

TENDENCIAS EN BIOPOLÍMEROS COMO MATERIALES DE ENVASE DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS. UNA REVISIÓN

TRENDS IN BIOPOLYMERS AS PACKAGING MATERIALS FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTS. A REVIEW



¹ Nelson Daniel Pinzón-Neira,
² Rodrigo rey-Galindo

Cómo citar: Pinzón Neira , N. D. ., & Rey Galindo, R. (2025). Tendencias en biopolímeros como materiales de envase de productos farmacéuticos. Una revisión. Publicaciones E Investigación, 19(2). <https://doi.org/10.22490/25394088.9817>

Recibido 10 mayo aprobado 15 junio 2025

RESUMEN

Los biopolímeros provienen de elementos renovables de la naturaleza; es decir, son de origen biobasado y se degradan por microorganismos naturales como bacterias, hongos y algas en condiciones ambientales. En la actualidad, estos biopolímeros se utilizan en el desarrollo de múltiples tecnologías en diferentes campos de investigación, por ejemplo: biomedicina, industria farmacéutica, empaque de alimentos y productos en general, entre otros. El objetivo de esta revisión consiste en identificar los diferentes biopolímeros que han sido resultado de investigaciones entre el 2008 y el 2022, establecer los países con mayor número de publicaciones, los materiales más investigados y las aplicaciones dadas a cada material. Finalmente, se clasifican los biopolímeros según su forma de obtención y sus aplicaciones como envase en la industria farmacéutica. Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó la metodología de análisis de contenido, apoyada en la hermenéutica general y el paradigma interpretativo. En los resultados se puede observar que las publicaciones sobre biopolímeros están ascendiendo año a año; los materiales que más se implementan para su desarrollo son: celulosa, quitosano y ácido poliláctico, y sus aplicaciones más comunes son para empaque de alimentos, biomedicina y empaque en general. Se concluye que los avances científicos en la línea de los biopolímeros son un buen escenario para disminuir el consumo de plásticos convencionales y reducir su impacto ambiental, además de ofrecer garantías en campos como los empaques de alimentos, la biomedicina y los envases de productos farmacéuticos, dado que no son tóxicos y son biodegradables.

Palabras clave: bioplástico; biodegradación; biopolímero; material de empaque; nanocompuestos; PLA.

¹ Administrador Ambiental y magíster en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental. Gerente de Monser Productos Farmacéuticos; danielpinzon1992@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3716-081X

² Administrador Ambiental y magíster en Derecho con énfasis en Recursos Naturales. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, e integrante del Grupo de Investigación en Estudios Ambientales GEA-UD; rodrigo.reyg@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2650-9369

ABSTRACT

Biopolymers come from renewable elements in nature; that is, they are of bio-based origin and are degraded by natural microorganisms such as bacteria, fungi and algae under environmental conditions. Currently, these biopolymers are used in the development of multiple technologies in different fields of research, for example: biomedicine, pharmaceutical industry, food packaging and products in general, among others. The objective of this review is to identify the different biopolymers that have been the result of research between 2008 and 2022, establish the countries with the greatest number of publications, the most researched materials and the applications given to each material. Finally, biopolymers are classified according to how they are obtained and their applications as packaging in the pharmaceutical industry. To develop this research, the content analysis methodology was used, supported by general hermeneutics and the interpretive paradigm. In the results it can be seen that publications on biopolymers are increasing year by year, the materials that are most implemented for their development are: Cellulose, Chitosan and Polylactic Acid, and their most common applications are for food packaging, biomedicine and packaging in general. It is concluded that scientific advances in the line of biopolymers are a good scenario to reduce the consumption of conventional plastics with less environmental impact, in addition to guarantees in fields such as food packaging, biomedicine and for pharmaceutical product packaging, since they are non-toxic and biodegradable.

Keywords: bioplastic; biodegradation; biopolymer; packaging material; nanocomposites; PLA..



1. INTRODUCCIÓN

La producción de envases representa la mayor aplicación de plásticos en la actualidad (Lagaron y Lopez-Rubio, 2011). Para el 2015, esta producción derivada del petróleo superó los 300 millones de toneladas (Mellinas et al., 2015). Cada año se generan 34 millones de toneladas de plásticos como residuos sólidos (Mekonnen et al., 2013). Geyer et al. (2017) estiman que desde 1950 hasta el 2015 se produjeron 6300 millones de toneladas de residuos plásticos acumulados, de los cuales el 9 % han sido reciclados, el 12 % se incineraron y el 79 % han terminado en los océanos, vertederos o sitios destinados de disposición final. Es así que, por cada kilogramo de plástico quemado, puede generarse hasta 2,8 kg de CO₂ (Mellinas et al., 2015) lo que agudiza la problemática del cambio climático.

Además, la producción de envases representa no solo la mayor aplicación de plásticos (Lagaron y Lopez-Rubio, 2010), sino también una carga importante

como contaminación ambiental, debido a su participación en los residuos sólidos municipales (United Nations Environment Programme [UNEP], 2024). Para el 2015, esta producción derivada del petróleo superó los 300 millones de toneladas (Mellinas et al., 2015).

Es importante señalar que los productos manufacturados de materiales renovables para envases ocupan solo el 2 % del mercado mundial (Johansson et al., 2012). Esto se debe a que los biopolímeros presentan bajas propiedades de resistencia mecánica, térmica y de barrera, en comparación con los materiales petroquímicos convencionales.

Además, es necesario tener en cuenta que los combustibles convencionales de petróleo han disminuido su disponibilidad, lo que aumenta su costo con pronóstico de posible escasez (Davis y Song, 2006; Hernández-Silva y Guzmán Martínez, 2009). Para satisfacer

la creciente demanda de sostenibilidad y seguridad ambiental, un número significativo de investigaciones se han dirigido al desarrollo de materiales de envasado y empaque que pueden degradarse rápidamente y mineralizarse por completo en el medioambiente, disminuyendo su impacto ambiental negativo (Jayaramudu et al., 2013; Ortega-Santiago et al., 2023).

El resultado de estas investigaciones son los bioplásticos provenientes de elementos renovables en la naturaleza como la celulosa, el almidón y el azúcar (Meeks et al., 2015), estos plásticos se degradan por microorganismos naturales como bacterias, hongos y algas, acompañados de condiciones ambientales como temperatura, agua y oxígeno (Thakur et al., 2018). Al realizar la presente investigación sobre los bioplásticos como materiales de envase para medicamentos, se evidencia el comportamiento productivo de estos, así como los avances y desarrollos sobre el tema.

Los envases para medicamentos se diferencian de dos maneras. Existe el denominado “envase primario”, que es el contenedor que está en contacto directo con el medicamento, fabricado con materiales de naturaleza variada, diseñado de modo que brinde información y óptima protección tanto a su contenido como al medioambiente (Orantes y Hernández, 2006). Por otro lado, los llamados “envases de segundo tipo” son aquellos que se utilizan como embalaje de productos para evitar averías en el envase primario, proporcionar cuidados especiales al producto o como medida preventiva, y para brindar mayor información al cliente o usuario sobre el medicamento (Borja y Eva, 2006).

En cuanto a los bioplásticos, estos pueden ser un biopolímero derivado de la naturaleza o un polímero que puede retornar a la naturaleza. Su fabricación se asocia a materiales 100 % renovables, polímeros biodegradables o una combinación de materiales renovables y fósiles (Reddy et al., 2013). Los biopolímeros son polímeros formados por la naturaleza durante los ciclos de crecimiento de los organismos; se les conoce como polímeros naturales. Su síntesis generalmente implica reacciones de polimerización de crecimiento en cadena, catalizadas por enzimas de monómeros activos,

que se forman dentro de las células mediante procesos metabólicos complejos (Zhang et al., 2013).

En este sentido, los polímeros biodegradables se pueden dividir, según su origen, en cuatro categorías: (1) polímeros obtenidos directamente de la biomasa, incluidos los polisacáridos como quitosano, almidón y celulosa, y las proteínas como zeína; (2) polímeros sintéticos basados en monómeros petroquímicos, tales como poli ϵ -caprolactona, poli (adipato-co-tereftalato de butileno) y poli (alcohol vinílico) (PVOH); (3) polímeros sintéticos basados en monómeros renovables, por ejemplo, polilactida (PLA); (4) polímeros naturales producidos por microorganismos, típicamente polihidroxialcanoatos (PHA), tales como poli (3-hidroxibutirato) (PHB) y poli (hidroxibutirato-co-hidrovalerato) (PHBV) (Lagarón y Busolo, 2011; Martínez et al., 2019).

La mayor parte de las investigaciones que se han realizado sobre biopolímeros, en relación con su base biológica y biodegradable, se refieren al almidón, PLA, PHB y sus mezclas. Si bien la rigidez y la resistencia de estos suelen ser altas, su aplicación a menudo está limitada por la dificultad en el procesamiento, la sensibilidad al agua y la baja resistencia al impacto (Imre y Pukánszky, 2013).

El poli(ácido láctico) ha recibido mucha atención en los últimos años como una de las alternativas más prometedoras a los plásticos convencionales (Auras et al., 2004). Sus propiedades mecánicas son comparables a las del poliestireno, y, como consecuencia, se utiliza en cantidades cada vez mayores en aplicaciones de envasado (Martin y Avérous, 2001). El representante más común de los PHA es el poli(3-hidroxibutirato), un polímero quebradizo, dado que su polimerización enzimática conduce a la formación de macromoléculas con una estructura estereoquímica altamente ordenada y, por lo tanto, gran cristalinidad (Sudesh et al., 2000). Aunque el aumento de las capacidades ha dado lugar a una producción más confiable y a una disminución en el precio de los biopolímeros, su costo aún supera al de la mayoría de los polímeros comerciales (Imre y Pukánszky, 2013).

El objetivo de esta investigación es identificar las tendencias mundiales de bioplásticos aplicados a envases de medicamentos en el periodo 2008-2022. Se reconocerán los bioplásticos según el recurso de origen y el producto que se obtenga de este. Luego, se clasificarán por las aplicaciones industriales que se les otorgan a cada material en particular para envases farmacéuticos. Finalmente, se identificará el biopolímero con mayor número de investigaciones para su uso práctico como envase farmacéutico.

2. METODOLOGÍA

La presente revisión se encuentra fundamentada en la metodología de análisis de contenido (Bardin, 1996; Fernández, 2002; López-Noguero, 2002; Valbuena-Ussa, 2011; Hernández y Mendoza, 2018). Además, se apoya en la hermenéutica general (Grondin, 2014) y el paradigma interpretativo (Vasilachis de Gialdino, 2006), con el fin de construir la interpretación conceptual que permite inferir la dirección de las investigaciones consultadas y analizadas sobre biopolímeros en el mundo.

Se aplicó a 196 artículos de investigación sobre empaques biopolímeros, en una escala temporal entre el 2008 y el 2022 (quince años). Las bases de datos utilizadas para identificar los documentos fueron Scopus, Science Direct y Springer Link.

Sobre los documentos identificados se realizó una sistematización que permitió establecer las

categorías explicativas. El filtro inicial se aplicó con la frase clave “Biopolymer packaging pharmaceutical”, obteniéndose 14 032 artículos (Scopus 1 %, Springer Link 36 %, Science Direct 63 %). Al especificar el tiempo, se identificaron 8269 artículos como universo.

La búsqueda inicial se realizó por temáticas en cada base de datos, de la siguiente manera: para Scopus, “Chemistry”, “Engineering”; para Springer Link, “Chemistry” “Polimeric science”, “Engineering”, y para Science Direct, “Chemistry”, “Engineering”. Posteriormente, se seleccionaron los artículos que incluyeran al menos una de las siguientes palabras clave en el título, como unidades de análisis: “biopolymer”, “packaging”, “drugs”, “composites”, “biomaterial”. Esto permitió obtener 201 artículos. Se encontraron 5 artículos duplicados. Finalmente, el análisis de contenido y la inferencia interpretativa se concentraron en la revisión de 196 documentos.

La información recolectada se clasificó según una adaptación del análisis clúster jerárquico (Kaufman y Rousseeuw, 2005), con grupos reconocidos, para encontrar clasificaciones por segmentos a partir de sus características. La pertinencia documental se basó en hallar textos con información relacionada con el objeto de la revisión, utilizando inicialmente la frase de búsqueda (biopolymer + packaging + pharmaceutical), con la temporalidad entre 2008 y 2022 (véase la tabla 1).

Tabla 1. Clúster inicial

Fase inicial			Área de estudio			Palabras clave			
Bases de datos	Biopolymer + packaging + pharmaceutical	Año (2008-2022)	Chemistry	Engineering	Polimeric science	1	2	3	Sub total
Scopus	188	126	42	12	0	13	8	1	22
Science Direct	8825	4551	492	169	0	56	19	1	76
Springer Link	5019	3592	335	48	269	78	15	5	98
Subtotal	14 032	8269	869	229	269	147	42	7	196
Total	14 032	8269	1367			196			

Fuente: Autores

Como categorías de análisis, para cada uno de los artículos seleccionados, se formularon criterios relacionados con autores, año de publicación, país de origen, biopolímero utilizado, origen del biopolímero, forma de obtención y aplicación del insumo. Para los artículos tipo revisión, se filtró por la expresión “biopolímeros”; en estos casos, se establecieron y cuantificaron el origen, la forma de obtención y la aplicación del biopolímero.

La presente investigación profundizó en la información clave sobre los biopolímeros, contenida en la estructura temática de los artículos de investigación analizados. Además, se incluyó el tipo de biopolímero, su origen, forma de obtención y aplicación.

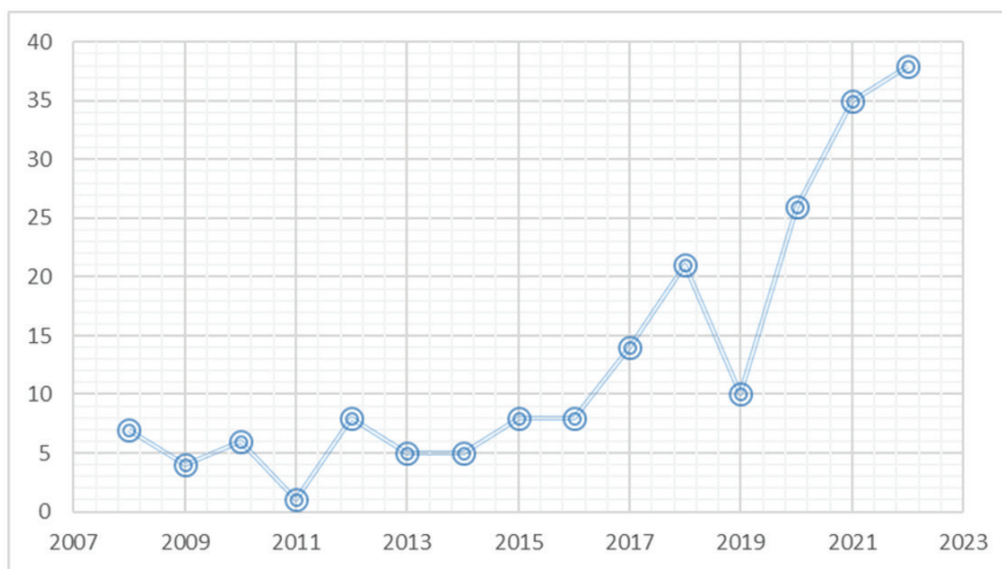
En varios de estos artículos se encontraron múltiples hallazgos sobre los materiales.

3. RESULTADOS

Tendencias en investigación de biopolímeros

Para analizar el comportamiento de las publicaciones sobre biopolímeros durante el periodo 2008-2022, se utilizó el método estadístico de dispersión lineal. Se evidencia un incremento sostenido en las publicaciones sobre la temática año a año (véase la figura 1). El año con mayor número de artículos es el 2022, con 19 % de los documentos registrados.

Figura 1. Publicaciones al año sobre biopolímeros



Fuente: Autores

El comportamiento de la revisión por países muestra que India es el país con mayor número de publicaciones en el periodo analizado, con 33 artículos, seguido de China (14 artículos) y Brasil (13 artículos) (véase la tabla 2). En la presente revisión se determinó que las empresas exportadoras de materiales para pruebas

químicas de biopolímeros provienen de Estados Unidos, Canadá e India. Este último país se ha especializado en el desarrollo académico de los biopolímeros, con la cooperación de universidades locales y colaboración internacional.

Tabla 1. Temáticas de publicación por país

País	Polímero	Referencias
Alemania Total (5)	Pullulano	Gutiérrez y Alvarez (2017)
	PLA	Kale, Kijchavengkul et al. (2007); Mallakpour y Jarang (2018)
	Biomasa	Friedrich (2022)
	Nanopartículas	Ghanbari Adivi et al. (2019)
	PPC	Henke et al. (2017)
Arabia Saudi Total (4)	PHA	Rajan et al. (2018)
	CMC	Ahmed K.K et al. (2022)
	Nanocompuestos	Wazzan (2021)
	Quitosano	Abutalib y Rajeh (2021)
Argentina Total (3)	Quitosano	Ansorena et al. (2018)
	Celulosa	Villarreal et al. (2021); De Oliveira et al. (2021)
	Quitosano	Favatela et al. (2022)
Brasil Total (13)	PHA-PLG	Fasciotti (2017)
	Biopolímeros	De Mesquita et al. (2010); Alves Lopes et al. (2020); Parente et al. (2023); Núñez-Gómez et al. (2021); Da Rosa et al. (2020)
	PLA	Lopes et al. (2012)
	PVA	Silva et al. (2008)
	Quitosano	De Mesquita et al. (2010)
	Celulosa	Meneguín et al. (2020)
	Nanocompuestos	Rodrigues et al. (2020); Kostag et al. (2019)
Canadá Total (6)	Biopolímeros	Shen et al. (2014); Soares et al. (2018)
	Gelatina	Duquette y Dumont (2019)
	Pullulano	Miao y Hamad (2013)
	PLA	Chow et al. (2008)
	PBS-PBAT	Muthuraj et al. (2014)
	Quitosano	Akhlaghi et al. (2013)
Chile	Celulosa	Oyarce et al. (2022)
China Total (14)	Celulosa	Wang et al. (2018)
	PLA	Zhang et al. (2018); Xian et al. (2018); Xie et al. (2014); Wang et al. (2014)
	PHMC	Hu et al. (2018)
	Biopolímeros	Xing et al. (2021); Qiu et al. (2021); AL-Oqla et al. (2022); Zheng-Yang et al. (2020)
	Nanopartículas	Wang et al. (2022); Hashim et al. (2022)
	Polifenoles	Zhang et al. (2021)
	Quitosano	Jiang et al. (2022); Zhao et al. (2022); Dong et al. (2022); Zou et al. (2020)
Colombia Total (2)	Nanofibras	Rodríguez-Sánchez et al. (2021)
	PHA	Vega-Castro et al. (2021)
Corea	Biopolímeros	Rhim et al. (2007)
Dinamarca	Celulosa	Siró y Plackett (2010)

País	Polímero	Referencias
Egipto Total (6)	PVA	El-Gamal et al. (2018)
	Quitosano	Elhussieny et al. (2020); Ahmed et al. (2021)
	Celulosa	Elhussieny et al. (2020)
	Nanopartículas	Moustafa et al. (2022)
	Biopolímeros	Ibrahim et al. (2021)
España Total (8)	Alginato	Serrano-Aroca et al. (2018)
	Biopolímeros	Quiles-Carrillo et al. (2019); Aznar et al. (2019)
	PLA	Perez-Masia et al. (2013)
	Nano partículas	Abdullah et al. (2022)
	Polisacáridos	Rincón et al. (2021)
	Oligómeros	Ubeda et al. (2021)
Estados Unidos Total (6)	Celulosa	Janjarasskul y Krochta (2010)
	Biopolímeros	Williamson y Hatzakis (2019); Virtanen et al. (2017); Kumar et al. (2009); Bandyopadhyay-Ghosh et al. (2018); Farris et al. (2009); Correa et al. (2016); Biswas et al. (2022)
	PLA	Correa et al. (2016); Resano-Goizueta et al. (2018); Satam et al. (2018)
	PHA	York et al. (2008)
	PHA-PLG	Zhang et al. (2013)
Francia Total (2)	PLA	Chauvet et al. (2017)
	Biopolímeros	Paul et al. (2021)
Grecia	PLA	Liarou et al. (2018)
Holanda Total (2)	Biopolímeros	Mooibroek et al. (2007)
	Gelatina	Scholten et al. (2014)
Hungria Total (3)	PLA	Vidović (2016)
	Biopolímeros	Yi et al. (2022); Takács et al. (2020)

País	Polímero	Referencias
India Total (33)	Celulosa	Neera y Batra (2015); Mishra et al. (2018); Mishra et al. (2021); Kalyani y Khandelwal (2021)
	Biopolímeros	Luckachan y Pillai (2011); Sofi et al. (2019); Shahadat et al. (2017); Visakh y Thomas (2010); Selvalakshmi et al. (2017); Goel et al. (2023); Kumar et al. (2022); Vibha y Negi (2020); Kanatt y Makwana (2020); Das et al. (2022); Thulasisingh et al. (2022); Kaur et al. (2020); Tambawala et al. (2022); Umesh et al. (2022); Priyadarsini et al. (2021); Manimohan et al. (2020a); Aquinas et al. (2022); Agrawal et al. (2022); Gasti et al. (2021)
	PLA	Sangeetha et al. (2018); Sharmila et al. (2013).
	PHA	Mathuriya y Yakhmi (2017).
	Quitosano	Malhotra et al. (2015); Divakara et al. (2010); Narasagoudr et al. (2020); Yadav et al. (2020); Yadav et al. (2021); Manimohan et al. (2020b); Hiremani et al. (2022)
	WPBA	Zafar et al. (2015)
	Mucilagos	Rohini et al. (2020)
	Gelatina	Sharma et al. (2021)
	Nanocompuestos	Gupta et al. (2022); Thivya et al. (2021); Chaudhary et al. (2020); Kendre et al. (2022)
Indonesia Total (1)	Nanocompuestos	Hasan et al. (2019)
Irán Total (9)	Alginato	Dekamin et al. (2018)
	Celulosa	Erfani et al. (2022); Abdulkhani et al. (2020)
	Biopolímeros	Alizadeh-Sani et al. (2020); Karimi et al. (2020); Ghasempour et al. (2022)
	Nanocompuestos	Janani et al. (2020); Zahiri Oghani et al. (2021); Sherafatkhah et al. (2021)
Iraq	Quitosano	Ahmed M.K et al. (2022)
Irlanda Total (2)	Biopolímeros	Khodaei et al. (2021); Garavand et al. (2022)
Italia Total (5)	Celulosa	Rovera et al. (2018)
	PLA	Trombino et al. (2012); Scaffaro et al. (2016)
	Quitosano	Rossi et al. (2013)
	Nanopartículas	De Marco (2022)
	Biopolímeros	Marassi et al. (2021)
Korea Total (2)	PP-PM	Basavaraja et al. (2010)
	Celulosa	Rukmanikrishnan et al. (2021)
Malasia Total (5)	PLA	Bakri et al. (2018)
	PHA	Hema et al. (2013)
	Quitosano	Julkapli et al. (2011)
	Biopolímeros	Asyraf et al. (2022); Mohd Basri et al. (2021)
Marruecos Total (2)	Celulosa	El Achaby et al. (2018)
	Quitosano	Orkhis y Ettaqi (2022)

País	Polímero	Referencias
Mexico	Quitosano	Fonseca-García et al. (2021)
Pakistan Total (4)	Pullulano	Tabasum et al. (2018)
	PHA	Zia et al. (2015)
	Biopolímeros	Muneer et al. (2021)
	PVA	Asgher et al. (2020)
Peru	Biopolímeros	Torres et al. (2019)
Polonia Total (9)	Celulosa	Kowalczyk et al. (2015); Ciecholewska et al. (2021)
	Biopolímeros	Sikorska et al. (2017)
	Proteína de suero	Kawecka-Radomska et al. (2015)
	PP-PM	Wiącek et al. (2017)
	Quitosano	Jamróz et al. (2021)
	Alginato	Kurczewska et al. (2021)
	Gelatina	Tkaczewska et al. (2021)
	Nanocompuestos	Bajer et al. (2020)
Portugal Total (3)	PLA	Pinto et al. (2013)
	Alginato	Lomartire et al. (2022)
	Carrageenan	Lomartire et al. (2022)
Rep. De Korea Total (5)	PVA	Tak et al. (2019)
	Pululan	Lee et al. (2019); Priyadarshi et al. (2021)
	Pectina	Lee et al. (2019)
	Quitosano	Kim et al. (2021)

Fuente: Autores

Biopolímeros, biobasados y naturales

La investigación sobre biopolímeros presenta una clasificación inicial según su origen. Es así que los polímeros de base biológica provienen de materiales derivados de la biomasa, como productos agrícolas, microorganismos, algas o crustáceos, y también polímeros parcialmente compuestos o sintetizados (Hottle et al., 2013). Para estos polímeros se identificaron 12 categorías, según la materia prima, los reactivos y procesos químicos, las cuales se subdividen en 30 insumos, de acuerdo con el recurso del cual provienen. Además, se han documentado 21 métodos de obtención o desarrollos tecnológicos. El polímero con mayor representación de base biológica es el ácido poliláctico, con 10 insumos utilizados,

seguido del acetato de polivinilo (PVA), con 9 insumos (véase la tabla 3).

Por otro lado, los polímeros naturales son macromoléculas que se pueden encontrar en la naturaleza, como proteínas, polisacáridos, terpenos y lípidos (Sell et al., 2010). Según la revisión, estos polímeros naturales se han dividido en 8 categorías, que, a partir de los compuestos que extraen de los recursos naturales, se subdividen en 43 insumos, para los cuales se presentan 28 métodos de obtención o desarrollos tecnológicos. Es así que la celulosa cuenta con 22 diferentes materias primas para su obtención, y el quitosano con 18, por lo que son los elementos más representativos (véase la tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de biopolímeros

Tipo de polímero	Polímero	Recurso de origen	Producto / obtención	Referencia
Natural	Alginato	Algas	Hidrogeles	Serrano-Aroca et al. (2018)
			Neutralización	Lomartire et al. (2022)
	Carrageenan	Coco babasú	Reticulación	Tak et al. (2019)
		Minerales de halloysita	Adsorbentes	Kurczewska et al. (2021)
		Algas	Hidrocoloides	Lomartire et al. (2022)
		Hoja de olivo	Extracción por microondas	Da Rosa et al. (2020)
	Celulosa	Frutas	Nanotecnología (filogenética)	Neera et al. (2015)
			Nanofibras	Sofi et al. (2019)
		Madera	Nanofibras	Hansen et al. (2012)
		Plantas	Polímeros reforzados	Miao y Hamad (2013)
		Almidón	Biocompuestos	Gutiérrez y Alvarez (2017)
		Hongos	Nanocompuestos	Wang et al. (2018)
		Residuos vegetales	Desfibrilación bacteriana	Meneguín et al. (2020)
		Cascara de arroz	Difracción rayos X	Elhussieny et al. (2020)
		Canela	Emulsión	Erfani et al. (2022)
		Bacterias de celulosa	Reticulación	Ciecholewska-Juśko et al. (2021)
		Salicornia neei (planta)	Extracción y fraccionamiento	Villarreal et al. (2021)
		Xilano	Difracción de rayos X	Abdulkhani et al. (2020)
		Sílice	Difracción de rayos X	Rukmanikrishnan et al. (2021)
		Plata	Difracción de rayos X	Rukmanikrishnan et al. (2021)
		Fibras de coco	Espectroscopia infrarroja	Gupta et al. (2022)
		Cascara de cacahuete	Espectroscopia infrarroja	Gupta et al. (2022)
		Arrurruz	Nanoemulsión	De Oliveira et al. (2021)
		Bambú	Difracción de rayos X	Hasan et al. (2019)
		Lechuga de agua	Microscopia electrónica de barrido	Umesh et al. (2022)
		Tallo de chalota	Extracción asistida por microondas	Thivya et al. (2021)
		Semillas de tamarindo	Extracción asistida por microondas	Thivya et al. (2021)
		Agar	Espectroscopia infrarroja	Kalyani y Khandelwal (2021)
		Cáñamo	Espectroscopia infrarroja	Barbash et al. (2022)
	Mucilagos	Ocimum bacilicum	Difracción de rayos X	Rohini et al. (2020)

Tipo de polímero	Polímero	Recurso de origen	Producto / obtención	Referencia
Natural	Quitosano	Algas	Catalizador	Shahadat et al. (2017)
			Emulsionante	Zia et al. (2017)
			Fibras	Virtanen et al. (2017)
		Hongos	Nanocompuestos	Shahadat et al. (2017)
		Madera (eucalipto)	Nanocompuestos	Wiącek et al. (2017)
		Cangrejo, krill, camarón	Polímeros reforzados	Divakara et al. (2010)
		Almidón de maíz	Difracción de rayos X	Fonseca-García et al. (2021)
		Residuos de camarón	Resonancia magnética nuclear	Elhussieny et al. (2020)
		Hojas té negro	Difracción de rayos X	Ahmed et al. (2022)
		Furcellaria	Espectroscopia infrarroja	Jamróz et al. (2021)
		Arroz glutinoso	Difracción de rayos X	Soe et al. (2020)
		Quercetina	Espectroscopia infrarroja	Yadav et al. (2020)
		Ácido gálico	Espectroscopia infrarroja	Yadav et al. (2021)
		Melanina	Entrecruce molecular	Zhao et al. (2022)
		Sílice	Difracción de rayos X	Dong et al. (2022)
		Halloysita	Electrohilado	Zou et al. (2020)
		Hoja de ortiga	Espectroscopia infrarroja	Zahiri Oghani et al. (2021)
		Ácido cítrico	Difracción de rayos X	Favatela et al. (2022)
		Reactivo de Schiff	Difracción de rayos X	Manimohan et al. (2020a)
		Pluma de pollo	Espectroscopia infrarroja	Orkhis y Ettaqi (2022)
	Gelatina	Caucho seco	Solución de látex	Sukhlaaied y Riyajan (2016)
		Gelatina	Fruto de bael	Sharma et al. (2021)
		Piel de carpa	Hidrolizado	Tkaczewska et al. (2021)
		Goma gellan	Espectroscopia infrarroja	Wu L. et al. (2021)
	Pullulano	Algas	Fibras	Tabasum et al. (2018)
			Hidrogeles	Tabasum et al. (2018)
			Nanofibras	Tabasum et al. (2018)
		Soya	Fundición en solución	Lee et al. (2019)
		Pectina	Fundición en solución	Priyadarshi et al. (2021)
	Proteína de suero	Suero de leche	Gel	Kawecka-Radomska et al. (2015).
		Goma persa	Difracción de rayos X	Ghasempour et al. (2022)

Tipo de polímero	Polímero	Recurso de origen	Producto / obtención	Referencia
Biobase	Policaprolactona (PCL)	Café	Epóxidos (lípidos)	Williamson y Hatzakis (2019)
		Aceite plantas	Electrohilado	Bhullar et al. (2015)
	PLA (ácido poliláctico)	Maíz	Hidrogeles	Duquette y Dumont (2019)
			Electricidas	Perez-Masia et al. (2013)
			Gomas	Zhang et al. (2018)
			Fibras	Scaffaro et al. (2016)
			Nanocristales	Scaffaro et al. (2017)
			Espuma de polímeros	Chauvet et al. (2017)
		Caña azúcar	Polímeros reforzados	Xian et al. (2018)
		Semilla jaca	Fibras	Sharmila et al. (2013)
		Acacias	Polímeros reforzados	Bakri et al. (2018)
		Yuca	Polímeros reforzados	Sangeetha et al. (2018)
		Hongos	Fibras	Satam et al. (2018)
		Soya	Fibras	Janjarasskul y Krochta (2010)
		Maíz	Redisolución	Aznar et al. (2019)
		Oligómeros	Extracción sorptiva	Ubeda et al. (2021)
		Fibra de lino	Mezclas	Asyraf et al. (2022)
	Polifenoles	Nanofibras de Te	Electrohilado	Zhang et al. (2021)
	Poliuretano	Quitina	Difracción de rayos X	Moustafa et al. (2022)
		Colofonia	Espectroscopia infrarroja	Moustafa et al. (2022)
	PHA	Colágeno	Fibras	Vasil'ev (2007)
		Bacteria Cupriavidus	Nanocompuestos	Hema et al. (2013)
		Bacterias	Polímeros reforzados	Yeo et al. (2018)
		Aguas residuales	Espectroscopia infrarroja	Paul et al. (2021)
		Cascara de yuca	Electrohilado	Vega-Castro et al. (2021)
	PHA-PLG	Microorganismos (almidón)	Fibras	Mlalila et al. (2018)
		Microorganismos (hongos)	Morfología 3D	Bandyopadhyay-Ghosh et al. (2018)
	PBS-PBAT	Almidón	Fibras	Muthuraj et al. (2014)
		Fibroína de seda	Nanofibras electro hiladas	Zheng-Yang et al. (2020)
	PHMC	Microorganismos	Hidrogel	Hu et al. (2018)

Tipo de polímero	Polímero	Recurso de origen	Producto / obtención	Referencia
Biobase	PPC	Microorganismos	Espuma de polímeros	Henke et al. (2017)
	PP-PM	Microorganismos	Nanocompuestos	Basavaraja et al. (2010)
	PVA	Microorganismos	Gel	Silva et al. (2008)
			Plastificantes	Silva et al. (2008)
		Palma aceitera	Nanofibras	Solikhin et al. (2018)
		Nanopartículas de selenio	Difracción de rayos X	Al-hakimi et al. (2022)
		Frijol	Sundilac	Tak et al. (2019)
		Aloe vera	Espectroscopia infrarroja	Kanatt y Makwana (2020)
		Cascara de arroz	Microscopia electrónica de barrido	Asgher et al. (2020)
		Glicerol	Espectroscopia infrarroja	Asgher et al. (2020)
		Alginato de sodio	Difusión hidrófila	Singh et al. (2022)
		Goma guaran	Difracción de rayos X	Gasti et al. (2021)
	WPBA	Semillas vegetales	Polímeros reforzados	Zafar et al. (2015)

Fuente: Autores

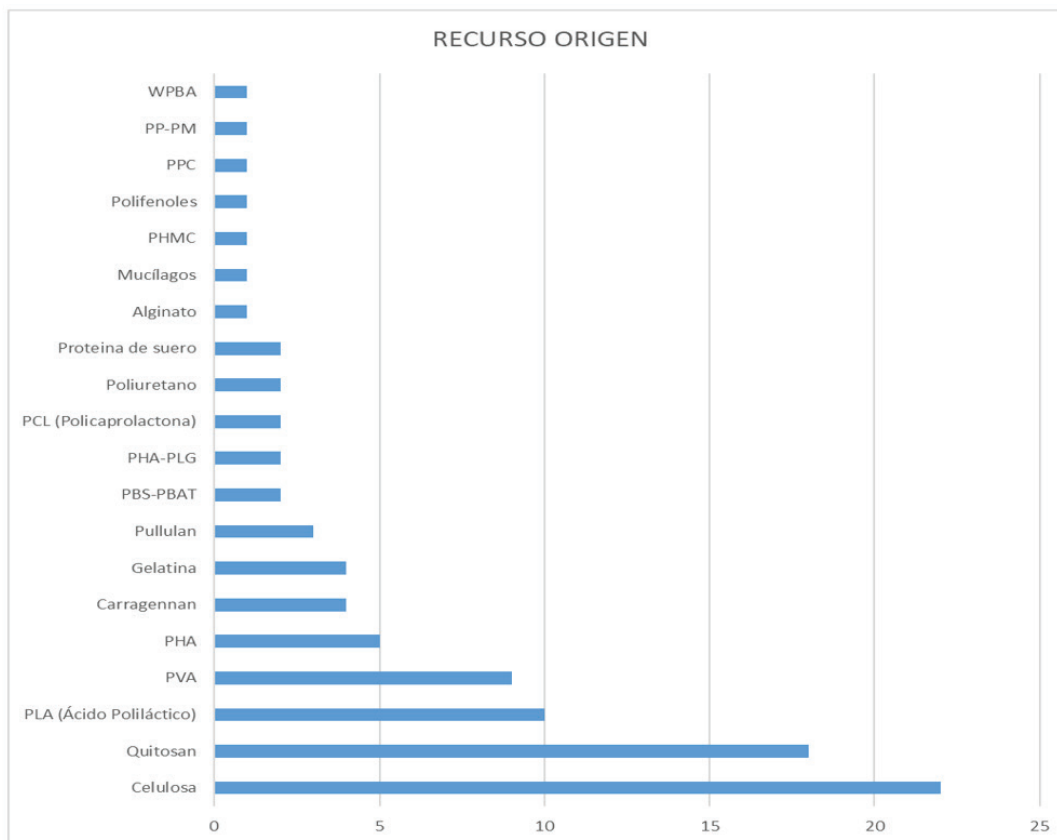
Aplicación de biopolímeros

Los biopolímeros son compuestos de cadena larga formados por subunidades que también son cadenas largas (Malhotra et al., 2015). Gracias a esta característica, se han desarrollado múltiples investigaciones y se han descubierto diversos usos para estos materiales. El método de obtención más común es la polimerización del compuesto básico, por ejemplo, almidones o nanopartículas de laboratorio,

que dan como resultado insumos útiles para diferentes aplicaciones.

De los artículos revisados, el biopolímero natural con mayor número de investigaciones hasta el 2022 es la celulosa, con 22 desarrollos diferentes (véase la figura 2). Este polisacárido se encuentra entre los más utilizados en la producción de películas biodegradables (Yu et al., 2019), debido a su facilidad de extracción.

Figura 2. Cantidad de recursos desarrollados como biopolímeros



Fuente: Autores

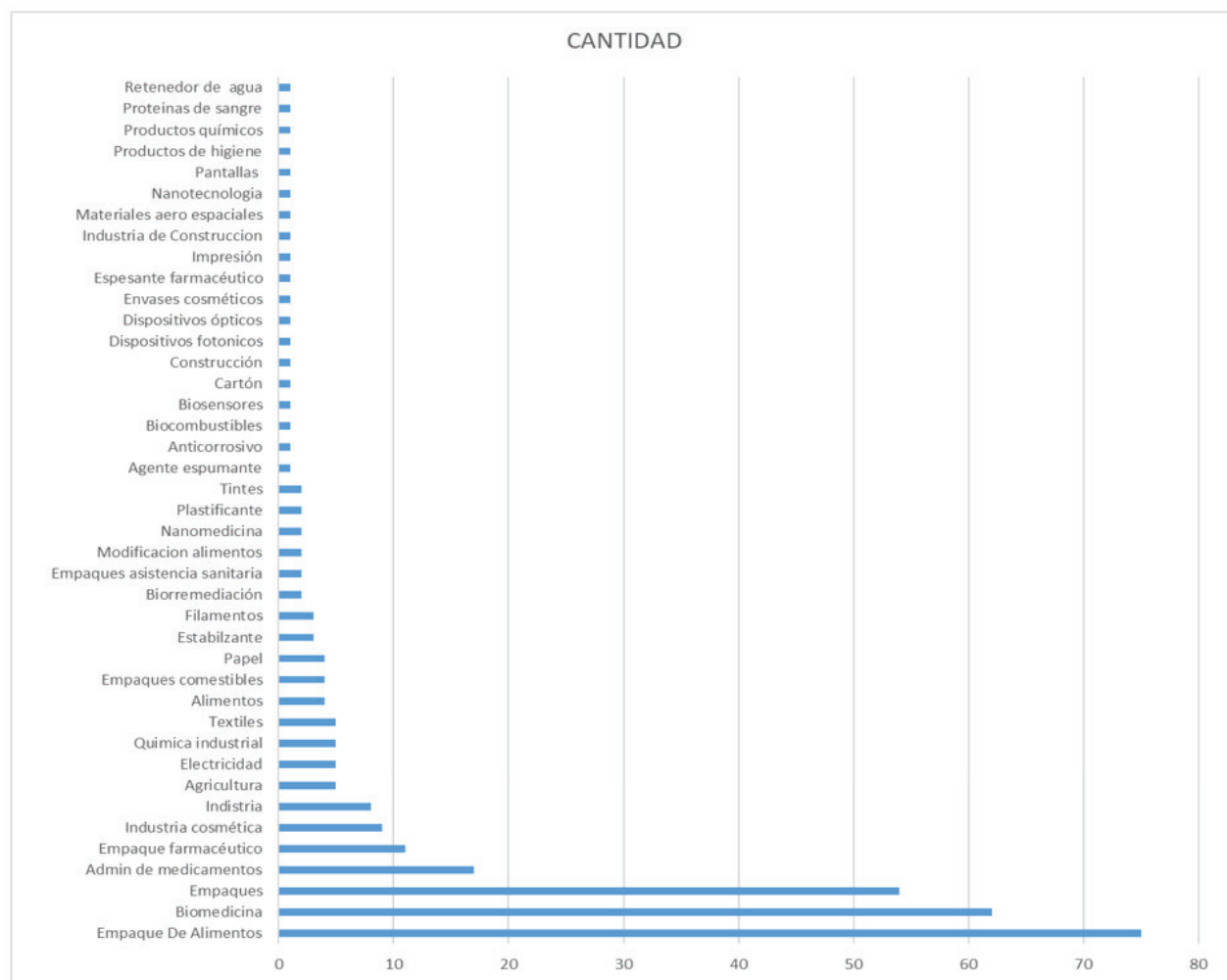
En cuanto a los biopolímeros biobasados, el ácido poliláctico (PLA) presenta el mayor número de investigaciones, con 10 diferentes procesos. Esto se debe a sus versátiles aplicaciones industriales (John et al., 2009). La producción del ácido poliláctico ha aumentado debido a su capacidad de ser compostable y al uso de recursos renovables para su obtención. La producción biotecnológica de ácido láctico ofrece varias ventajas en comparación con la síntesis química, como el bajo costo de los sustratos, la baja temperatura de producción y el bajo consumo de energía (Madhavan et al., 2010).

Los resultados muestran que, respecto al desarrollo de productos, el “empaquete de alimentos” es la industria para la cual se han realizado más estudios,

con 75 investigaciones diferentes (véase la figura 3). Es decir, del total de la muestra seleccionada, el 38 % de los artículos relaciona el empaque de alimentos como un posible uso de los biopolímeros. Otro factor relevante es el aumento significativo, año a año, de hasta cinco veces más de investigaciones relacionadas con los materiales de empaque de alimentos de origen bio-base. Este aumento en las investigaciones se presenta por el potencial que tienen los materiales en cuanto a sus características físicas y mecánicas para ser usados como polímeros en la industria de los empaques (Abdullah et al., 2022).

El segundo sector con mayor número de aplicaciones es la biomedicina. Esto se debe principalmente a que los biopolímeros no presentan toxicidad y están

Figura 3. Aplicación de biopolímeros 2008-2022



Fuente: Autores

autorizados para uso médico, según la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés Food and Drug Administration) de Estados Unidos (Philp et al., 2005). Además, estos materiales han ofrecido respuestas para influir en la función metabólica de las células en una variedad de formas, dado que pueden servir como sustrato energético, por su carácter no cargado y su tamaño pequeño (Philp et al., 2005). También presentan avances en la ingeniería de tejidos, como puentes tisulares y resistencia a la adhesión celular (Wang et al., 2007), e incluso pueden utilizarse como hueso artificial, capaz de ser reabsorbido por el organismo (Pant et al., 2013).

En cuanto al desarrollo de envases para la industria farmacéutica, el ácido poliláctico (PLA) es el material con mayor número de investigaciones destinadas a su uso como empaque farmacéutico (véase la tabla 4). La constancia sobre este material se debe a los efectos físico-mecánicos notables para aplicaciones industriales, lo que le permite avanzar como material de empaque (Perez-Masia et al., 2015). Además, presenta aspectos de calidad como estabilidad, uniformidad del contenido y liberación del contenido. Por otra parte, en cuanto a la resistencia mecánica, esta puede verse afectada durante las operaciones de procesamiento (Abreu et al., 2015).

Tabla 4. Biopolímeros utilizados para envases

Material	Método	País	Año	Referencias
Celulosa	Espectroscopia infrarroja	India	2021	Kalyani y Khandelwal
Gelatina	Espectroscopia infrarroja	Egipto	2021	Ibrahim et al.
Nanocompuestos	Mezclas	India	2022	Kendre et al.
Nanocompuestos	Precipitación química	Alemania	2019	Ghanbari Adivi et al.
PHA	Mezclas	Sur África	2022	Ibrahim et al.
PLA	Grupo fenólicos	Italia	2012	Trombino et al.
PLA	Espectroscopia infrarroja	Irán	2020	Karimi et al.
PLA	Electrohilado	Hungría	2022	Yi et al.
PLA	Hidrolisis	China	2018	Xian et al.
Pullulano	Microscopia electrónica de barrido	Pakistán	2018	Tabasum et al.
PVA	Espectroscopia infrarroja	Tailandia	2019	Riyajan
Quitosano	Difracción rayos X	Tailandia	2020	Soe et al.

Fuente: Autores

Otro biopolímero que presenta excelente respuesta en el empaque de productos farmacéuticos es el poli(alcohol vinílico) de Pullulan, es un biopolímero biocompatible y no tóxico que se puede obtener como solvente y utilizar como material de embalaje de medicamentos (Tabasum et al., 2018).

CONCLUSIONES

Existe una tendencia marcada en la realización de investigaciones sobre biopolímeros en los últimos años. Por ejemplo, India es el país con el mayor número de investigaciones de la muestra analizada, donde existe una fuerte profundización académica sobre el tema. Además, se logró identificar dos tipos de biopolímero de acuerdo a su origen: (1) los de base biológica, que presentan 21 métodos de desarrollo tecnológico y de obtención —el ácido poliláctico (PLA) y el acetato de polivinilo (PVA) son los de mayor representación—, y (2) los de base natural, con 28 métodos, sinodo la celulosa y el quitosano los más utilizados.

Asimismo, de la información analizada entre el 2008 y el 2022, las investigaciones sobre

biopolímeros muestran un comportamiento ascendente, en algunos casos con un crecimiento de hasta 5 veces con respecto al año anterior. Los países con mayor número de publicaciones son India, China y Brasil, respectivamente, con una participación de 60 de los 196 artículos revisados.

En la actualidad, los biopolímeros representan una posibilidad real para remplazar los plásticos convencionales derivados del petróleo. Esta investigación demuestra que se han utilizado 43 materiales de origen bio-base para el desarrollo de biopolímeros, con 28 formas de obtención diferentes, e investigado 41 usos potenciales.

De acuerdo con la relación de las posibles aplicaciones de los biopolímeros, se encontró como tendencia que las investigaciones se orientan a su uso como empaques de alimentos y en biomedicina, dadas sus características físicas y mecánicas en estos campos, además de no ser tóxicos y presentar posibilidades de bioasimilación con el cuerpo humano.

Del mismo modo, el ácido poliláctico (PLA), con cuatro aplicaciones como empaque farmacéutico, es

el biopolímero más desarrollado hasta ahora, por su maleabilidad y capacidad de síntesis con otros materiales para su bioasimilación, lo que permite reforzar sus características para maximizar y mejorar sus usos. Su fabricación a partir de subproductos agrícolas garantiza una disponibilidad suficiente para su desarrollo industrial, no produce contaminación atmosférica en su fabricación y minimiza la generación de residuos por su característica compostable.

En las diferentes investigaciones revisadas, los biopolímeros se mezclan con otros insumos para evitar que se interfiera con el propósito del medicamento. Por tanto, la clave para determinar cuál es el material idóneo como envase de medicamentos está en las mezclas exitosas de biopolímeros con otros materiales, que permita la estabilidad del producto y puedan ser avaladas para este uso.

REFERENCIAS

- Abdulkhani, A., Najd Mazhar, A., Hedjazi, S., y Hamzeh, Y. (2020). Preparation of xylan bio-composite films reinforced with oxidized carboxymethyl cellulose and nanocellulose. *Polymer Bulletin*, 77(12), 6227-6239. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-03075-5>
- Abdullah, J. A. A., Jiménez-Rosado, M., Benítez, J. J., Guerrero, A., y Romero, A. (2022). Biopolymer-based films reinforced with FexOy-nanoparticles. *Polymers*, 14(21), 4487. <https://doi.org/10.3390/polym14214487>
- Abreu, A. S., Oliveira, M., de Sá, A., Rodrigues, R. M., Cerqueira, M. A., Vicente, A. A., y Machado, A. V. (2015). Antimicrobial nanostructured starch based films for packaging. *Carbohydrate Polymers*, 129, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.04.021>
- Abutalib, M. M., y Rajeh, A. (2021). Enhanced structural, electrical, mechanical properties and antibacterial activity of Cs/PEO doped mixed nanoparticles (Ag/TiO₂) for food packaging applications. *Polymer Testing*, 93, 107013. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107013>
- Agrawal, R., Kumar, A., Singh, S., y Sharma, K. (2022). Recent advances and future perspectives of lignin biopolymers. *Journal of Polymer Research*, 29(6), 222. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03068-5>
- Ahmed, K. K., Hussien, S. A., y Aziz, S. B. (2022). Transferring the wide band gap chitosan: POZ-based polymer blends to small optical energy band gap polymer composites through the inclusion of green synthesized Zn²⁺-PPL metal complex. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(7), 103913. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103913>
- Ahmed, M. K., Moydeen, A. M., Ismail, A. M., El-Naggar, M. E., Menazea, A. A., y El-Newehy, M. H. (2021). Wound dressing properties of functionalized environmentally biopolymer loaded with selenium nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1225, 129138. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129138>
- Akhlaghi, S. P., Berry, R. C., y Tam, K. C. (2013). Surface modification of cellulose nanocrystal with chitosan oligosaccharide for drug delivery applications. *Cellulose*, 20(4), 1747-1764. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9954-y>
- Al-hakimi, A. N., Asnag, G. M., Alminderej, F., Alhagri, I. A., Al-Hazmy, S. M., y Abdallah, E. M. (2022). Enhanced structural, optical, electrical properties and antibacterial activity of selenium nanoparticles loaded PVA/CMC blend for electrochemical batteries and food packaging applications. *Polymer Testing*, 116, 107794. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107794>
- Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., y McClements, D. J. (2020). Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO₂ and essential oil: Application for preservation of refrigerated meat. *Food Chemistry*, 322, 126782. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126782>
- AL-Oqla, F. M., Alaaeddin, M. H., Hoque, M. E., y Thakur, V. K. (2022). Biopolymers and biomimetic materials in medical and electronic-related applications for environment-health-development nexus: Systematic review. *Journal of Bionic Engineering*, 19(6), 1562-1577. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00240-x>
- Alves Lopes, I., Coelho Paixão, L., Souza da Silva, L. J., Almeida Rocha, A., D. Barros Filho, A. K., y Amorim Santana, A. (2020). Elaboration and characterization of biopolymer films with alginate and babassu coconut mesocarp. *Carbohydrate Polymers*, 234, 115747. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115747>
- Ansorena, M. R., Marcovich, N. E., y Pereda, M. (2018). Food biopackaging based on chitosan. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharissova, y B. I. Kharisov (eds.), *Handbook of ecomaterials* (pp. 1-27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_68-1
- Aquinas, N., Bhat M, R., y Selvaraj, S. (2022). A review presenting production, characterization, and applications of biopolymer curdlan in food and pharmaceutical sectors. *Polymer Bulletin*, 79(9), 6905-6927. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03860-1>
- Asgher, M., Nasir, I., Khalid, N., y Qamar, S. A. (2020). Development of biocomposites based on bacterial cellulose reinforced delignified rice husk-PVA plasticized with glycerol. *Journal of Polymer Research*, 27(11), 347. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02314-y>
- Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Norraahim, M. N. F., Amir, A. L., Nurazzi, N. M., Ilyas, R. A., Asrofi, M., Rafidah, M., y

- Razman, M. R. (2022). Potential of flax fiber reinforced biopolymer composites for cross-arm application in transmission tower: A review. *Fibers and Polymers*, 23(4), 853-877. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4383-x>
- Auras, R., Harte, B., y Selke, S. (2004). An overview of poly lactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835-864. <https://doi.org/10.1002/mabi.200400043>
- Aznar, M., Ubeda, S., Dreolin, N., y Nerín, C. (2019). Determination of non-volatile components of a biodegradable food packaging material based on polyester and polylactic acid (PLA) and its migration to food simulants. *Journal of Chromatography A*, 1583, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.10.055>
- Bajer, D., Janczak, K., y Bajer, K. (2020). Novel Starch/Chitosan/Aloe Vera composites as promising biopackaging materials. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(3), 1021-1039. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01661-7>
- Bakri, M. K. B., Jayamani, E., Hamdan, S., Rahman, Md. R., y Kakar, A. (2018). Potential of Borneo Acacia wood in fully biodegradable bio-composites' commercial production and application. *Polymer Bulletin*, 75(11), 5333-5354. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2299-9>
- Bandyopadhyay-Ghosh, S., Ghosh, S. B., Rodríguez, A., y Sain, M. M. (2018). Biosynthesis, microstructural characterisations and investigation of in-vitro mutagenic and eco-toxicological response of a novel microbial exopolysaccharide based biopolymer. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(1), 365-374. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0925-x>
- Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., Zakharko, R. M., y Myshak, V. D. (2022). Preparation of hemp nanocellulose and its use to improve the properties of paper for food packaging. *Cellulose*, 29(15), 8305-8317. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04773-6>
- Bardin, L. (1996). *El análisis de contenido* (C. Suárez, trad., 2.a ed.). Akal Ediciones.
- Basavaraja, C., Veeranagouda, Y., Lee, K., Vishnuvardhan, T. K., Pierson, R., y Huh, D. S. (2010). Synthesis and characterization of conducting polypyrrole-polymannuronate nanocomposites. *Journal of Polymer Research*, 17(2), 233-239. <https://doi.org/10.1007/s10965-009-9309-4>
- Bhullar, S. K., Kaya, B., y Jun, M. B. G. (2015). Development of bioactive packaging structure using melt electrospinning. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(3), 416-423. <https://doi.org/10.1007/s10924-015-0713-z>
- Biswas, M. C., Jony, B., Nandy, P. K., Chowdhury, R. A., Halder, S., Kumar, D., Ramakrishna, S., Hassan, M., Ahsan, M. A., Hoque, M. E., y Imam, M. A. (2022). Recent advancement of biopolymers and their potential biomedical applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 51-74. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02199-y>
- Borja, J. M., y Eva, S. J. (2006). *Recopilación bibliográfica de materiales de envase primario, secundario y terciario, para las formas farmacéuticas líquidas, sólidas y semisólidas* [tesis de pregrado]. Universidad de El Salvador.
- Chaudhary, P., Fatima, F., y Kumar, A. (2020). Relevance of Nanomaterials in Food Packaging and its Advanced Future Prospects. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(12), 5180-5192. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01674-8>
- Chauvet, M., Sauceau, M., y Fages, J. (2017). Extrusion assisted by supercritical CO₂: A review on its application to biopolymers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 120, 408-420. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.05.043>
- Chow, K., Tong, H. H. Y., Lum, S., y Chow, A. H. L. (2008). Engineering of pharmaceutical materials: An industrial perspective. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 97(8), 2855-2877. <https://doi.org/10.1002/jps.21212>
- Chursin, V. I., y Lyubimtseva, E. S. (2020). Effect of polysaccharide constituents on the properties of biopolymer composites and films based on them. *Fibre Chemistry*, 51(5), 362-367. <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10112-x>
- Ciecholewska, D., Zywicka, A., Junka, A., Drozd, R., Sobolewski, P., Midgal, P., Kowalska, U., Toporkiewicz, M., & Fijalkowski, K. (2011). Superabsorbent crosslinked bacterial cellulose biomaterials for chronic wound dressings. *Carbohydrate Polymers*, 253, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117247>
- Correa, S., Dreaden, E. C., Gu, L., y Hammond, P. T. (2016). Engineering nanolayered particles for modular drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 240, 364-386. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.01.040>
- Da Rosa, G. S., Vanga, S. K., Garipey, Y., y Raghavan, V. (2020). Development of biodegradable films with improved antioxidant properties based on the addition of carrageenan containing olive leaf extract for food packaging applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(1), 123-130. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01589-7>
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., y Pramanik, N. (2022). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04443-4>
- Davis, G., y Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004>
- De Marco, I. (2022). Zein microparticles and nanoparticles as drug delivery systems. *Polymers*, 14(11), 2172. <https://doi.org/10.3390/polym14112172>
- De Mesquita, J. P., Donnici, C. L., y Pereira, F. V. (2010). Biobased nanocomposites from layer-by-layer assembly of cellulose nanowhiskers with chitosan. *Biomacromolecules*, 11(2), 473-480. <https://doi.org/10.1021/bm9011985>
- De Oliveira Filho, J. G., Albiero, B. R., Cipriano, L., de Oliveira Nobre Bezerra, C. C., Oldoni, F. C. A., Egea, M. B., de Azere-do, H. M. C., y Ferreira, M. D. (2021). Arrowroot starch-based films incorporated with a carnauba wax nanoemulsion, cellu-

- lose nanocrystals, and essential oils: A new functional material for food packaging applications. *Cellulose*, 28(10), 6499-6511. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03945-0>
- Dekamin, M. G., Karimi, Z., Latifdoost, Z., Ilkhanizadeh, S., Daemi, H., Naimi-Jamal, M. R., y Barikani, M. (2018). Alginic acid: A mild and renewable bifunctional heterogeneous biopolymeric organocatalyst for efficient and facile synthesis of polyhydroquinolines. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 1273-1280. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.050>
- Divakara, S., Siddaraju, G. N., y Somashekar, R. (2010). Comparative study of natural and man-made polymers using whole powder pattern fitting technique. *Fibers and Polymers*, 11(6), 861-868. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0861-7>
- Dong, W., Su, J., Chen, Y., Xu, D., Cheng, L., Mao, L., Gao, Y., y Yuan, F. (2022). Characterization and antioxidant properties of chitosan film incorporated with modified silica nanoparticles as an active food packaging. *Food Chemistry*, 373(Part A), 131414. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131414>
- Duquette, D., y Dumont, M. J. (2019). Comparative studies of chemical crosslinking reactions and applications of bio-based hydrogels. *Polymer Bulletin*, 76(5), 2683-2710. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2516-6>
- Duval, A., y Lawoko, M. (2014). A review on lignin-based polymeric, micro- and nano-structured materials. *Reactive and Functional Polymers*, 85, 78-96. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>
- El Achaby, M., El Miri, N., Hannache, H., Gmouh, S., Trabadelo, V., Aboulkas, A., y Ben Youcef, H. (2018). Cellulose nanocrystals from Miscanthus fibers: Insights into rheological, physico-chemical properties and polymer reinforcing ability. *Cellulose*, 25(11), 6603-6619. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2047-1>
- El-Gamal, S., El Sayed, A. M., y Abdel-Hady, E. E. (2018). Effect of cobalt oxide nanoparticles on the nano-scale free volume and optical properties of biodegradable CMC/PVA Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(6), 2536-2545. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1151-x>
- Elhussieny, A., Faisal, M., D'Angelo, G., Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., y Fahim, I. S. (2020). Valorisation of shrimp and rice straw waste into food packaging applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1219-1226. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.008>
- Erfani, A., Khalil Pirouzifard, M., Almasi, H., Gheybi, N., y Pirs, S. (2022). Application of cellulose plate modified with encapsulated Cinnamomum zelanicum essential oil in active packaging of walnut kernel. *Food Chemistry*, 381, 132246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132246>
- Farris, S., Schaich, K. M., Liu, L., Piergiovanni, L., y Yam, K. L. (2009). Development of polyion-complex hydrogels as an alternative approach for the production of bio-based polymers for food packaging applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(8), 316-332. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.04.003>
- Fasciotti, M. (2017). Perspectives for the use of biotechnology in green chemistry applied to biopolymers, fuels and organic synthesis: From concepts to a critical point of view. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.09.002>
- Favatela, M. F., Otarola, J., Ayala-Peña, V. B., Dolcini, G., Perez, S., Torres Nicolini, A., Alvarez, V. A., y Lassalle, V. L. (2022). Development and characterization of antimicrobial textiles from chitosan-based compounds: Possible biomaterials against SARS-CoV-2 Viruses. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(4), 1473-1486. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-02192-x>
- Fernández, F. (2002). El análisis de contenido como ayuda metodológica para la investigación. *Revista de Ciencias Sociales*, (96), 35-53.
- Fonseca-García, A., Jiménez-Regalado, E. J., y Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Preparation of a novel biodegradable packaging film based on corn starch-chitosan and poloxamers. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117009. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117009>
- Friedrich, D. (2022). Success factors of Wood-Plastic Composites (WPC) as sustainable packaging material: A cross-sector expert study. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 506-517. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.030>
- Garavand, F., Khodaei, D., Mahmud, N., Islam, J., Khan, I., Jafarzadeh, S., Tahergerabi, R., y Cacciotti, I. (2022). Recent progress in using zein nanoparticles-loaded nanocomposites for food packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(12), 3639-3659. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2133080>
- Gasti, T., Hiremani, V. D., Kesti, S. S., Vanjeri, V. N., Goudar, N., Masti, S. P., Thimmappa, S. C., y Chougale, R. B. (2021). Physicochemical and antibacterial evaluation of poly (Vinyl Alcohol)/Guar Gum/Silver nanocomposite films for food packaging applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(10), 3347-3363. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02123-4>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., y Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 1-5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghanbari Adivi, F., Hashemi, P., y Dadkhah Tehrani, A. (2019). Agarose-coated Fe₃O₄@SiO₂ magnetic nanoparticles modified with sodium dodecyl sulfate, a new promising sorbent for fast adsorption/desorption of cationic drugs. *Polymer Bulletin*, 76(3), 1239-1256. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2418-7>
- Ghasempour, Z., Khodaeivandi, S., Ahangari, H., Hamishehkar, H., Amjadi, S., Moghaddas Kia, E., y Ehsani, A. (2022). Characterization and optimization of persian gum/whey protein bionanocomposite films containing betanin nanoliposomes for food packaging utilization. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(7), 2800-2811. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02367-0>
- Goel, P., Arora, R., Haleem, R., y Shukla, S. K. (2023). Advances in bio-degradable polymer composites-based packaging mate-

- rial. *Chemistry Africa*, 6(1), 95-115. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00404-6>
- Grondin, J. (2014). ¿Qué es la hermenéutica? (A. Martínez Riu, Trad.). *Herder Editorial*. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctvt7x88s>
- Gupta, H., Kumar, H., Gehlaut, A. K., Singh, S. K., Gaur, A., Sachan, S., y Park, J. W. (2022). Preparation and characterization of bio-composite films obtained from coconut coir and groundnut shell for food packaging. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(2), 569-581. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01343-z>
- Gutiérrez, T. J., y Alvarez, V. A. (2017). Cellulosic materials as natural fillers in starch-containing matrix-based films: A review. *Polymer Bulletin*, 74(6), 2401-2430. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1814-0>
- Hansen, N. M. L., Blomfeldt, T. O. J., Hedenqvist, M. S., y Plackett, D. V. (2012). Properties of plasticized composite films prepared from nanofibrillated cellulose and birch wood xylan. *Cellulose*, 19(6), 2015-2031. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9764-7>
- Hasan, M., Lai, T. K., Gopakumar, D. A., Jawaid, M., Owolabi, F. A. T., Mistar, E. M., Alfatah, T., Noriman, N. Z., Haafiz, M. K. M., y Abdul Khalil, H. P. S. (2019). Micro crystalline bamboo cellulose based seaweed biodegradable composite films for sustainable packaging material. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(7), 1602-1612. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01457-4>
- Hashim, S. B. H., Elrasheid Tahir, H., Liu, L., Zhang, J., Zhai, X., Ali Mahdi, A., Nureldin Awad, F., Hassan, M. M., Xiao-bo, Z., y Jiyong, S. (2022). Intelligent colorimetric pH sensing packaging films based on sugarcane wax/agar integrated with butterfly pea flower extract for optical tracking of shrimp freshness. *Food Chemistry*, 373(Part B), 131514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131514>
- Hema, R., Ng, P. N., y Amirul, A. A. (2013). Green nanobiocomposite: Reinforcement effect of montmorillonite clays on physical and biological advancement of various polyhydroxyalkanoates. *Polymer Bulletin*, 70(3), 755-771. <https://doi.org/10.1007/s00289-012-0822-y>
- Henke, L., Zarrinbakhsh, N., Endres, H. J., Misra, M., y Mohanty, A. K. (2017). Biodegradable and bio-based green blends from carbon dioxide-derived bioplastic and poly(butylene succinate). *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 499-509. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0828-x>
- Hernández-Silva, M. L., y Guzmán-Martínez, B. (2009). Biopolímeros empleados en la fabricación de envases para alimentos. *Publicaciones e Investigación*, 3(1), 103. <https://doi.org/10.22490/25394088.572>
- Hernández, R., y Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1.a ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores S. A. de C. V.
- Hiremani, V. D., Gasti, T., Masti, S. P., Malabadi, R. B., y Chougale, R. B. (2022). Polysaccharide-based blend films as a promising material for food packaging applications: Physicochemical properties. *Iranian Polymer Journal*, 31(4), 503-518. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-01014-8>
- Hottle, T. A., Bilec, M. M., y Landis, A. E. (2013). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 98(9), 1898-1907. <https://doi.org/10.1016/j.polym-degradstab.2013.06.016>
- Hu, Y., Zhang, S., Han, D., Ding, Z., Zeng, S., y Xiao, X. (2018). Construction and evaluation of the hydroxypropyl methyl cellulose-sodium alginate composite hydrogel system for sustained drug release. *Journal of Polymer Research*, 25(7), 148. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1546-y>
- Ibrahim, I. D., Hamam, Y., Sadiku, E. R., Ndambuki, J. M., Kopolati, W. K., Jamiru, T., Eze, A. A., y Snyman, J. (2022). *Need for sustainable packaging: An overview*. *Polymers*, 14(20), 4430. <https://doi.org/10.3390/polym14204430>
- Ibrahim, S., Elsayed, H., y Hasanin, M. (2021). Biodegradable, antimicrobial and antioxidant biofilm for active packaging based on extracted gelatin and lignocelluloses biowastes. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(2), 472-482. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01893-7>
- Imre, B., y Pukánszky, B. (2013). Compatibilization in bio-based and biodegradable polymer blends. *European Polymer Journal*, 49(6), 1215-1233. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.01.019>
- Jamróz, E., Janik, M., Juszczak, L., Kruk, T., Kulawik, P., Szuwarzyński, M., Kawecka, A., y Khachatryan, K. (2021). Composite biopolymer films based on a polyelectrolyte complex of furcellaran and chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 274, 118627. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118627>
- Janani, N., Zare, E. N., Salimi, F., y Makvandi, P. (2020). Antibacterial tragacanth gum-based nanocomposite films carrying ascorbic acid antioxidant for bioactive food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116678. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116678>
- Janjarasskul, T., y Krochta, J. M. (2010). Edible packaging materials. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 415-448. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100836>
- Jayaramudu, J., Reddy, G. S. M., Varaprasad, K., Sadiku, E. R., Sinha Ray, S., y Varada Rajulu, A. (2013). Preparation and properties of biodegradable films from Sterculia urens short fiber/cellulose green composites. *Carbohydrate Polymers*, 93(2), 622-627. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.032>
- Jiang, J., Chen, X., Zhang, G. L., Hao, H., Hou, H. M., y Bi, J. (2022). Preparation of chitosan-cellulose-benzyl isothiocyanate nanocomposite film for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 285, 119234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119234>

- Johansson, C., Bras, J., Mondragon, I., Nechita, P., Plackett, D., Šimon, P., Svetec, D. G., Virtanen, S., Baschetti, M. G., Breen, C., Clegg, F., y Aucejo, S. (2012). Renewable fibers and bio-based materials for packaging applications: A review of recent developments. *Bioresources*, 7(2), 2506-2552. <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.2506-2552>
- John, R. P., G.S., A., Nampoothiri, K. M., y Pandey, A. (2009). Direct lactic acid fermentation: Focus on simultaneous saccharification and lactic acid production. *Biotechnology Advances*, 27(2), 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.004>
- Julkapli, N. M., Ahmad, Z., y Akil, H. M. (2011). Effects of different pH medium on swelling properties of 1,2,4,5-benzenetetracarboxylic-chitosan-filled chitosan bio-composites. *Polymer Bulletin*, 67(2), 291-320. <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0424-5>
- Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., y Narayan, R. (2007). Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer Testing*, 26(8), 1049-1061. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2007.07.006>
- Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S. E., y Singh, S. P. (2007). Compostability of Bioplastic Packaging Materials: An Overview. *Macromolecular Bioscience*, 7(3), 255-277. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>
- Kalyani, P., y Khandelwal, M. (2021). Modulation of morphology, water uptake/retention, and rheological properties by in-situ modification of bacterial cellulose with the addition of biopolymers. *Cellulose*, 28(17), 11025-11036. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04256-0>
- Kanatt, S. R., y Makwana, S. H. (2020). Development of active, water-resistant carboxymethyl cellulose-poly vinyl alcohol-Aloe vera packaging film. *Carbohydrate Polymers*, 227, 115303. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115303>
- Karimi, M., Yazdi, F. T., Mortazavi, S. A., Shahabi-Ghahfarrokhi, I., y Chamani, J. (2020). Development of active antimicrobial poly (l-glutamic) acid-poly (l-lysine) packaging material to protect probiotic bacterium. *Polymer Testing*, 83, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106338>
- Kaufman, L., y Rousseeuw, P. J. (2005). Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. Wiley.
- Kaur, A., Singh, D., y Sud, D. (2020). A review on grafted, crosslinked and composites of biopolymer Xanthan gum for phasing out synthetic dyes and toxic metal ions from aqueous solutions. *Journal of Polymer Research*, 27(10), 297. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02271-6>
- Kawecka-Radomska, M., Tomczyńska-Mleko, M., Wesołowska-Trojanowska, M., Kowalczyk, K., Chrzastek, M., y Mleko, S. (2015). Hard biodegradable biopolymer obtained from whey protein concentrate and montmorillonite. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(4), 534-540. <https://doi.org/10.1007/s10924-015-0722-y>
- Kendre, P. N., Gite, M., Jain, S. P., y Pote, A. (2022). Nanocomposite polymeric materials: State of the art in the development of biomedical drug delivery systems and devices. *Polymer Bulletin*, 79(11), 9237-9265. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03985-3>
- Khodaei, D., Álvarez, C., y Mullen, A. M. (2021). Biodegradable packaging materials from animal processing co-products and wastes: An overview. *Polymers*, 13(15), 2561. <https://doi.org/10.3390/polym13152561>
- Kim, J., Kim, T. H., Lee, J. H., Park, Y. Ah., Kang, Y. J., y Ji, H. G. (2021). Porous nanocomposite of layered double hydroxide nanosheet and chitosan biopolymer for cosmetic carrier application. *Applied Clay Science*, 205, 106067. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106067>
- Kostag, M., Gericke, M., Heinze, T., y El Seoud, O. A. (2019). Twenty-five years of cellulose chemistry: Innovations in the dissolution of the biopolymer and its transformation into esters and ethers. *Cellulose*, 26(1), 139-184. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2198-0>
- Kowalczyk, D., Kordowska-Wiater, M., Sołowiej, B., y Baraniak, B. (2015). Physicochemical and antimicrobial properties of biopolymer-candelilla wax emulsion films containing potassium sorbate - A comparative study. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 567-579. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1423-6>
- Kumar, A. P., Depan, D., Singh Tomer, N., y Singh, R. P. (2009). Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization - Trends and future perspectives. *Progress in Polymer Science*, 34(6), 479-515. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.01.002>
- Kumar, S., Kalita, S., Das, A., Kumar, P., Singh, S., Katiyar, V., y Mukherjee, A. (2022). Aloe vera: A contemporary overview on scope and prospects in food preservation and packaging. *Progress in Organic Coatings*, 166, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106799>
- Kurczewska, J., Ratajczak, M., y Gajeka, M. (2021). Alginate and pectin films covering halloysite with encapsulated salicylic acid as food packaging components. *Applied Clay Science*, 214, 106270. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106270>
- Lagaron, J. M., y Lopez-Rubio, A. (2011). Nanotechnology for bioplastics: Opportunities, challenges and strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11), 611-617. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.01.007>
- Lagarón, J. M., y Busolo, M. A. (2011). Multifunctional nanoclays for food contact applications. *En Multifunctional and nanoreinforced polymers for food packaging* (pp. 31-42). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857092786.1.31>
- Lee, J. H., Jeong, D., y Kanmani, P. (2019). Study on physical and mechanical properties of the biopolymer/silver based active nanocomposite films with antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 224, 115159. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115159>

- Liarou, E., Varlas, S., Skoulas, D., Tsimblouli, C., Sereti, E., Dimas, K., y Iatrou, H. (2018). Smart polymersomes and hydrogels from polypeptide-based polymer systems through ϵ -amino acid N-carboxyanhydride ring-opening polymerization. From chemistry to biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 83, 28-78. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.05.001>
- Lomartire, S., Marques, J. C., y Gonçalves, A. M. M. (2022). An overview of the alternative use of seaweeds to produce safe and sustainable bio-packaging. *Applied Sciences*, 12(6), 3123. <https://doi.org/10.3390/app12063123>
- Lopes, M. S., Jardini, A. L., y Filho, R. M. (2012). Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Engineering*, 42, 1402-1413. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.534>
- López-Noguero, F. (2002). El análisis de contenido como método de investigación. *Revista de Educación*, XXI(4), 167-180.
- Luckachan, G. E., y Pillai, C. K. S. (2011). Biodegradable polymers - A review on recent trends and emerging perspectives. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(3), 637-676. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0317-1>
- Madhavan Nampoothiri, K., Nair, N. R., y John, R. P. (2010). An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*, 101(22), 8493-8501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.092>
- Malhotra, B., Keshwani, A., y Kharkwal, H. (2015). *Natural polymer based cling films for food packaging*, 7(4), 10-18.
- Mallakpour, S., & Jarang, N. (2018). Production of bionanocomposites based on poly(vinyl pyrrolidone) using modified TiO₂ nanoparticles with citric acid and ascorbic acid and study of their physicochemical properties. *Polymer Bulletin*, 75(4), 1441-1456. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2100-5>
- Manimohan, M., Pugalmani, S., y Sithique, M. A. (2020a). Biologically Active Water Soluble Novel Biopolymer/Hydrazide Based O-Carboxymethyl Chitosan Schiff Bases: Synthesis and Characterisation. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(9), 3658-3676. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01487-9>
- Manimohan, M., Pugalmani, S., y Sithique, M. A. (2020b). Synthesis, Spectral Characterisation and Biological Activities of Novel Biomaterial/N, N, O Donor Tridentate Co (II), Ni (II) and Zn (II) Complexes of Hydrazide Based Biopolymer Schiff Base Ligand. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(11), 4481-4495. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01578-7>
- Marassi, V., De Marchis, F., Roda, B., Bellucci, M., Capocchi, A., Reschiglian, P., Pompa, A., y Zattoni, A. (2021). Perspectives on protein biopolymers: Miniaturized flow field-flow fractionation-assisted characterization of a single-cysteine mutated phaseolin expressed in transplastomic tobacco plants. *Journal of Chromatography A*, 1637, 461806. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461806>
- Martin, O., y Avérous, L. (2001). Poly(lactic acid): Plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 42(14), 6209-6219. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00086-6)
- Martínez, L. M. T., Kharissova, O. V., y Kharisov, B. I. (eds.). (2019). *Handbook of Ecomaterials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6>
- Mathuriya, A. S., y Yakhmi, J. V. (2017). Polyhydroxyalkanoates: Biodegradable plastics and their applications. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharissova, y B. I. Kharisov (eds.), *Handbook of Ecomaterials* (pp. 1-29). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_84-1
- Meeks, D., Hottle, T., Bilec, M. M., y Landis, A. E. (2015). Compostable biopolymer use in the real world: Stakeholder interviews to better understand the motivations and realities of use and disposal in the US. *Resources, Conservation and Recycling*, 105(Part A), 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.022>
- Mekonnen, T., Mussone, P., Khalil, H., y Bressler, D. (2013). Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(43), 13379. <https://doi.org/10.1039/c3ta12555f>
- Mellinas, C., Valdés, A., Ramos, M., Burgos, N., Garrigós, M. del C., y Jiménez, A. (2015). Active edible films: Current state and future trends. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(2). <https://doi.org/10.1002/app.42631>
- Meneguín, A. B., da Silva Barud, H., Sábio, R. M., de Sousa, P. Z., Manieri, K. F., de Freitas, L. A. P., Pacheco, G., Alonso, J. D., y Chorilli, M. (2020). Spray-dried bacterial cellulose nanofibers: A new generation of pharmaceutical excipient intended for intestinal drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 249, 116838. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116838>
- Miao, C., y Hamad, W. Y. (2013). Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: A critical review. *Cellulose*, 20(5), 2221-2262. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0007-3>
- Mishra, D., Khare, P., Singh, D. K., Yadav, V., Luqman, S., Kumar, P. V. A., y Shanker, K. (2021). Synthesis of Ocimum extract encapsulated cellulose nanofiber/chitosan composite for improved antioxidant and antibacterial activities. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100152>
- Mishra, R. K., Sabu, A., y Tiwari, S. K. (2018). Materials chemistry and the futurist eco-friendly applications of nanocellulose: Status and prospect. *Journal of Saudi Chemical Society*, 22(8), 949-978. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.02.005>
- Mlalila, N., Hilonga, A., Swai, H., Devlieghere, F., y Ragaert, P. (2018). Antimicrobial packaging based on starch, poly(3-hydroxybutyrate) and poly(lactic-co-glycolide) materials and application challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.015>

- Mohd Basri, M. S., Abdul Karim Shah, N. N., Sulaiman, A., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., Mohd Nor, M. Z., Ariffin, S. H., Abdul Ghani, N. H., y Mohd Salleh, F. S. (2021). Progress in the valorization of fruit and vegetable wastes: Active packaging, biocomposites, by-products, and innovative technologies used for bioactive compound extraction. *Polymers*, 13(20), 3503. <https://doi.org/10.3390/polym13203503>
- Mooibroek, H., Oosterhuis, N., Giuseppin, M., Toonen, M., Franssen, H., Scott, E., Sanders, J., y Steinbüchel, A. (2007). Assessment of technological options and economical feasibility for cyanophycin biopolymer and high-value amino acid production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 77(2), 257-267. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1178-3>
- Moustafa, H., Darwish, N. A., y Youssef, A. M. (2022). Rational formulations of sustainable polyurethane/chitin/rosin composites reinforced with ZnO-doped-SiO₂ nanoparticles for green packaging applications. *Food Chemistry*, 371, 131193. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131193>
- Muneer, F., Nadeem, H., Arif, A., y Zaheer, W. (2021). Bioplastics from Biopolymers: An Eco-Friendly and Sustainable Solution of Plastic Pollution. *Polymer Science, Series C*, 63(1), 47-63. <https://doi.org/10.1134/S1811238221010057>
- Muthuraj, R., Misra, M., y Mohanty, A. K. (2014). Biodegradable poly(butylene succinate) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends: Reactive extrusion and performance evaluation. *Journal of Polymers and the Environment*, 22(3), 336-349. <https://doi.org/10.1007/s10924-013-0636-5>
- Narasagoudr, S. S., Hegde, V. G., Vanjeri, V. N., Chougale, R. B., y Masti, S. P. (2020). Ethyl vanillin incorporated chitosan/poly(vinyl alcohol) active films for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 236, 116049. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116049>
- Neera, Ramana, K. V., y Batra, H. V. (2015). Occurrence of cellulose-producing *Gluconacetobacter* spp. In fruit samples and kombucha tea, and production of the biopolymer. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 176(4), 1162-1173. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1637-8>
- Núñez-Gómez, D., Rodrigues, C., Lapolli, F. R., y Lobo-Recio, M. A. (2021). Physicochemical characterization of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) waste as a low-cost chitinous biomaterial. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(2), 576-587. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01887-5>
- Orantes, J. M. B., y Hernández, S. J. E. (2006). *Recopilación bibliográfica de materiales de envase primario, secundario y terciario, para las formas farmacéuticas líquidas, sólidas y semisólidas* [tesis de grado]. Universidad de El Salvador.
- Orkhis, S., y Ettaqi, S. (2022). Effects of alkali treatment on mechanical properties of chicken feather fiber/chitosan composites for packaging applications. *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), 2309-2320. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01630-8>
- Ortega-Santiago, Y., Julio-Rivas, S. A., Gómez, J. M. P., y Lozano-Rivera, D. (2023). El Ecodiseño: Un llamado a la conciencia en el uso de polímeros biodegradables y no biodegradables. *Gestión y Ambiente*, 26(1), 1-12. <https://doi.org/10.15446/ga.v26n1.110077>
- Oyarce, E., Cantero-López, P., Yañez, O., Roa, K., Boulett, A., Pizarro, G. D. C., Zhang, Y., Xu, C., Willför, S., y Sánchez, J. (2022). Nanocellulose bio-based composites for the removal of methylene blue from water: An experimental and theoretical exploration. *Journal of Molecular Liquids*, 357, 119089. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119089>
- Pant, H. R., Risal, P., Park, C. H., Tijjing, L. D., Jeong, Y. J., y Kim, C. S. (2013). Core-shell structured electrospun biomimetic composite nanofibers of calcium lactate/nylon-6 for tissue engineering. *Chemical Engineering Journal*, 221, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.072>
- Parente, A. G., de Oliveira, H. P., Cabrera, M. P., y de Morais Neri, D. F. (2023). Bio-based polymer films with potential for packaging applications: A systematic review of the main types tested on food. *Polymer Bulletin*, 80(5), 4689-4717. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04332-w>
- Paul, E., Bessière, Y., Dumas, C., y Girbal-Neuhausser, E. (2021). Biopolymers Production from Wastes and Wastewaters by Mixed Microbial Cultures: Strategies for Microbial Selection. *Waste and Biomass Valorization*, 12(8), 4213-4237. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01252-6>
- Perez-Masia, R., Lopez-Rubio, A., Fabra, M. J., y Lagaron, J. M. (2013). Biodegradable polyester-based heat management materials of interest in refrigeration and smart packaging coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(5), 3251-3262. <https://doi.org/10.1002/app.39555>
- Perez-Masia, R., Ruben Lopez-Nicolas, Maria Jesús Periago, Gaspar Ros, Jose, Maria Lagaron, y Amparo Lopez-Rubio. (2015). Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electrospraying for nutraceutical applications. *Food chemistry*, 168, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.051>
- Philp, A., Macdonald, A. L., y Watt, P. W. (2005). Lactate - a signal coordinating cell and systemic function. *Journal of Experimental Biology*, 208(24), 4561-4575. <https://doi.org/10.1242/jeb.01961>
- Pinto, A. M., Moreira, S., Gonçalves, I. C., Gama, F. M., Mendes, A. M., y Magalhães, F. D. (2013). Biocompatibility of poly(lactic acid) with incorporated graphene-based materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 104, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.12.006>
- Priyadarshi, R., Kim, S. M., y Rhim, J. W. (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>

- Priyadarsini, M., Biswal, T., y Dash, S. (2021). Biodegradable superabsorbent with potential biomedical application as drug delivery system of “pectin-g-P(AN-co-AM)/chicken eggshell” bio-composite. *Polymer Bulletin*, 78(11), 6337-6349. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03424-9>
- Qiu, S., Zhou, Y., Waterhouse, G. I. N., Gong, R., Xie, J., Zhang, K., y Xu, J. (2021). Optimizing interfacial adhesion in PBAT/PLA nanocomposite for biodegradable packaging films. *Food Chemistry*, 334, 127487. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127487>
- Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Lagaron, J. M., Balart, R., y Torres-Giner, S. (2019). In Situ Compatibilization of Biopolymer Ternary Blends by Reactive Extrusion with Low-Functionality Epoxy-Based Styrene-Acrylic Oligomer. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(1), 84-96. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1324-2>
- Rajan, K. P., Thomas, S. P., Gopanna, A., y Chavali, M. (2018). Polyhydroxybutyrate (PHB): A standout biopolymer for environmental sustainability. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharisova, y B. I. Kharisov (eds.), *Handbook of Ecomaterials* (pp. 1-23). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_92-1
- Reddy, M. M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S. K., y Mohanty, A. K. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in Polymer Science*, 38(10-11), 1653-1689. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.006>
- Resano-Goizueta, I., Ashokan, B. K., Trezza, T. A., y Padua, G. W. (2018). Effect of nano-fillers on tensile properties of biopolymer films. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(9), 3817-3823. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1260-1>
- Rhim, J. W., y Ng, P. K. W. (2007). Natural biopolymer-based nanocomposite films for packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(4), 411-433. <https://doi.org/10.1080/10408390600846366>
- Rincón, E., Espinosa, E., García-Domínguez, M. T., Balu, A. M., Vilaplana, F., Serrano, L., y Jiménez-Quero, A. (2021). Bio-active pectic polysaccharides from bay tree pruning waste: Sequential subcritical water extraction and application in active food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 272, 118477. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118477>
- Riyajan, S. A. (2019). Environmentally friendly novel maleated poly(vinyl alcohol) grafted 1, 4-butanediol modified with biopolymer for encapsulation of capsaicin. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(11), 2637-2649. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01542-8>
- Rodrigues, C., de Mello, J. M. M., Dalcanton, F., Macuvele, D. L. P., Padoin, N., Fiori, M. A., Soares, C., y Riella, H. G. (2020). Mechanical, thermal and antimicrobial properties of chitosan-based-nanocomposite with potential applications for food packaging. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(4), 1216-1236. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01678-y>
- Rodríguez-Sánchez, I. J., Fuenmayor, C. A., Clavijo-Grimaldo, D., y Zuluaga-Domínguez, C. M. (2021). Electrospinning of ultra-thin membranes with incorporation of antimicrobial agents for applications in active packaging: A review. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(15), 1053-1076. <https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1785450>
- Rohini, B., Padma Ishwarya, S., Rajasekharan, R., y VijayaKumar, A. K. (2020). Ocimum basilicum seed mucilage reinforced with montmorillonite for preparation of bionanocomposite film for food packaging applications. *Polymer Testing*, 87, 106465. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106465>
- Rossi, S., Faccendini, A., Bonferoni, M. C., Ferrari, F., Sandri, G., Del Fante, C., Perotti, C., y Caramella, C. M. (2013). “Sponge-like” dressings based on biopolymers for the delivery of platelet lysate to skin chronic wounds. *International Journal of Pharmaceutics*, 440(2), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.07.056>
- Rovera, C., Cozzolino, C. A., Ghaani, M., Morrone, D., Olsson, R. T., y Farris, S. (2018). Mechanical behavior of biopolymer composite coatings on plastic films by depth-sensing indentation – A nanoscale study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 512, 638-646. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.108>
- Rukmanikrishnan, B., Ramalingam, S., Kim, S. S., y Lee, J. (2021). Rheological and anti-microbial study of silica and silver nanoparticles-reinforced k-carrageenan/hydroxyethyl cellulose composites for food packaging applications. *Cellulose*, 28(9), 5577-5590. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03873-z>
- Sangeetha, V. H., Deka, H., Varghese, T. O., y Nayak, S. K. (2018). State of the art and future perspectives of poly(lactic acid) based blends and composites. *Polymer Composites*, 39(1), 81-101. <https://doi.org/10.1002/pc.23906>
- Satam, C. C., Irvin, C. W., Lang, A. W., Jallorina, J. C. R., Shofner, M. L., Reynolds, J. R., y Meredith, J. C. (2018). Spray-coated multilayer cellulose nanocrystal—Chitin Nanofiber films for barrier applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(8), 10637-10644. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01536>
- Scaffaro, R., Botta, L., Lopresti, F., Maio, A., y Suter, F. (2017). Polysaccharide nanocrystals as fillers for PLA based nanocomposites. *Cellulose*, 24(2), 447-478. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1143-3>
- Scaffaro, R., Botta, L., Maio, A., Mistretta, M., y La Mantia, F. (2016). Effect of graphene nanoplatelets on the physical and antimicrobial properties of biopolymer-based nanocomposites. *Materials*, 9(5), 351. <https://doi.org/10.3390/ma9050351>
- Scholten, E., Moschakis, T., y Biliaderis, C. G. (2014). Biopolymer composites for engineering food structures to control product functionality. *Food Structure*, 1(1), 39-54. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2013.11.001>

- Sell, S. A., Wolfe, P. S., Garg, K., McCool, J. M., Rodriguez, I. A., y Bowlin, G. L. (2010). The use of natural polymers in tissue engineering: A focus on electrospun extracellular matrix analogues. *Polymers*, 2(4), 522-553. <https://doi.org/10.3390/polym2040522>
- Selvalakshmi, S., Mathavan, T., Selvasekarapandian, S., y Premalatha, M. (2017). Study on NH4I composition effect in agar-agar-based biopolymer electrolyte. *Ionics*, 23(10), 2791-2797. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1952-2>
- Serrano-Aroca, Á., Iskandar, L., y Deb, S. (2018). Green synthetic routes to alginate-graphene oxide composite hydrogels with enhanced physical properties for bioengineering applications. *European Polymer Journal*, 103, 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.04.015>
- Shahadat, M., Khan, M. Z., Rupani, P. F., Embrandiri, A., Sultana, S., Ahammad, S. Z., Wazed Ali, S., y Sreekrishnan, T. R. (2017). A critical review on the prospect of polyaniline-grafted biodegradable nanocomposite. *Advances in Colloid and Interface Science*, 249, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.08.006>
- Sharma, B., Sandilya, A., Patel, U., Shukla, A., y Sadhu, S. D. (2021). A bio-inspired exploration of eco-friendly bael gum and guar gum-based bioadhesive as tackifiers for packaging applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 110, 102946. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102946>
- Sharmila, G., Muthukumaran, C., Nayan, G., y Nidhi, B. (2013). Extracellular Biopolymer Production by *Aureobasidium pullulans* MTCC 2195 Using Jackfruit Seed Powder. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(2), 487-494. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0459-9>
- Shen, J., Fatehi, P., y Ni, Y. (2014). Biopolymers for surface engineering of paper-based products. *Cellulose*, 21(5), 3145-3160. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0380-6>
- Sherafatkhan Azari, S., Alizadeh, A., Roufegarinejad, L., Asefi, N., y Hamishehkar, H. (2021). Preparation and characterization of gelatin/ε-glucan nanocomposite film incorporated with ZnO nanoparticles as an active food packaging system. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(4), 1143-1152. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01950-1>
- Sikorska, W., Musioł, M., Zawidlak-Węgrzyńska, B., y Rydz, J. (2017). Compostable polymeric ecomaterials: Environment-friendly waste management alternative to landfills. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharissova, y B. I. Kharisov (eds.), *Handbook of ecomaterials* (pp. 1-31). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_36-1
- Silva, G. G. D., Sobral, P. J. A., Carvalho, R. A., Bergo, P. V. A., Mendieta-Taboada, O., y Habitante, A. M. Q. B. (2008). Biodegradable films based on blends of gelatin and poly (vinyl alcohol): Effect of PVA type or concentration on some physical properties of films. *Journal of Polymers and the Environment*, 16(4), 276-285. <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0112-9>
- Singh, S., Chunglok, W., Nwabor, O. F., Ushir, Y. V., Singh, S., y Panpipat, W. (2022). Hydrophilic biopolymer matrix antibacterial peel-off facial mask functionalized with biogenic nanostructured material for cosmeceutical applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(3), 938-953. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02249-5>
- Siró, I., y Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review. *Cellulose*, 17(3), 459-494. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y>
- Soares, R. M. D., Siqueira, N. M., Prabhakaram, M. P., y Ramakrishna, S. (2018). Electrospinning and electrospray of bio-based and natural polymers for biomaterials development. *Materials Science and Engineering: C*, 92, 969-982. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.004>
- Soe, M. T., Pongjanyakul, T., Limpongsa, E., y Jaipakdee, N. (2020). Modified glutinous rice starch-chitosan composite films for buccal delivery of hydrophilic drug. *Carbohydrate Polymers*, 245, 116556. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116556>
- Sofi, H. S., Ashraf, R., Khan, A. H., Beigh, M. A., Majeed, S., y Sheikh, F. A. (2019). Reconstructing nanofibers from natural polymers using surface functionalization approaches for applications in tissue engineering, drug delivery and biosensing devices. *Materials Science and Engineering: C*, 94, 1102-1124. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.10.069>
- Solikhin, A., Hadi, Y. S., Massijaya, M. Y., Nikmatin, S., Suzuki, S., Kojima, Y., y Kobori, H. (2018). Properties of poly(vinyl alcohol)/chitosan nanocomposite films reinforced with oil palm empty fruit bunch amorphous lignocellulose nanofibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(8), 3316-3333. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1215-6>
- Sudesh, K., Abe, H., y Doi, Y. (2000). Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: Biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6)
- Sukhlaaied, W., y Riyajan, S. A. (2016). Preparation and properties of a novel environmentally friendly film from maleated poly(vinyl alcohol) grafted with chitosan in solution form: The effect of different production factors. *Polymer Bulletin*, 73(3), 791-813. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1520-3>
- Sukhlaaied, W., y Riyajan, S. A. (2018). A novel environmentally compatible bio-based product from gelatin and natural rubber: Physical properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(7), 2708-2719. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1161-8>
- Tabasum, S., Noreen, A., Maqsood, M. F., Umar, H., Akram, N., Nazli, Z. H., Chatha, S. A. S., y Zia, K. M. (2018). A review on versatile applications of blends and composites of pullulan with natural and synthetic polymers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120(Part A), 603-632. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.154>

- Tak, H. Y., Yun, Y. H., Lee, C. M., y Yoon, S. D. (2019). Sulindac imprinted mungbean starch/PVA biomaterial films as a transdermal drug delivery patch. *Carbohydrate Polymers*, 208, 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.076>
- Takács, T., Abdelghafour, M. M., Deák, Á., Szabó, D., Sebők, D., Dékány, I., Rovó, L., Kukovecz, Á., y Janovák, L. (2020). Surface wetting driven release of antifibrotic Mitomycin-C drug from modified biopolymer thin films. *European Polymer Journal*, 139, 109995. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109995>
- Tambawala, H., Batra, S., Shirapure, Y., y More, A. P. (2022). Curcumin- a bio-based precursor for smart and active food packaging systems: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(6), 2177-2208. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02372-x>
- Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., y Thakur, V. K. (2018). Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.013>
- Thivya, P., Bhosale, Y. K., Anandakumar, S., Hema, V., y Sinija, V. R. (2021). Exploring the Effective Utilization of Shallot Stalk Waste and Tamarind Seed for Packaging Film Preparation. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5779-5794. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01402-4>
- Thulasisingh, A., Kumar, K., Yamunadevi, B., Poojitha, N., Suhail-MadharHanif, S., y Kannaiyan, S. (2022). Biodegradable packaging materials. *Polymer Bulletin*, 79(7), 4467-4496. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03767-x>
- Tkaczewska, J., Kulawik, P., Jamróz, E., Guzik, P., Zając, M., Szymkowiak, A., y Turek, K. (2021). One- and double-layered furcellaran/carp skin gelatin hydrolysate film system with antioxidant peptide as an innovative packaging for perishable foods products. *Food Chemistry*, 351, 129347. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129347>
- Torres, F. G., Rodriguez, S., y Saavedra, A. C. (2019). Green Composite Materials from Biopolymers Reinforced with Agroforestry Waste. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(12), 2651-2673. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01561-5>
- Trombino, S., Cassano, R., Ferrarelli, T., Leta, S., Puoci, F., y Picci, N. (2012). Preparation, characterization and efficacy evaluation of synthetic biocompatible polymers linking natural antioxidants. *Molecules*, 17(11), 12734-12745. <https://doi.org/10.3390/molecules171112734>
- Ubeda, S., Aznar, M., Nerín, C., y Kabir, A. (2021). Fabric phase sorptive extraction for specific migration analysis of oligomers from biopolymers. *Talanta*, 233, 122603. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122603>
- Umesh, M., Santhosh, A. S., Shanmugam, S., Thazeem, B., Alharbi, S. A., Almoallim, H. S., Chi, N. T. L., y Pugazhendhi, A. (2022). Extraction, characterization, and fabrication of cellulose biopolymer sheets from Pistia stratiotes as a biodegradable coating material: An unique strategy for the conversion of invasive weeds into value-added products. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(12), 5057-5068. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02511-4>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource. *Isua Global Waste Management Outlook*. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- Valbuena-Ussa, E. O. (2011). El análisis de contenido: De lo manifiesto a lo oculto. En *La investigación en ciencias sociales. Estrategias de investigación* (1.a ed., pp. 211-222). Universidad Piloto de Colombia.
- Vasilachis de Gialdino, I. (2006). *La investigación cualitativa*. En Estrategias de investigación cualitativa. Gedisa.
- Vasil'ev, M. P. (2007). Basic scientific and practical results and prospects for development of collagen-based biomaterials. *Fibre Chemistry*, 39(2), 114-121. <https://doi.org/10.1007/s10692-007-0025-8>
- Vega-Castro, O., León, E., Arias, M., Cesario, M. T., Ferreira, F., da Fonseca, M. M. R., Segura, A., Valencia, P., Simpson, R., Nuñez, H., y Contreras-Calderon, J. (2021). Characterization and production of a polyhydroxyalkanoate from cassava peel waste: manufacture of biopolymer microfibers by electrospinning. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(1), 187-200. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01861-1>
- Vibha, K., y Negi, S. (2020). Enzymatic plasticising of lignin and styrene with adipic acid to synthesize a biopolymer with high antioxidant and thermostability. *Polymer Degradation and Stability*, 174, 109081. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109081>
- Vidović, E., Faraguna, F., y Jukić, A. (2017). Influence of inorganic fillers on PLA crystallinity and thermal properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 371-380. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5750-x>
- Villarreal, M. R., Navarro, D. A., Ponce, N. M. A., Rojas, A. M., y Stortz, C. A. (2021). Perennial halophyte Salicornia neei Lag.: Cell wall composition and functional properties of its biopolymers. *Food Chemistry*, 350, 128659. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128659>
- Virtanen, S., Chowreddy, R. R., Irmak, S., Honkapää, K., y Isom, L. (2017). Food Industry Co-streams: Potential Raw Materials for Biodegradable Mulch Film Applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(4), 1110-1130. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0888-y>

- Visakh, P. M., y Thomas, S. (2010). Preparation of Bionanomaterials and their Polymer Nanocomposites from Waste and Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 121-134. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9009-7>
- Volkova, T. V., Simonova, O. R., y Perlovich, G. L. (2022). Permeability of diverse drugs through a lipid barrier: Impact of pH and cyclodextrin. *Journal of Molecular Liquids*, 357, 119135. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119135>
- Wang, D. Y., Li, H. J., Chen, X., Nie, B. L., y Wu, Y. C. (2022). Fabricating of grape seed proanthocyanidins loaded Zein-NaCas composite nanoparticles to exert effective inhibition of Q235 steel corrosion in seawater. *Journal of Molecular Liquids*, 348, 118467. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118467>
- Wang, H., Li, Y., Zuo, Y., Li, J., Ma, S., y Cheng, L. (2007). Biocompatibility and osteogenesis of biomimetic nano-hydroxyapatite/polyamide composite scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 28(22), 3338-3348. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.04.014>
- Wang, X., Qu, P., y Zhang, L. (2014). Thermal and structure properties of biobased cellulose nanowhiskers/poly (lactic acid) nanocomposites. *Fibers and Polymers*, 15(2), 302-306. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0302-0>
- Wang, Y., Wang, X., Xie, Y., y Zhang, K. (2018). Functional nanomaterials through esterification of cellulose: A review of chemistry and application. *Cellulose*, 25(7), 3703-3731. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1830-3>
- Wazzan, N. (2021). Adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) on nanographene surface: Density functional theory study. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(3), 103002. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103002>
- Wiącek, A. E., Jurak, M., Gozdecka, A., y Worzakowska, M. (2017). Interfacial properties of PET and PET/starch polymers developed by air plasma processing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 532, 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.04.074>
- Williamson, K., y Hatzakis, E. (2019). NMR analysis of roasted coffee lipids and development of a spent ground coffee application for the production of bioplastic precursors. *Food Research International*, 119, 683-692. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.046>
- Wu, J. H., Wu, C. P., Kuo, M. C., y Tsai, Y. (2016). Characterization and Properties of Reactive Poly (Lactic Acid)/Ethylene-Vinyl Alcohol Copolymer Blends with Chain-Extender. *Journal of Polymers and the Environment*, 24(2), 129-138. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0755-x>
- Wu, L. T., Tsai, I. L., Ho, Y. C., Hang, Y. H., Lin, C., Tsai, M. L., y Mi, F. L. (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>
- Xian, X., Wang, X., Zhu, Y., Guo, Y., y Tian, Y. (2018). Effects of MCC Content on the Structure and Performance of PLA/MCC Biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(8), 3484-3492. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1226-3>
- Xie, L., Xu, H., Wang, Z. P., Li, X. J., Chen, J. B., Zhang, Z. J., Yin, H. M., Zhong, G. J., Lei, J., y Li, Z. M. (2014). Toward faster degradation for natural fiber reinforced poly(lactic acid) biocomposites by enhancing the hydrolysis-induced surface erosion. *Journal of Polymer Research*, 21(3), 357. <https://doi.org/10.1007/s10965-014-0357-z>
- Xing, H., Zhang, T., Pan, F., y Liu, J. (2021). Application of Electrochemically Synthesized Zinc Oxide Nanorods/Fava Bean Starch biocomposite in Food Active Packaging. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(3), 210357. <https://doi.org/10.20964/2021.03.32>
- Yadav, S., Mehrotra, G. K., Bhartiya, P., Singh, A., y Dutta, P. K. (2020). Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan-gelatin film for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 227, 115348. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115348>
- Yadav, S., Mehrotra, G. K., y Dutta, P. K. (2021). Chitosan based ZnO nanoparticles loaded gallic-acid films for active food packaging. *Food Chemistry*, 334, 127605. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127605>
- Yeo, J. C. C., Muiruri, J. K., Thitsartarn, W., Li, Z., y He, C. (2018). Recent advances in the development of biodegradable PHB-based toughening materials: Approaches, advantages and applications. *Materials Science and Engineering: C*, 92, 1092-1116. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.006>
- Yi, L., Luo, S., Cui, L., Budai-Szűcs, M., Móczó, J., y Pukánszky, B. (2022). Processes taking place during the preparation and use of electrospun PLA fibers and their effect on controlled drug release. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(23), 13191-13199. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11554-7>
- York, A., Kirkland, S., y McCormick, C. (2008). Advances in the synthesis of amphiphilic block copolymers via RAFT polymerization: Stimuli-responsive drug and gene delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 60(9), 1018-1036. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.02.006>
- Yu, J., Zhu, Y., Ma, H., Liu, L., Hu, Y., Xu, J., Wang, Z., y Fan, Y. (2019). Contribution of hemicellulose to cellulose nanofiber-based nanocomposite films with enhanced strength, flexibility and UV-blocking properties. *Cellulose*, 26(10), 6023-6034. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02518-6>
- Zafar, F., Sharmin, E., Zafar, H., Shah, M. Y., Nishat, N., y Ahmad, S. (2015). Facile microwave-assisted preparation of waterborne polyesteramide/OMMT clay bio-nanocomposites for protective coatings. *Industrial Crops and Products*, 67, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.057>

- Zahiri Oghani, F., Tahvildari, K., y Nozari, M. (2021). Novel antibacterial food packaging based on chitosan loaded ZnO nano particles prepared by green synthesis from nettle leaf extract. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(1), 43-54. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01621-7>
- Zhang, D., Chen, L., Cai, J., Dong, Q., Din, Z., Hu, Z. Z., Wang, G. Z., Ding, W. P., He, J. R., y Cheng, S. Y. (2021). Starch/tea polyphenols nanofibrous films for food packaging application: From facile construction to enhance mechanical, antioxidant and hydrophobic properties. *Food Chemistry*, 360, 129922. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129922>
- Zhang, Q., Li, D., Zhang, H., Su, G., y Li, G. (2018). Preparation and properties of poly(lactic acid)/sesbania gum/nano-TiO₂ composites. *Polymer Bulletin*, 75(2), 623-635. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2059-2>
- Zhang, Y., Chan, H. F., y Leong, K. W. (2013). Advanced materials and processing for drug delivery: The past and the future. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(1), 104-120. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.10.003>
- Zhao, W., Liang, X., Wang, X., Wang, S., Wang, L., y Jiang, Y. (2022). Chitosan based film reinforced with EGCG loaded melanin-like nanocomposite (EGCG@MNPs) for active food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 290, 119471. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119471>
- Zheng-Yang He, -Chen, Q., Wu, Y.-T., & Pan, Z.-J. (2020). Biopolymer Composite Nanofibers Electrospun from Regenerated Silk Fibroin and PHBV: Fabrication Method, Morphology and Thermal Stability. *Polymer Science, Series A*, 62(6), 648-659. <https://doi.org/10.1134/S0965545X2006005X>
- Zia, F., Zia, K. M., Zuber, M., Kamal, S., y Aslam, N. (2015). Starch based polyurethanes: A critical review updating recent literature. *Carbohydrate Polymers*, 134, 784-798. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.034>
- Zia, K. M., Tabasum, S., Nasif, M., Sultan, N., Aslam, N., Noreen, A., y Zuber, M. (2017). A review on synthesis, properties and applications of natural polymer based carrageenan blends and composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 96, 282-301. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.095>
- Zou, Y., Zhang, C., Wang, P., Zhang, Y., y Zhang, H. (2020). Electrospun chitosan/polycaprolactone nanofibers containing chlorogenic acid-loaded halloysite nanotube for active food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116711. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116711>