaciones científicas relacionadas con los biopolímeros. Las fuentes se seleccionaron a través de una búsqueda sistemática en Google Académico y el portal Scopus, una base de datos reconocida por su amplio alcance en literatura científica revisada por pares, gestionada por Elsevier (Acerca De Scopus | Base De Datos De Resúmenes Y Citas | Elsevier, n.d.).

La búsqueda se efectuó utilizando las siguientes palabras clave, en orden jerárquico: “biopolymers”, “natural polymers”, “polymers”, “synthetic polymers”, “bioplastics” y “biodegradability”. Para la inclusión de las publicaciones seleccionadas, se estableció como criterio que dichas palabras clave debían aparecer en el título, resumen o palabras clave del documento. En lo que respecta a la taxonomía de los biopolímeros (presentada en la tabla 1 del capítulo 3), se determinó un rango máximo de antigüedad de 12 años para las fuentes citadas, con el objetivo de garantizar la actualidad y la relevancia de la información recopilada.

Entre las publicaciones revisadas, incluyendo aquellas citadas en este trabajo de investigación, se elaboró un mapa bibliográfico (Esquema 1) que muestra los países con mayor densidad de artículos científicos, libros y revisiones bibliográficas publicados hasta el año 2024.

Este recurso muestra la red de colaboración científica y la distribución geográfica de publicaciones relacionadas con el presente trabajo. Estados

sustitución de los plásticos contaminantes. En la Tabla 1, se muestra una compilación de estas definiciones más actuales, entre los autores citados, se identifican ideas y conceptos principales en los que coinciden.

Los biopolímeros son polímeros naturales sintetizados por organismos vivos, como plantas, bacterias, algas y hongos, compuestos por unidades químicas repetitivas (Baranwal et al., 2022). Caracterizados por ser en gran parte biodegradables, biocompatibles y de baja antigenicidad, (capacidad de una sustancia para ser reconocida por el sistema inmunológico como un antígeno) los biopolímeros representan una alternativa sostenible a los polímeros sintéticos derivados del petróleo, cuya descomposición es compleja y contribuye significativamente a los problemas ambientales (Rodríguez-Gomez, 2020).

Los biopolímeros derivados de recursos renovables, se caracterizan por ser biocompatibles, biodegradables (aunque no todos lo son) y de baja antigenicidad (capacidad de una sustancia para ser reconocida por el sistema inmunológico como un antígeno) (Yang et al., 2024). Existen distintos criterios para la clasificación de biopolímeros, a grandes rasgos, pueden ser clasificados según su origen, funcionalidad, carga (carga positiva, negativa o neutra), estructura, y cumplen funciones biológicas esenciales como la preservación del material genético, estabilización celular y almacenamiento de energía (Rodríguez-Gomez, 2020; Yang et al., 2024).

Los diferentes autores citados coinciden en caracterizar a los biopolímeros como macromoléculas orgánicas derivadas de fuentes renovables, tales como plantas, bacterias, algas y hongos. Aunque las definiciones varían ligeramente, todas resaltan su origen biológico como una diferencia fundamental frente a los polímeros convencionales obtenidos a partir de derivados del petróleo. Este enfoque convergente subraya la importancia de los biopolímeros como componentes clave en el desarrollo de materiales sostenibles.

Una característica común en las descripciones planteadas es su estructura formada por unidades químicas repetitivas, lo que les confiere propiedades versátiles para su uso en diversas aplicaciones industriales y biomédicas. Los autores señalan que estos polímeros pueden clasificarse en tres categorías principales: aquellos extraídos directamente de materiales naturales, los sintetizados químicamente a partir de biomasa, y los generados por microorganismos o bacterias genéticamente modificadas.

Tabla 1*Taxonomía de los biopolímeros*

Definición de Biopolímero	Referencia
"Los biopolímeros son polímeros que se derivan de recursos renovables. Se pueden clasificar en tres categorías principales: polímeros extraídos directamente de materiales naturales, polímeros producidos por síntesis química clásica a partir de monómeros derivados de biomasa y polímeros producidos por microorganismos o transformados genéticamente por bacterias."	(Johansson et al., 2012)
"Polímeros que provienen mayormente de recursos renovables y que, en su mayoría, son biodegradables. Representan una alternativa al uso de polímeros sintéticos derivados del petróleo, los cuales presentan graves problemas ambientales debido a su resistencia a la descomposición."	(Valero-Valdivieso et al., 2013)
"Los biopolímeros, son polímeros naturales sintetizados por los seres vivos que cumplen funciones biológicas importantes como preservar el material genético (ácidos nucleicos), estabilizar estructuras celulares (proteínas) o almacenar energía (polisacáridos). Estos compuestos son biodegradables, biocompatibles, de baja antigenicidad, y son renovables. Se pueden clasificar de acuerdo a su origen, funcionalidad, carga y estructura, y se obtienen de diversas fuentes como algas, plantas, bacterias y hongos"	(Rodríguez-Gomez, 2020)
"Los biopolímeros son macromoléculas orgánicas presentes en fuentes naturales, compuestas por unidades repetitivas. Su definición proviene de las palabras griegas "bio" (vida) y "polímero" (múltiples partes), lo que refleja su origen en organismos vivos. Se caracterizan por ser biocompatibles y biodegradables, lo que les permite ser útiles en diversas aplicaciones"	(Baranwal et al., 2022)
"Los biopolímeros son principalmente los polímeros que se crean u obtienen de seres vivos, como plantas y bacterias, en lugar de petróleo, que ha sido tradicionalmente la fuente de polímeros. Los biopolímeros son moléculas en forma de cadena compuestas por bloques químicos repetidos derivados de recursos renovables que pueden descomponerse en el medio ambiente."	(Das et al., 2023)
"Los biopolímeros son definidos como polímeros producidos naturalmente por las células de organismos vivos, ya sean plantas o animales. Estos están compuestos por unidades monoméricas covalentemente unidas en cadenas lineales o ramificadas que forman moléculas más grandes."	(Irimia-Vladu & Sariciftci, 2025)

Fuente: Elaboración propia 2024.

Esta diversidad en sus métodos de obtención amplía su aplicabilidad y fomenta el desarrollo tecnológico en múltiples campos.

Las definiciones también coinciden en destacar la capacidad de los biopolímeros para ser biodegradables y biocompatibles, aun cuando no todos sean biodegradables. Esta convergencia refleja su potencial para integrarse en el medio ambiente sin generar residuos contaminantes persistentes y su adaptabilidad a aplicaciones biomédicas con mínima respuesta inmunológica. Además, los biopolímeros cumplen funciones biológicas esenciales en organismos vivos, como la preservación del material genético, la estabilización de estructuras celulares y el almacenamiento de energía, lo que reafirma su importancia como alternativas sostenibles a los polímeros sintéticos.

Los autores destacan que, dada su naturaleza renovable y sus propiedades ecológicas, los biopolímeros representan una solución viable para mitigar los problemas ambientales asociados a los polímeros derivados del petróleo. Esta visión convergente no solo enfatiza su relevancia científica y tecnológica, sino que también impulsa su integración en el desarrollo de una economía circular, promoviendo innovaciones sostenibles en sectores como el embalaje, la medicina y la ciencia de materiales avanzados.

3.2. Clasificación de los biopolímeros

Los biopolímeros pueden clasificarse en función de su composición química, el método de síntesis, el proceso de fabricación, su relevancia económica, áreas de aplicación, entre otros aspectos. Cada clasificación proporciona información y perspectivas diferentes de los diferentes biopolímeros existentes. Johansson et al. (2012) sugiere una clasificación de los biopolímeros, según su origen, en tres categorías principales.

- Polímeros extraídos directamente de materiales naturales: polisacáridos (por ejemplo, celulosa, almidón, quitina), ligninas, proteínas y lípidos
- Polímeros producidos por síntesis química a partir de monómeros³ derivados de biomasa renovable: como el ácido poliláctico o PLA, que se polimeriza a partir de ácido láctico obtenido de dextrosa.

³ Los monómeros son la unidad estructural repetitiva de un polímero. Nota de las autoras.

- Polímeros producidos por microorganismos o transformados genéticamente por bacterias: Esta categoría incluye poliésteres de hidroxialcanoatos (PHAs). Comercialmente, estos consisten principalmente en polihidroxibutirato (PHB) y copolímeros de hidroxibutirato y hidroxivalerato (PHBV).

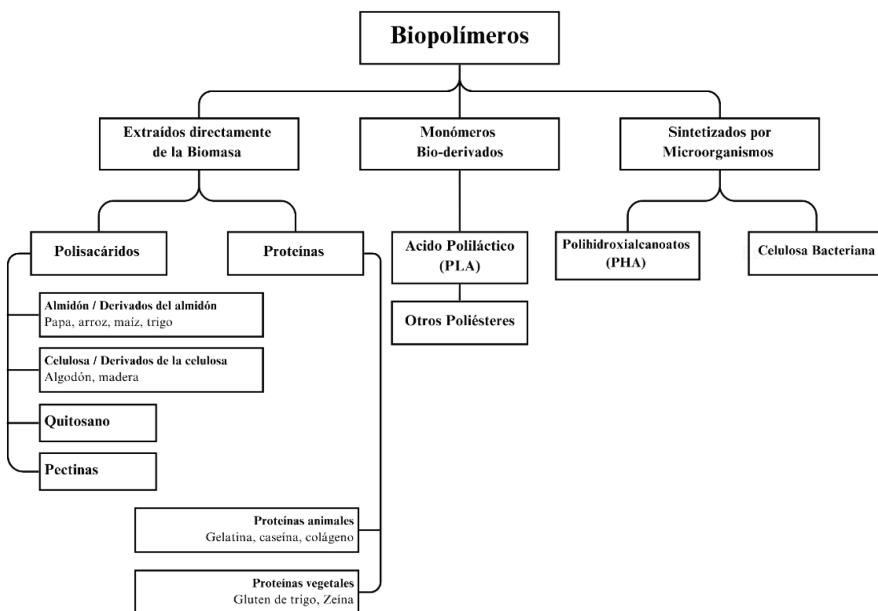
La clasificación de los biopolímeros planteada por; Johansson et al. (2012); proporciona una distribución de los biopolímeros en base a sus principales vías de obtención (Figura 3).

Das et al. (2023), propone una clasificación de los biopolímeros a partir de sus orígenes, refiriéndose a las fuentes de donde provienen:

Biopolímeros naturales: Se originan de fuentes naturales y son producidos orgánicamente por organismos vivos como plantas, animales, y

Figura 3

Clasificación de los biopolímeros según sus principales vías de obtención



Fuente: Elaboración propia basada en Johansson, C., Bras, J., Mondragon, I., Nechita, P., Plackett, D., Šimon, P., Svetec, D. G., Virtanen, S., Baschetti, M. G., Breen, C., Clegg, F., and Aucejo, S. (2012).

microbios. Como ejemplos podemos mencionar; proteínas, como el colágeno, la seda y los fibrinógenos. Así como también, polisacáridos, entre estos, quitina, el almidón, la celulosa, el ácido algínico, y otros como el guar y la goma arábiga.

Biopolímeros sintéticos: Se obtienen mediante rutas químicas a partir de fuentes renovables, como la biomasa, pero se modifican o producen de forma sintética o artificial. Se dividen en dos subgrupos:

- **Biopolímeros biodegradables:** Son polímeros producidos a partir de monómeros derivados de fuentes renovables y mediante procesos químicos o biotecnológicos controlados. Esto los hace degradables en el medio ambiente por la acción de microorganismos o condiciones ambientales. De cierta forma, combinan las ventajas de la producción controlada en laboratorio con la capacidad de biodegradarse.
- **Biopolímeros no biodegradables:** A pesar de derivarse de fuentes renovables, estos biopolímeros no se degradan fácilmente en el ambiente.

Las clasificaciones demostradas, desde los diferentes discursos son convergentes y no discrepan en la definición de biopolímeros, que permite acercarla a los materiales sostenibles y sustentables. De acuerdo con Das et al., (2023), el término “sostenible” hace referencia a prácticas o materiales que pueden cumplir con las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer las suyas. Esto implica el uso de recursos renovables, la reducción del impacto ambiental y el enfoque en la biodegradabilidad y reciclabilidad de los materiales.

De igual manera se considera que, en el marco del creciente interés por los materiales sostenibles, los biopolímeros han emergido como alternativas prometedoras para reemplazar los polímeros derivados de fuentes fósiles. Esto es gracias a su amplia variedad de orígenes, y la diversidad de fuentes y estructuras que conforman a estos biopolímeros.

La Tabla 2, muestra la variabilidad polimérica y el potencial para la innovación de nuevos materiales con un alto poder de sostenibilidad. En la ciencia de los materiales, los biopolímeros emergen como “materiales sostenibles”, aunque su verdadero mérito se lo confiere la propiedad de biodegradabilidad en el tiempo. La posibilidad de obtener biopolímeros

Tabla 2
Biopolímeros y sus distintos orígenes

Origen	Biopolímero	Composición	Referencia
	Almidón	Polímero de D-glucosa unido por enlaces alfa-glucosídicos; contiene amilosa (lineal) y amilopectina (ramificada).	Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009
	Celulosa	β -D-glucosa unida por enlaces glucosídicos $\beta(1-4)$.	Sahana & Rekha, 2018
	Goma Arábica	Polisacárido ramificado formado por residuos de β -D-galactopiranosil unidos por enlaces $\beta(1-3)$.	Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009
Vegetal	Goma Ghatti	Galactano compuesto por L-arabinosa, D-galactosa, D-mannosa, D-xilosa y ácido D-glucurónico con un peso molecular de 12,000 kDa.	Mohammadinejad et al., 2020
	Goma Guar	β -D-manopiranosil unida por enlaces $\beta(1-4)$, con residuos de D-galactopiranosil cada dos unidades.	Bilal & Iqbal, 2019
	Pectinas	Heteropolisacárido compuesto principalmente por homogalacturonano, rhamnogalacturonano, y galacturonanos sustituidos.	Bilal & Iqbal, 2019
	Agar	Polisacárido compuesto de β -D-galactopiranosil y 3,6-anhidro- α -L-galactopiranosil, con enlaces $\beta(1-4)$ y $\alpha(1-3)$.	Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009
	Agarosa	Heteropolisacárido lineal compuesto de β -D-galactosa y 3,6-anhidro- α -L-galactosa.	Bilal & Iqbal, 2019
Algas	Alginato	Polímero de ácido D-manurónico y ácido L-gulurónico unidos por enlaces glucosídicos $\beta(1-4)$.	Sahana & Rekha, 2018
	Carragenina	Mezcla heterogénea de polisacáridos derivados de galactosa y anhidro-galactosa sulfatos, incluye κ -carragenina y ι -carragenina.	Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009

Origen	Biopolímero	Composición	Referencia
	Ácido hialurónico	Polímero compuesto por ácido D-glucurónico y N-acetil-D-glucosamina unidos por enlaces glucosídicos $\beta(1-4)$ y $\beta(1-3)$.	Sahana & Rekha, 2018
	Colágeno	Proteína fibrosa compuesta por aminoácidos unidos mediante enlaces tipo amida; estructura helicoidal triple.	Sahana & Rekha, 2018
Animal	Gelatina	Proteína obtenida a partir de la desnaturalización del colágeno; usada como estabilizante y agente gelificante.	Bilal & Iqbal, 2019
	Quitosano	Derivado catiónico de la quitina, producido por desacetilación; utilizado por sus propiedades antimicrobianas.	Ban et al., 2018
	Quitina	Polisacárido compuesto de N-acetilglucosamina, unido por enlaces glucosídicos $\beta(1-4)$, encontrado en los exoesqueletos de crustáceos.	Sahana & Rekha, 2018
	Ácido poliláctico (PLA)	Poliéster biodegradable formado por unidades repetidas de glicolato; utilizado en suturas absorbibles.	Maraveas, 2020
Microbiano	Exopolisacáridos (EPS)	Polisacáridos secretados por microorganismos, formados por monosacáridos activados nucleotídicamente.	Pereira et al., 2019
	Polihidroxialcanoatos (PHAs)	Poliésteres formados principalmente de ácido hidroxialcanoico; incluye PHB y PHV.	Costa et al., 2019; Singh et al., 2019

Fuente: Basado en Rodríguez-Gómez, (2020) con modificaciones.

a partir de fuentes tan diversas (vegetal, algas, animal, microbiana), es necesaria, para desarrollar productos biodegradables con una amplia variedad de estructuras poliméricas de características propias y auténticas, reflejando las particularidades de las diferentes fuentes de las que provienen. Frente a estas posibilidades, es posible analizar y discernir entre los orígenes de los biopolímeros y los procesos químicos o biotecnológicos más adecuados para su obtención, según la aplicación que se desee implementar.

La aparición, estudio y clasificación de los biopolímeros, abrió un sendero en la ciencia de los materiales y en la búsqueda de la sostenibilidad de los materiales para los productos de consumo. Esto ha marcado una brecha hacia el mejoramiento ambiental y la economía circular, devolviendo a la naturaleza lo que proporciona a los seres humanos cada día.

4. Biodegradabilidad de los biopolímeros

La degradación de un polímero se define como cualquier transformación en su estructura química que provoca cambios apreciables en sus propiedades fisicoquímicas (Posada Bustamante, 1994). Según Rodríguez-Gómez (2020), la biodegradación de un biopolímero es su susceptibilidad a los agentes biológicos presentes en un ambiente determinado, como bacterias u hongos.

Cuesta (2012) señala que la acción enzimática de estos microorganismos permite simplificar el biopolímero en productos finales como dióxido de carbono, metano, agua, biomasa y otros compuestos inorgánicos. En el caso de los biopolímeros, Rodríguez-Gómez (2020) sostiene que las reacciones responsables de su degradación son principalmente enzimáticas o hidrolíticas:

- **Reacciones enzimáticas:** Las enzimas secretadas por la acción metabólica de los microorganismos descomponen las cadenas poliméricas al unirse a sus sitios activos.
- **Reacciones hidrolíticas:** Estas reacciones ocurren en presencia de agua y enlaces hidrolizables como ésteres, amidas o carbonatos (-COO-, -CONH₂-).

De igual forma, la biodegradabilidad de los biopolímeros varía significativamente dependiendo del entorno en el que se encuentren. En este

contexto, se han identificado varios medios relevantes para evaluar su comportamiento biodegradable: medios aeróbicos, anaeróbicos, marinos y terrestres.

4.1. Comportamientos biodegradables de los biopolímeros

Se conocen diferentes tipos de biodegradación de acuerdo al medio al que se vea expuesto el biopolímero.

Biodegradación en medio aeróbico: En condiciones aeróbicas, la descomposición ocurre en presencia de oxígeno, lo que permite a los microorganismos metabolizar el biopolímero y convertirlo principalmente en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y biomasa. Este tipo de biodegradación es común en compostaje industrial y doméstico. La eficiencia del proceso depende de factores como la temperatura del compost (termófilo o mesófilo) y el contenido de humedad (Šprajcar et al., s. f.).

Biodegradación en medio anaeróbico: en ambientes anaeróbicos, como vertederos o digestores de biogás, la degradación ocurre sin la presencia de oxígeno. Los microorganismos generan metano (CH_4) y dióxido de carbono como productos finales. Este proceso es generalmente más lento que el aeróbico debido a las limitaciones en la actividad microbiana y las condiciones menos favorables para la descomposición (Nair et al., 2017; Šprajcar et al., s. f.).

Biodegradación en Ambientes marinos: en el medio marino, la biodegradación de los biopolímeros es un desafío debido a las bajas temperaturas, concentraciones reducidas de microorganismos activos y una menor disponibilidad de nutrientes. Los biopolímeros degradables en este entorno, como ciertos poliésteres alifáticos (por ejemplo, el poli(hidroxicanoato)), deben ser evaluados cuidadosamente debido al riesgo de contaminación marina persistente (Nair et al., 2017).

Biodegradación en suelo: el comportamiento de los biopolímeros en suelos depende de la actividad microbiana, el contenido de materia orgánica, la humedad y la temperatura del terreno. La descomposición puede ser parcial o completa dependiendo del tipo de biopolímero y las condiciones ambientales. Los materiales compostables tienden a degradarse mejor en suelos ricos en nutrientes con alta actividad microbiana (Nair et al., 2017).

De igual manera, la biodegradabilidad de los biopolímeros puede ser evaluada mediante diferentes técnicas.

4.2. Técnicas para evaluar la biodegradabilidad

Se conocen diferentes técnicas de evaluación de la biodegradabilidad de un biopolímero permitiendo conocer el grado de descomposición de estos biomateriales.

- Pruebas de respirometría: se utilizan para medir la producción de dióxido de carbono en condiciones aeróbicas, lo que permite evaluar la tasa de descomposición del biopolímero (Nair et al., 2017).
- Pruebas de producción de metano: estas pruebas evalúan la biodegradación en medios anaeróbicos mediante la medición de la cantidad de metano generado durante el proceso de descomposición (Das et al., 2023).
- Ensayos de compostabilidad: simulan condiciones de compostaje industrial para determinar si el biopolímero puede descomponerse completamente en un tiempo definido (Nair et al., 2017; Šprajcar et al., s. f.).
- Pruebas de desintegración: evalúan la fragmentación del material en contacto con suelo o agua marina, proporcionando información sobre la degradación física del biopolímero (Nair et al., 2017).
- Análisis microbiológicos: permiten identificar y cuantificar las comunidades microbianas activas durante el proceso de biodegradación (Nair et al., 2017; Šprajcar et al., s. f.).

Estos ensayos que se realizan a los biopolímeros dan la medida que no todos los biopolímeros pueden ser biodegradables.

4.3. Biopolímeros biodegradables y no biodegradables

Aunque la mayoría de los biopolímeros provienen de recursos renovables, no todos son biodegradables. Valero-Valdivieso et al. (2013) subrayan que la biodegradabilidad no depende exclusivamente del origen del polímero, sino también de su estructura química. Algunos biopolímeros derivados de fuentes renovables no cumplen con los criterios para ser considerados biodegradables.

Los biopolímeros no biodegradables tienen estructuras químicas sin grupos funcionales susceptibles a la acción de microorganismos o enzimas ambientales. La presencia de largas cadenas carbonadas y la ausencia de enlaces hidrolizables dificultan su descomposición natural, lo que contribuye a la acumulación de residuos persistentes en el entorno (Das et al., 2023). En la tabla 3, se evidencian las diferencias entre polímeros biodegradables y no biodegradables.

Tabla 3

Diferencias entre los biopolímeros biodegradables y no biodegradables

Característica	Biopolímeros biodegradables	Biopolímeros no biodegradables
Materia prima	Fuentes renovables como azúcares, almidones, lípidos, proteínas y bacterias.	Fuentes renovables como aceites vegetales o bioetanol, derivados de biomasa.
Monómeros de partida	Monómeros como ácido láctico (PLA), ácido glicólico (PGA), poliésteres bacterianos (PHAs).	Monómeros derivados de la biomasa como etileno, propileno, cloruro de vinilo.
Proceso de obtención	Involucra procesos biotecnológicos como fermentación microbiana o enzimática	Basado en procesos químicos avanzados como la polimerización por adición o radicales libres.
Polimerización	Polimerización por condensación o apertura de anillos, bajo condiciones controladas.	Polimerización por adición o polimerización en cadena bajo altas temperaturas y presiones.
Grupos funcionales	Contienen grupos funcionales degradables, como ésteres o amidas.	Carecen de grupos fácilmente degradables, con enlaces C-C altamente estables.
Ejemplos	PLA (ácido poliláctico), PGA (ácido poliglicólico), PCL (policaprolactona), PHB (polihidroxibutirato).	PE (polietileno), PP (polipropileno), PVC (policloruro de vinilo), PA (poliamida), PU (poliuretano).
Proceso de degradación	Degradación natural por microorganismos, agua o luz.	Resistencia extrema a la degradación natural, acumulación en el ambiente.
Aplicaciones típicas	Medicina (implantes, suturas), embalaje biodegradable, productos médicos.	Productos duraderos: envases plásticos, textiles, componentes industriales.

Fuente: Elaboración propia.

El conocimiento de las propiedades y características de los biopolímeros, junto con su comportamiento a la degradabilidad, ha permitido que estos biomateriales se posicionen como una alternativa viable para sustituir el uso de plásticos convencionales. A medida que la investigación y el desarrollo en este campo continúan avanzando, es probable que veamos un aumento en la adopción de biopolímeros en diversas industrias, contribuyendo así a un futuro más sostenible.

5. Perspectivas de desarrollo de los biopolímeros

Ante el creciente reclamo social por el impacto ambiental de los plásticos convencionales, muchos países han tomado acciones para la mitigación de este impacto, con el desarrollo de proyectos e investigaciones que permitan obtener materiales degradables.

En este contexto, Asia ha asumido un papel de liderazgo, posicionándose como el principal centro de producción de bioplásticos. Actualmente, concentra el 50% de la producción mundial, cifra que se proyecta aumente al 70% para el año 2026 (AIMPLAS, 2023), evidenciando su compromiso con la transición hacia alternativas sostenibles.

Asia también destaca por su liderazgo en la producción de fibras naturales esenciales para los biopolímeros, como el algodón, el yute, el ramio y el abacá. Países como China, India, Bangladesh y Filipinas poseen una ventaja competitiva en este sector debido a su alta disponibilidad de recursos (Johansson et al., 2012). Investigaciones realizadas por, Leong et al. (2024) explora el uso de recursos naturales abundantes en Asia, como algas marinas (*Kappaphycus alvarezii*) y quitina de caracoles planorbis (*Planorbarius corneus*), para desarrollar bioplásticos sostenibles. Los resultados de este estudio muestran como los bioplásticos tienen propiedades mecánicas mejoradas, mayor resistencia al agua y alta biodegradabilidad, descomponiéndose eficazmente en condiciones naturales gracias a la acción enzimática de microorganismos específicos.

En los últimos años, Europa ha logrado importantes avances en la investigación y aplicación industrial de biopolímeros. Materiales como el ácido poliláctico (PLA) y el polihidroxibutirato (PHB) se han utilizado en el desarrollo de bioplásticos sostenibles para aplicaciones en utensilios

y soluciones constructivas. Kumar et al. (2020), en su investigación “Bacterial polyhydroxyalkanoates: Opportunities, challenges, and prospects”, examinan la relevancia y los desafíos de los poliésteres polihidroxicanoatos (PHAs), bioplásticos producidos por microorganismos, como una alternativa ecológica a los plásticos derivados del petróleo.

Este estudio destaca las propiedades de biodegradabilidad, biocompatibilidad y el potencial de estos bioplásticos en diversas industrias. Sin embargo, también se abordan las dificultades económicas asociadas a su producción, señalando la necesidad de desarrollar tecnologías y procesos más eficientes para su valorización comercial. A pesar de sus ventajas ambientales, la producción de PHAs continúa enfrentando desafíos importantes relacionados con costos elevados y procesos de extracción complejos.

De igual forma, en la aplicación médica y biomédica de los biopolímeros, Europa ha logrado avances significativos donde se busca desarrollar materiales sostenibles y biocompatibles para diversas aplicaciones. Un ejemplo clave es la investigación de Ruiz-Hitzky et al., (2015) que aborda bionanocompuestos de sepiolita y paligorskita, que se destacan por sus propiedades estructurales y su capacidad para interactuar con especies orgánicas e inorgánicas. Estos minerales, al ser utilizados en la creación de materiales nanoestructurados, permiten el desarrollo de biopolímeros con aplicaciones potenciales en medicina, como la liberación controlada de fármacos y la mejora de implantes biocompatibles.

Por otra parte, en el marco del programa Horizon 2020, la Unión Europea ha financiado proyectos clave como Biorefine-2G, Brigit y Europha. Por ejemplo, Brigit se centra en la producción de nuevos biopolímeros a partir de desechos lignocelulósicos, mientras que Europha busca reducir los costos de los biopolímeros PHA y expandir sus aplicaciones como bioplásticos compostables. Estas iniciativas posicionan a Europa como un líder en investigación y desarrollo de biopolímeros en el contexto de una economía circular (Cordis, 2020).

En Latinoamérica, se ha mostrado un creciente interés en los biopolímeros como solución sostenible frente al impacto ambiental de los plásticos sintéticos. Esto se refuerza gracias a investigaciones como, Cornejo Reyes et al., (2020) donde se expone el desarrollo de alternativas

sostenibles para la producción de bioplásticos a partir de cultivos ricos en almidón, como papa (*Solanum tuberosum*) y yuca (*Manihot esculenta Crantz*) en El Salvador. El objetivo principal es obtener películas biodegradables a través de la modificación térmica y química del almidón para crear un material termoplástico moldeable que pueda sustituir a los plásticos petroquímicos, mitigando así su impacto ambiental.

Por su parte, Brasil lidera la investigación en biodegradabilidad, con avances significativos en la producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de recursos agrícolas, aplicándolo en las industrias alimentaria y médica (Baranwal et al., 2022). En cuanto a la industria alimentaria, Brasil cuenta con investigaciones en la sustitución de materiales sintéticos por biopolímeros, como la realizada por Bezerra et al., (2024) en la cual se expone el desarrollo de películas biodegradables mediante la incorporación de subproductos secos del jugo de Naranja (OBP) como material de refuerzo en una matriz de alginato de sodio y glicerol.

De esta forma, queda evidenciado el potencial del OBP como componente de refuerzo en bioplásticos sostenibles, promoviendo así, el desarrollo de empaques biodegradables que reducen el uso de polipropileno sintético como película de empaque y fomentando el aprovechamiento completo de subproductos agrícolas como sustitutivos.

México se enfoca en bioplásticos y nanocompuestos para embalajes y dispositivos biomédicos, utilizando residuos agroindustriales como fuente de biomasa. En Colombia, las investigaciones se orientan hacia materiales compuestos empleados en farmacéutica e ingeniería de tejidos, fomentando biopolímeros en el marco de una economía circular. Estas iniciativas subrayan el compromiso de la región con la innovación sostenible (Baranwal et al., 2022).

En la República Dominicana se están dando los primeros pasos en la implementación de biopolímeros a través de proyectos como “Caribe Circular”, financiado por el Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Este proyecto busca prevenir la entrada de residuos plásticos al mar Caribe mediante el desarrollo de materiales sostenibles, incluidos biopolímeros. La abundancia de desechos agrícolas, como almidón de yuca, cáscara de arroz y residuos de coco, ofrece

una fuente prometedora para la producción de biopolímeros naturales. La iniciativa incluye la participación de Guatemala, Honduras, Belice y México, promoviendo investigaciones orientadas a la obtención de nuevos materiales sostenibles (Giz, 2024).

No obstante, el desarrollo y la aplicación de los biopolímeros enfrentan varios desafíos en la actualidad. Entre ellos destacan los altos costos de producción en comparación con los polímeros sintéticos, la necesidad de infraestructura adecuada para la manufactura y el reciclaje, y la limitada disponibilidad de materias primas en algunas regiones. Además, la falta de estándares globales para la producción y uso de biopolímeros dificulta su adopción generalizada (Perera et al., 2023). Sin embargo, el creciente interés en la economía circular y las políticas gubernamentales de apoyo representan oportunidades clave para superar estas barreras y fomentar un futuro más sostenible.

6. Conclusiones

Los biopolímeros son materiales del presente y el futuro, cuyas innovaciones en torno a la gran variedad que ofrece crean una gran expectativa en la Ciencia de los materiales sostenibles.

El desarrollo emergente de las investigaciones para sintetizar y caracterizar a los polímeros de origen natural está promoviendo la utilización de recursos naturales biológicos y descubriendo nuevas fuentes de materias primas para la producción de productos industriales como sustitutivos de los polímeros, cuyos residuos constituyen un contaminante ambiental.

El desarrollo de las investigaciones ha fomentado nuevos programas no solo para el estudio de las propiedades y capacidades de los biopolímeros, sino también, para sus aplicaciones industriales y la producción de productos de consumo humano, comenzando a reducir el impacto de los polímeros convencionales y aumentando las perspectivas de economía circular.

Referencias

- AIMPLAS. (2024, January 14). *Clasificación e identificación de plásticos*. AIMPLAS. <https://www.aimplas.es/blog/clasificacion-e-identificacion-de-materiales-plasticos/>

- AIMPLAS. (2023, July 6). *Perspectivas de mercado de los bioplásticos*. <https://www.aimplas.es/blog/perspectivas-de-mercado-de-los-bio-plasticos/>
- Asale, R., & Rae. (n.d.). plástico, plástica | Diccionario de la lengua española. «Diccionario De La Lengua Española». Edición Del Tricentenario. <https://dle.rae.es/pl%C3%A1stico#TLksLOy>
- Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., & Kumar, A. (2022). Biopolymer: A Sustainable Material for Food and Medical Applications. *Polymers*, 14(5), 983. <https://doi.org/10.3390/polym14050983>
- Ban, Z., Horev, B., Rutenberg, R., Danay, O., Bilbao, C., Mchugh, T., ... Poverenov, E. (2018). Food Hydrocolloids Efficient production of fungal chitosan utilizing an advanced freeze-thawing method; quality and activity studies. *Food Hydrocolloids*, 81, 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.010>
- Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). *Food Chemistry*. (Springe, Ed.) (4th ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7>
- Bezerra, P. H. S., Souza-Santos, Y. J., Pallone, E. M. J. A., Carvalho, R. A., & Vanin, F. M. (2024). Development of Sodium Alginate Bioplastic Reinforced with Dried Orange Juice By-Product for Use in Packaging. *Polymers*, 16(23), 3382. <https://doi.org/10.3390/polym16233382>
- Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2019). Naturally-derived biopolymers: Potential platforms for enzyme immobilization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 462–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.152>
- Celi-Simbaña, S. S., Andrade-Mora, D. S., Loza-Pavón, S. J., Bermeo-Sierra, T. I., Celi-Simbaña, S. S., Andrade-Mora, D. S., Loza-Pavón, S. J., & Bermeo-Sierra, T. I. (2023). Microplásticos, un problema de salud pública emergente. *Revista Información Científica*, 102. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1028-99332023000100041&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- CORDIS|European Commission. (n.d.). <https://cordis.europa.eu/search/es?q=contenttype%3D%27project%27%20AND%20frame->

- workProgramme%3D%27H2020%27&p=1&num=10&srt=/project/contentUpdateDate:decreasing
- Cornejo Reyes, G. V., Marinero-Orantes, E. A., Funes-Guadrón, C. R., & Toruño, P. J. (2020). Biopolímeros para uso agro industrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termo plástico biodegradable. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 6(11), 1359-1382. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>
- Cuesta, A. R. (2012). Biodegradabilidad de materiales bioplásticos. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/328676031_Biodegradabilidad_de_materiales_bioplasticos
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, 80(7), 7247-7312. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04443-4>
- Giacovelli, C., & otros. (2021). Cómo reducir el impacto de los plásticos de un solo uso. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/como-reducir-el-impacto-de-los-plasticos-de-un-solo-uso>
- Giz. (2024, October 1). SICA: Reducir los residuos plásticos en los mares de Centroamérica y el Caribe. giz.de. <https://www.giz.de/en/worldwide/137310.html>
- Gobierno de el Salvador (2024). *Sector plásticos: Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*. Guías ambientales. Biblioteca Ambiental. (s. f.). Recuperado 9 de marzo de 2024, de <https://bibliotecaambiental.ambiente.gob.sv/documentos/sector-plasticos-principales-procesos-basicos-de-transformacion-de-la-industria-plastica-y-manejo-aprovechamiento-y-disposicion-de-residuos-plasticos-post-consumo-guias-ambientales/>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

- Haque, F., Fan, C., Haque, F., & Fan, C. (2022). Microplastics in the Marine Environment: A Review of Their Sources, Formation, Fate, and Ecotoxicological Impact. En *Marine Pollution—Recent Developments*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107896>
- Hidalgo Betanzos, J. (2013). Sources and uses of Bioplastics (Fuentes y usos de polímeros bioprocedentes). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/248381209_Sources_and_uses_of_Bioplastics_Fuentes_y_usos_de_polimeros_bioprocedentes/citations
- Hurtado, A., Selgas, R., & Serrano Aroca, A. (2020). «El alginato y sus inmensas aplicaciones industriales». *Nereis. Interdisciplinary Ibero-American Journal of Methods*, 12. https://doi.org/10.46583/nereis_2020.12.573
- Irimia-Vladu, M., & Sariciftci, N. S. (2025). Natural polymers for emerging technological applications: Cellulose, lignin, shellac and silk. *Polymer International*, 74(2), 71-86. <https://doi.org/10.1002/pi.6697>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., & Andrady, A. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Johansson, C., Bras, J., Mondragon, I., Nechita, P., Plackett, D., Šimon, P., Svetec, D. G., Virtanen, S., Baschetti, M. G., Breen, C., Clegg, F., and Aucejo, S. (2012). “Renewable fibers and bio-based materials for packaging applications - A review of recent developments,” *BioRes.* 7(2), 2506-2552.
- Kumar, M., Rathour, R., Singh, R., Sun, Y., Pandey, A., Gnansounou, E., Andrew Lin, K.-Y., Tsang, D. C. W., & Thakur, I. S. (2020). Bacterial polyhydroxyalkanoates: Opportunities, challenges, and prospects. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121500>
- Leong, R.Z.L., Teo, S.S., Yeong, H.Y. et al. (2024). Production and characterization of seaweed-based bioplastics incorporated with chitin from ramshorn snails. *Syst Microbiol and Biomanuf* 4, 1096–1105. <https://doi.org/10.1007/s43393-023-00227-7>

- Lopez-Serrano, F., & Mendizabal, E. (2015). Introducción a la ciencia de los polímeros.
- Maraveas, C. (2020). Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. *Polymers*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM12051127>
- Meira, G. R., & Gugliotta, L. M. (2019). *Polímeros: Introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización*.
- Mohammadinejad, R., Kumar, A., Ranjbar-Mohammadi, M., Ashrafizadeh, M., Han, S. S., Khang, G., & Roveimiab, Z. (2020). Recent Advances in Natural Gum-Based Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine: A Review. *Polymers*, 12(1), 176. <https://doi.org/10.3390/polym12010176>
- Nair, N. R., Sekhar, V. C., Nampoothiri, K. M., & Pandey, A. (2017). 32—Biodegradation of Biopolymers. En A. Pandey, S. Negi, & C. R. Soccol (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 739-755). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00032-4>
- Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: Applications and Trends*. William Andrew.
- OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>.
- Pereira, S. B., Sousa, A., Santos, M., Araújo, M., Serôdio, F., Granja, P., & Tamagnini, P. (2019). Strategies to obtain designer polymers based on cyanobacterial extracellular polymeric substances (EPS). *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms20225693>
- Perera, K. Y., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2023). Biopolymer-Based Sustainable Food Packaging Materials: Challenges, Solutions, and Applications. *Foods*, 12(12), 2422. <https://doi.org/10.3390/foods12122422>
- Posada Bustamante, B. (1994). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67–86. Recuperado a partir de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>

- Rodríguez-Gomez, D. (2020). Biopolímeros: De principio a fin. En Á. Marroquín-De Jesús, *Mujeres en la Ciencia Biología* (1.a ed., pp. 107-129). ECORFAN. <https://doi.org/10.35429/H.2020.9.107.129>
- Ruiz-Hitzky, E., Darder, M., Fernandes, F. M., Wicklein, B., Alcântara, A. C. S., & Aranda, P. (2015). Bionanocomposites of sepiolite and palygorskite and their medical issues. En *Natural Mineral Nanotubes Properties and Applications* (pp. 173-196). Apple Academic Press; Scopus. <https://doi.org/10.1201/b18107>
- Sahana, T. G., & Rekha, P. D. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*, 45(6), 2857–2867. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4296-3>
- Serra Costa, S., Lobo Miranda, A., Greque de Moraes, M., Viera Costa, J. A., & Druzian, J. I. (2019). Microalgae as source of polyhydroxyalkanoates (PHAs) — A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 536–547. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.099>
- Singh, R. S., & Kaur, N. (2019). Understanding response surface optimization of medium composition for pullulan production from de-oiled rice bran by *Aureobasidium pullulans*. *Food Science and Biotechnology*, 28(5), 1507-1520. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00585-w>
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>
- Šprajcar, M., Horvat, P., & Kržan, A. (s. f.). *Plastics aligned with nature*.
- Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas biopolymers: progress and prospects. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000500019
- Yang, S.-S., Wu, W.-M., Bertocchini, F., Benbow, M. E., Devipriya, S. P., Cha, H. J., Peng, B.-Y., Ding, M.-Q., He, L., Li, M.-X., Cui, C.-H., Shi, S.-N., Sun, H.-J., Pang, J.-W., He, D., Zhang, Y., Yang, J., Hou, D., Xing, D.-F., ... Criddle, C. S. (2024). Radical

innovation breakthroughs of biodegradation of plastics by insects: History, present and future perspectives. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 18(6). <https://doi.org/10.1007/s11783-024-1838-x>