

Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales

Riview: biodegradable polymeric materials and their application in different industrial sectors

Juan Carlos Posada¹
Emmanuel Montes-Florez²

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) (Colombia). Correo electrónico: juancposada@itm.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8526-4544>

² Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) (Colombia).
Correo electrónico: emmanuelmontes275095@correo.itm.edu.co

Recibido: 04-12-2020 Aceptado: 03-11-2021

Cómo citar: Posada, Juan Carlos; Montes-Florez, Emmanuel (2021). Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales. *Informador Técnico*, 86(1), 94 - 110.
<https://doi.org/10.23850/22565035.3417>

Resumen

La producción de materiales poliméricos a nivel mundial representa un consumo estimado en volumen de 359 millones de toneladas en el último año. Los polímeros, por su versatilidad de producción y aplicación en diversos campos de la industria, hoy en día están generando un problema ambiental por las grandes cantidades de residuos que se generan para su disposición final. Con el objetivo de encontrar aplicaciones amigables con el medio ambiente, se han venido desarrollando diferentes tipos de materiales como son los biopolímeros, que se pueden utilizar para fabricar materiales compuestos de matriz polimérica con algún tipo de carga de origen orgánico como las fibras naturales, para elaborar productos para el sector alimenticio, de construcción y automotriz, entre otros. Los polímeros biodegradables se han convertido en una buena opción para ser empleados como material sustituto que puedan mitigar en cierta proporción el impacto ambiental generado por los polímeros convencionales. El presente trabajo reporta una revisión bibliográfica que muestra la tendencia de aplicación de los biopolímeros de matriz polimérica con fibra natural. Para este propósito, se generó una búsqueda de información relevante sobre las tendencias de estos materiales, como también de sus diferentes aplicaciones en diversos sectores de la industria a nivel mundial, que permitan dar un conocimiento claro de las nuevas tendencias de la investigación para futuros desarrollos e investigaciones.

Palabras clave: ácido poliláctico; biopolímeros; economía circular; fibras naturales; manufactura sostenible; PLA; polímeros; sostenibilidad; termoplásticos.

Abstract

The production of polymeric materials worldwide in a wide range of applications represented an estimated consumption volume of 359 million tons last year. Polymers, due to their versatility of production and application in various fields of industry, are currently generating an environmental problem due to the large amounts of waste generated for their final disposal. To find environmentally friendly applications, different types of materials have been developed, such as biopolymers, which can be used to manufacture polymeric matrix composite materials with some type of organic filler such as natural fibers to produce products for the food, construction, and automotive sectors, among others. Biodegradable polymers have become a good option

to be used as a substitute material that can mitigate to a certain extent the environmental impact generated by conventional polymers. This bibliographic review shows the application trend of polymeric matrix biopolymers with a natural fiber. For this purpose, a search for relevant information on the trends of these materials, as well as their different applications in various sectors of the industry worldwide, was made to provide a clear understanding of the new trends for future developments and research.

Keywords: polylactic acid; biopolymers; circular economy; sustainable manufacturing; natural fibers; PLA; polymers; sustainability; thermoplastics.

1. Introducción

Los materiales poliméricos han aumentado de manera significativa su uso a nivel mundial. Su bajo costo, amplia gama de propiedades y versatilidad les permiten ser utilizados en diferentes aplicaciones comerciales e industriales, generando así un crecimiento continuo de la demanda mundial, reflejada en una producción de más de 320 millones de toneladas en el año 2017, y un total de más de 359 millones de toneladas para el año 2018, de las cuales el 30 % fueron fabricadas en China, el país de mayor producción y proyección en la transformación de materiales poliméricos (Plastics Europe; Conversio Market; Strategy GmbH, 2019; Thompson; Moore; vom Saal; Swan, 2009; Paletta; Leal Filho; Balogun; Foschi; Bonoli, 2019). En Colombia, una persona consume aproximadamente 24 kg de materiales plásticos al año, que se reflejan en la generación anual de 1.250.000 toneladas, de las cuales el 56 % corresponde a plásticos de un solo uso (Gómez, 2018).

A partir de la alta producción y demanda de los productos poliméricos, se generan una gran cantidad de desechos posindustriales y posconsumo, que dan origen a una problemática ambiental muy compleja de controlar, los plásticos de un solo uso, conocidos también como “*comodities*”, que se producen en cantidades alarmantes. Como ejemplo, se tiene que solo en Estados Unidos y Europa, representan un tercio del consumo total de plásticos, y generan más del 60 % de los residuos plásticos posconsumo a nivel mundial (Plastics Europe; Plastics Europe Market Research Group [PEMRG]; Consultic Marketing; Industrieberatung GmbH, 2017). Además, gran parte de estos desechos no tiene una disposición final adecuada, lo que causa efectos negativos en el medio ambiente de los lugares donde se disponen (García; Pinzón; Villa, 2020; Quintero; Falguera; Muñoz, 2010; Scott, 2007). Esto debido a que se requiere entre cientos y miles de años para que este tipo de materiales logren descomponerse en condiciones naturales (Conchubhair *et al.*, 2019; Wang; Tan; Peng; Qiu; Li, 2016).

Colombia no es ajena a esta problemática, pues ocupa el lugar número 15 en el ranking en afectación ambiental a nivel mundial, esto debido a los altos niveles de contaminación de residuos plásticos en las principales fuentes hídricas del país, como son el río Amazonas y el río Magdalena (Gómez, 2018). Con el fin de mitigar las problemáticas ambientales, los gobiernos han emitido diferentes regulaciones y directivas, entre ellas, la de la comunidad Europea, que permite la incineración de solo el 5 % residuos desechados, y la del gobierno Japones, que establece que para que en el año 2020, el 20 % de los plásticos utilizados deben ser biodegradables (Soroudi; Jakubowicz, 2013).

A raíz de las problemáticas ambientales generadas por los desechos plásticos, se ha generado un creciente interés por desarrollar nuevos materiales amigables con el medio ambiente, que puedan cumplir con las mismas especificaciones técnicas de los polímeros convencionales, pero con un menor impacto ambiental; una alternativa, por ejemplo, pueden ser los polímeros biodegradables. Sin embargo, algunos de estos materiales, debido a sus limitaciones en las propiedades físico-mecánicas, pueden presentar restricciones en algunas aplicaciones. Este tipo de limitaciones son susceptibles de mejora, como es el caso de la elaboración de un material compuesto de matriz polimérica con la adición fibras naturales como refuerzo, para obtener como resultado un material con mejores atributos técnicos, enmarcado en la sostenibilidad y la economía circular (Faruk; Bledzki; Fink; Sain, 2012; Hong; Xiao; Guo; Liu; Zhang, 2019; Kaplan, 1998; Mohanty; Vivekanandhan; Pin; Misra, 2018; Netravali, 2019; Eichhorn *et al.*, 2010; Ozyhar; Baradel; Zoppe, 2020).

Un polímero biodegradable es aquel que se puede degradar una vez cumple su vida útil, bajo condiciones de compostabilidad, generando subproductos tales como el dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), metano (CH₄), compuestos inorgánicos y biomasa, sin dejar residuos visibles ni tóxicos (Borrowman; Johnston; Adhikari; Saito; Patti, 2020). Estos materiales se pueden clasificar según su origen, a continuación, se relacionan algunos: proteínas y polisacáridos obtenidos directamente de biomasa, el ácido poliláctico (PLA), a partir de biopolímeros sintéticos de biomasa, petroquímicos como la policaprolactona (PCL) y el ácido poliglicólico (PGA), o los obtenidos por fermentación microbiana, como el polihidroxialcanoato (PHA) y el ácido polihidroxibutírico (PHB).

Entre los materiales poliméricos biodegradables de origen orgánico más utilizados se encuentran los derivados del almidón, por encontrarse en grandes cantidades, ser renovables, y tener un costo relativamente bajo, además pueden ser fácilmente procesables (Lomelí-Ramírez *et al.*, 2011). Adicionalmente, el PLA debido a sus diferentes condiciones de procesabilidad, su rigidez, transparencia, biocompatibilidad, comportamiento termoplástico y similitud con los plásticos convencionales, le permite a este material biodegradable actuar como una posible alternativa para las industrias manufactureras a nivel mundial (Stloukal *et al.*, 2015; Zhong; Godwin; Jin; Xiao, 2020). Una de las restricciones en la utilización masiva de este material era su alto costo, pero en la actualidad, gracias a los avances tecnológicos para su elaboración, su precio se ha reducido gradualmente en los últimos años, lo que ha permitido masificar su uso (Nofar; Sacligil; Carreau; Kamal; Heuzey, 2019).

Dentro de los elementos críticos en la elaboración de los compuestos poliméricos están las cargas reforzantes. Con el fin de generar compuestos amigables con el medio ambiente, se ha incrementado sustancialmente el uso de las fibras naturales para este fin, que antes de ser utilizadas, y con el fin obtener sus mayores prestaciones, deben pasar por diferentes tratamientos antes de ser utilizadas como carga reforzante en una matriz de polímero biodegradable, como consecuencia de su alto nivel de absorción de humedad. La adhesión insuficiente entre las fibras no tratadas y la matriz polimérica pueden generar una delaminación con el tiempo, por lo tanto, es necesario realizar una modificación de la superficie de las fibras. Para este fin, se cuenta con diferentes métodos físicos y químicos, como el tratamiento con plasma o copolimerización por injerto (Bledzki; Reihmane; Gassan, 1996).

Otro tipo de tratamiento con el que se puede contar es el tratamiento alcalino de las fibras, que consiste en una primera limpieza de las fibras con agua destilada para eliminar las impurezas y la suciedad, luego se remojan en una solución de NaOH al 5 % en peso a temperatura ambiente durante 30 minutos, lo que asegura la eliminación de las sustancias no celulósicas y promueve la individualización de las fibras, luego de este procedimiento se lavan nuevamente con agua destilada y se neutralizan con ácido acético al 1 % en peso, por último, son secadas en un horno de vacío a 80 °C (Mazzanti *et al.*, 2019a; Mazzanti; Salzano de Luna; Pariente; Mollica; Filippone, 2020). Para garantizar la adherencia fibra matriz, se puede utilizar carbonato de calcio tratado, que actúa como aditivo mineral funcional en materiales compuestos de PLA, reforzados con fibras naturales, que le otorgan al compuesto ventajas, tanto de procesabilidad como en las propiedades físico-mecánicas (Ozyhar *et al.*, 2020).

Para establecer las propiedades de este tipo de compuestos, se deben considerar algunos factores claves en la caracterización físico-mecánica, como la fracción de volumen/peso de la fibra, la secuencia de apilamiento de la capa de fibra, los métodos de procesamiento, el tratamiento de las fibras y los efectos ambientales (Sawpan; Pickering; Fernyhough, 2011). A la hora de evaluar el desempeño de un compuesto, se deben relacionar tanto sus propiedades físico mecánicas como las condiciones de procesabilidad, lo que crea la necesidad de extender esta evaluación a las técnicas convencionales de procesamiento, como el moldeo por inyección, extrusión y el moldeo por compresión, donde se espera obtener iguales o mejores condiciones de procesabilidad en comparación con el comportamiento de un polímero convencional (Ashter, 2016).

En este artículo realiza una revisión del estado del arte referente a la tendencia de los materiales poliméricos biodegradables y sus posibles aplicaciones en diferentes sectores industriales, con el fin de convertirse en material de referencia para posibles y futuros desarrollos en este campo específico.

2. Metodología

Para la búsqueda con relación a los temas de interés del presente artículo, se utilizaron las siguientes bases de datos: Web of Science, IEEE, Scopus, ScienceDirect, arXiv y Scielo, de donde se seleccionaron los 80 artículos con mayor relevancia científica. Con el fin de refinar y generar una búsqueda efectiva en el marco del tema de interés, se utilizaron las siguientes palabras clave: biopolímeros, manufactura sostenible, polímeros, sostenibilidad, termoplásticos, economía circular y fibras naturales. Además, se utilizaron las siguientes ecuaciones: biopolymers and natural fibers, circular economy and polymers, thermoplastics and biopolymers, sustainable manufacturing and polymers, y sustainability and biopolymers. Por medio de la combinación de las diferentes palabras clave utilizadas en las ecuaciones de búsqueda, se genera la información relevante para la construcción del presente artículo.

2.1. Elaboración y desarrollo de compuestos poliméricos biodegradables

En los últimos años, el almidón, que es una materia prima abundante y renovable en la naturaleza, se considera como uno de los posibles candidatos para sustituir los materiales poliméricos convencionales, su bajo costo y su no toxicidad han suscitado que sea investigado ampliamente para ser utilizado en aplicaciones como empaques para alimentos. Además, por ser un polímero de naturaleza orgánica, contribuye a mitigar el problema de contaminación generado por los plásticos *comodities*. El almidón no es realmente un material termoplástico, sin embargo, en presencia de agua o un plastificante no acuoso, puede comportarse de manera similar (Chen *et al.*, 2020; Fabra; Martínez-Sanz; Gómez-Mascaraque; Gavara; López-Rubio, 2018).

Sung, Chang y Han (2017) realizaron un estudio en el cual se buscaba analizar las propiedades de un material compuesto a partir de una matriz polimérica de PLA reforzado con nano cristales de celulosa extraídos de la piel del café a través de un tratamiento álcali, seguido de hidrolisis con **ácido** sulfúrico. En esta investigación se elaboraron compuestos con diferente concentración de nanocristales (1, 3 y 5 %), las cuyas propiedades físico-mecánicas y morfológicas fueron analizadas, y se obtuvo como resultado un aumento sustancial en estas. Se concluye que se puede utilizar este tipo de cargas para superar algunos inconvenientes que presenta el PLA (Sung *et al.*, 2017). Igualmente, un estudio realizado por Wu en Taiwán demuestra que un material compuesto por PLA y posos de café gastado (SCG) o posos de café gastado reticulados (TSCG) permiten el aumento de la compostabilidad a niveles mayores que la del PLA puro (Wu, 2015).

En estudios realizados por los investigadores chinos Hong *et al.* (2019), en un material compuesto por PLA y fibras de bagazo tratadas con álcali (ABE), no tratada (UBF), modificada con un agente de acoplamiento de silano (SBF) y modificada con tratamiento alcalino combinado con agente de acoplamiento de silano (ASBF), se pudo establecer que este último jugó un papel de mayor impacto que el tratamiento **álcali** a la hora de mejorar la compatibilidad interfacial de los compuestos PLA/BF. Sin embargo, el tratamiento álcali no tuvo efecto sobre las propiedades mecánicas de los compuestos (Hong *et al.*, 2019).

En estudios recientes realizados por De Oliveira, Nunes de Macedo y Dos Santos Rosa (2019), se analizaron las propiedades técnicas y los aspectos ambientales de los compuestos elaborados a partir de **ácido** poliláctico (PLA), almidón y un alto contenido de fibra de algodón natural, que permitieron establecer que los compuestos que usan este tipo de fibras como refuerzo, presentan similares prestaciones que los termoplásticos basados exclusivamente en PLA o almidón termoplástico. Además, a mayor contenido de fibras de algodón, más se puede mejorar su rendimiento general bajo un punto de vista de ecoeficiencia (relación del desempeño ambiental con su valor) (De Oliveira *et al.*, 2019).

En otros estudios a nivel internacional, se demuestra que los desechos de las desmontadoras de algodón (CGW) generan en la actualidad problemas ambientales y empresariales, debido a que su disposición final es económicamente costosa. Para tratar de dar uso a este residuo, se realizó una investigación al material compuesto por PLA/CGW, que arrojó como resultado que este puede ser utilizado para la construcción en aplicaciones de baja carga o no estructurales (Bajracharya; Bajwa; Bajwa, 2017).

Mazzanti *et al.* (2019b) investigaron los mecanismos constituidos entre un **ácido** poliláctico (PLA) reforzado con 3 y 6 % en peso con fibras de cáñamo sin tratar (UF) y fibras tratadas con álcali (TF), que le otorgaron propiedades de tensión. Este fenómeno posiblemente se debe a la adhesión interfacial fibra-matriz lograda por la individualización de las fibras delgadas, causada por el tratamiento alcalino (Mazzanti *et al.*, 2019b).

Chaitanya, Singh y Song (2019) realizaron estudios de reciclaje para compuestos de PLA/sisal, desarrollados mediante la incorporación del 30 % en peso de fibras de sisal tratadas con bicarbonato de sodio. Este material se recicló varias veces para su posterior uso en un proceso de inyección, donde se demostró que su estabilidad térmica disminuye gradualmente después de cada reciclaje. Además, se sugiere que este material puede ser reciclado hasta un máximo de tres veces. Unos estudios mecánico-dinámicos realizados demostraron que después de varios reprocesos se genera una escisión o división de la cadena de PLA (Chaitanya *et al.*, 2019).

Chotiprayon, Chaisawad y Yoksan (2020) analizaron un material conformado por un almidón termoplástico (TPS) y un **ácido** poliláctico (PLA) en una relación 60/40, reforzado por fibras de coco (CF). El compuesto se obtuvo por medio de una extrusora de doble husillo, y luego fue moldeado por inyección, el material alcanzó una mejora en la rigidez y dureza al aumentar la cantidad de CF en ciertas proporciones (Chotiprayon *et al.*, 2020). Además, otros estudios demostraron que materiales compuestos por PLA/fibras de coco afectan su estabilidad térmica a medida que se aumenta la cantidad de fibra. Sin embargo, entre mayor sea el porcentaje de fibra de coco, el material se compostará **más eficientemente que** PLA puro (Dong *et al.*, 2014).

2.2. Aplicaciones de los polímeros biodegradables

2.2.1. Embalajes para alimentos

Los polímeros a base de petróleo aumentaron su producción y juegan un papel importante en el sector alimenticio, su precio moderado y sus propiedades hacen que este tipo de materiales sea cada vez más utilizado en este sector (Mohamed; El-Sakhawy; El-Sakhawy; 2020). Sin embargo, las preocupaciones por el medio ambiente y la salud alimentaria en la actualidad han hecho que los polímeros biodegradables y los agentes antimicrobianos de origen natural, sean cada vez más estudiados como posibles sustitutos de los materiales poliméricos tradicionales utilizados en embalajes para alimentos, sus propiedades selectivas, no tóxicas, y su biodegradabilidad hacen de estos materiales una opción para mitigar las problemáticas ecológicas y de salud.

El PLA es uno de los materiales que más llama la atención de los investigadores gracias al poco riesgo que presenta para la salud y el medio ambiente, esto debido a que en condiciones de degradación se transforma en ácido láctico, siendo una sustancia alimenticia segura. La elaboración de embalajes activos y amigables con el medio ambiente se hace cada vez más importante para este tipo de industria. Un embalaje activo se puede definir como el que cambia su condición para prolongar la vida útil del producto, mejorando las propiedades sensoriales mientras se mantiene la calidad de los alimentos. En la actualidad, se incorporan sustancias antimicrobianas en los materiales de embalaje activos para controlar el crecimiento de microorganismos como hongos y levaduras a través de la liberación controlada de compuestos activos, que le permiten a estos embalajes elaborados con polímeros biodegradables una mejor actividad antimicrobiana (Ramos; Jiménez; Peltzer; Garrigós, 2012; Conn *et al.*, 1995).

Un material compuesto a partir de una matriz polimérica de PLA con refuerzo de fibras de palma genera una buena interacción carga-matriz, observándose el potencial que tienen estas fibras como refuerzo natural en películas de PLA al proporcionar un aumento en las propiedades físico-mecánicas, lo que abre el camino para que este compuesto sea utilizado como un posible sustituto de los materiales de embalaje (Vanitha; Kavitha, 2020). Un nuevo material para envasado antimicrobiano se obtuvo mediante la incorporación de aceite

esencial de canela ciclodextrina en nanofibras de PLA mediante la técnica de electrohilado, la cual le otorga una estabilidad térmica y un aumento de la actividad antimicrobiana, prolongando la vida útil del producto, generando un material con un gran potencial para la elaboración de envases activos para el sector alimenticio (Wen *et al.*, 2016).

Con la finalidad de encontrar un nuevo material biodegradable con propiedades físico-mecánicas acordes a las necesidades del sector, se generó un material compuesto a base de PLA y poliadipato de butileno-co-tereftalato (PBAT) en una proporción de 60:40, donde se agregó aceite esencial de pino como agente plastificante para la obtención de fibras poliméricas biodegradables, estas fibras con estructura de malla podrían ser una alternativa para materiales de envasado para la conservación de frutas y hortalizas (Hernández-López *et al.*, 2019). En diferentes investigaciones se han generado películas fibrosas al encapsular carvacrol en fibras de zeína y PLA bajo la técnica de electrohilado, logrando un material con actividades antioxidantes y un aumento en su estabilidad térmica. Gracias a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas se puede utilizar para extender la vida útil de los alimentos, con una capacidad de inhibir entre un 91,3 al 99,6 % del crecimiento de moho y levadura (Altan; Aytac; Uyar, 2018). En otra aplicación realizada en Latinoamérica, se tiene un procedimiento para obtener películas de PLA con nanofibras naturales y con la presencia de un agente antimicrobiano para ser utilizado en el envasado de alimentos activos. La incorporación de nanofibras de polialcohol vinílico (PVA) con nano cristales de celulosa mediante electrohilado en películas de PLA, con una impregnación de timol, permitió un aumento significativo de sus propiedades mecánicas y térmicas (Alvarado *et al.*, 2018).

En otros desarrollos, se obtuvo películas antifúngicas de PLA y polibutileno-succinato-co-adipato (PBSA) que contenían timol al 3 y al 6 % en peso, siendo eficaces contra el crecimiento fúngico en pan empacado. El envase antifúngico biodegradable que contiene 6 % de timol en peso podría extender la vida útil del pan hasta 9 días en comparación con 3 días en polipropileno biorientado BOPP comercial, y potencialmente puede aumentar la vida útil de otros productos alimenticios (Suwanamornlert *et al.*, 2020). La incorporación de timol en compuestos de PLA/kenaf mostró una disminución en la resistencia a la tracción, sin que se notaran cambios significativos al aumentar el porcentaje de carga de fibra de kenaf. Sin embargo, la resistencia a la tracción y la rigidez de los compuestos aumentaron proporcionalmente al incremento de la carga, y lograron un efecto de refuerzo dentro del PLA. Además, se encontró que, al agregar timol, se alcanza una resistencia a la tracción aceptable en comparación con el PLA puro, lo que hace que estos materiales sean candidatos potenciales para sistemas de envasado industrial y alimenticio (Tawakkal; Cran; Bigger, 2014).

En esta tendencia de generar nuevos compuestos, encontramos un desarrollo de películas de bio-nanocompuestos con base en una matriz polimérica de PLA, reforzadas con nanocristales de celulosa (CNC) extraídos de la piel de plata del café, que es un subproducto de la tostión de este fruto. La resistencia a la tracción y el módulo de Young son algunas de las propiedades que se mejoraron en este material, sin embargo, la permeabilidad al vapor de agua disminuyó gradualmente con el aumento de los nanocristales de celulosa hasta un 3 %, y se encontraron buenas propiedades de barrera al oxígeno para todos los nanocompuestos, por lo que este material podría utilizarse como una alternativa para el envasado de alimentos (Sung *et al.*, 2017).

En otro desarrollo se intentó modificar la procesabilidad y el costo del PLA, sin comprometer sus propiedades mecánicas y su biodegradabilidad con gran potencial de aplicación. Para esto se agregaron fibras de plátano tratadas químicamente y nanoarcilla modificada orgánicamente como carga reforzante en la matriz de PLA, mediante el método de mezcla por fusión. Las características de rendimiento mecánico, térmico y de inflamabilidad permitieron un nuevo desarrollo de productos biodegradables bajo condiciones industriales (Jandas; Mohanty; Nayak, 2013).

2.2.2. Industria automotriz y aeronáutica

Los materiales poliméricos juegan un papel fundamental en la industria automotriz y aeronáutica. La preocupación por el agotamiento de los recursos energéticos no renovables y la necesidad de reducir las emisiones de los vehículos en forma de gases de efecto invernadero han hecho que se aumente la eficiencia

en el rendimiento de los vehículos, por lo que es necesario disminuir su peso a partir de diseños ligeros en la carrocería. Por lo tanto, cada vez se hace más notable el cambio de productos que tradicionalmente eran metálicos por poliméricos, con propiedades que permiten optimizar el uso de combustible de los vehículos (Kumar; Babu; Rao, 2018).

En la búsqueda de sustituir las espumas tradicionales en las industria automotriz y aeronáutica elaboradas con polímeros sintéticos que generan un impacto negativo en el ambiente, se evaluó la adición de fibras de vidrio modificadas con silano a una matriz de PLA. Este nuevo material mostró un aumento sustancial en la resistencia a la tensión, rigidez, y en la tenacidad al impacto, donde se logró elaborar una espuma con un futuro prometedor para la generación de componentes estructurales livianos que pueden ser utilizados tanto en la industria automotriz como en la aeronáutica (Wang; Zhang; Wan; Li; Zhao, 2019).

También se han desarrollado materiales denominados verdes como alternativa para los diferentes componentes automotrices, a partir de la utilización del PLA como matriz polimérica, reforzados con diferentes porcentajes de fibra de lino (7,9,13,6 y 17,6 %). La resistencia a la tracción y a la compresión del material compuesto varían con respecto a la modificación superficial de la fibra. Para 7,9 y 17,6 % de fibra, el módulo de Young es de aproximadamente 26 GPa, y para 13,6 %, parece reducirse a 22 GPa, la resistencia a la compresión disminuye de 36 MPa (7,9 %) a 25 MPa (17,6 %). Por su parte, el compuesto mejora a 45 MPa al incorporar un 13,6 % de fibra, además, el material cuenta con una absorción de energía en un rango de 25 a 30 julios, propiedades que hacen posible pueda sustituir materiales tradicionales para la elaboración de partes automotrices, pues también tiene la ventaja de ser un material biodegradable (Motru; Adithykrishna; Bharath; Guruprasad, 2020).

En otros desarrollos se han investigado fibras de bagazo, un subproducto abundante en la producción de tequila mexicano, como posible material de refuerzo para compuestos verdes de PLA mediante el moldeo por inyección y extrusión. Este compuesto se muestra como alternativa a los materiales termoplásticos convencionales, con propiedades mecánicas y de absorción de agua consistentes y repetibles, adecuadas para componentes automotrices no estructurales, así como para otros bienes de consumo (Huerta-Cardoso; Durazo-Cardenas; Longhurst; Simms; Encinas-Oropesa, 2020). Los investigadores Bax y Müssig (2008) utilizaron PLA reforzado con fibras de rayón de Cordenka y fibras de lino, generando un compuesto biodegradable. La mayor resistencia al impacto y a la tracción se encontraron para este material en una proporción de fibra-masa del 30 %, por lo que este material puede ser utilizado en el campo de la industria automotriz o electrónica.

Se evaluó también un biocompuesto fibroso preparado con fibras de ortiga tratadas con álcali y matriz de PLA en diferentes proporciones de peso, empleando procesos de cardado y moldeo por compresión. Se observó que las propiedades de tracción, flexión e impacto aumentaron inicialmente con el incremento del contenido de fibra de ortiga, que llegaron a un punto crítico, en el cual, al seguir aumentando el porcentaje de fibras sus propiedades disminuyeron, y se estableció que el máximo potencial otorgado por la fibra en las propiedades mecánicas está en la misma proporción en peso de fibras de ortiga y PLA. Un análisis termogravimétrico demostró que el material era suficientemente estable térmicamente, y el análisis mecánico-dinámico arrojó que el material presenta propiedades adecuadas para su uso, lo que demuestra un gran potencial para ser aplicado en paneles de instrumentos para automóviles (Kumar; Das, 2017).

La resina de PLA cada vez se hace más interesante para diversas aplicaciones en productos verdes, como es el caso de un compuesto reforzado con fibra híbrida de sisal y cáñamo, mediante técnicas de procesamiento por fusión y moldeo por inyección, donde se evaluaron algunas propiedades como su desempeño mecánico, su capacidad de absorción de agua, su estabilidad térmica, su cristalinidad y su microestructura, lo que mostró como resultado características óptimas del material en términos de resistencia a la tracción, módulo de Young, resistencia a la flexión y baja absorción de agua, con la adhesión interfacial mejorada entre la matriz de PLA y la fibra, con la hibridación de la fibra natural. Estos compuestos híbridos biodegradables son renovables y evitan la dependencia de recursos fósiles en disminución, además, se perfilan con gran potencial para su uso como materiales alternativos ecológicos en aplicaciones de automoción, embalaje, electrónica, interiores y agricultura (Pappu; Pickering; Kumar, 2019).

En otros estudios se recuperaron fibras de queratina (KF) de los desechos de la industria de las curtiembres, para ser utilizados como agentes reforzantes y retardantes de llama en una matriz de PLA, mediante un proceso de extrusión por fusión. Se investigó también la acción conjunta con un retardante a la llama tradicional sin halógenos (trihidróxido de aluminio). Las fibras de KF le otorgaron propiedades de retardante a la llama al PLA, de hecho, un bajo contenido de KF ha demostrado ser eficaz para pasar de la clasificación NC (no clasificable) a la V2, según la norma UL94. Además, se han logrado nuevas mejoras al aprovechar la acción conjunta entre KF y trihidróxido de aluminio, que alcanzó la clasificación V0, la misma clasificación obtenida en la muestra objetivo que contiene 50 phr, con la diferencia de que presenta un aumento del 16 % en la resistencia a la tracción, deformación a la rotura en un 40 %, y la tenacidad en un 66 %, propiedades que demuestran que este material completamente verde podría ser utilizado en los sectores eléctricos, electrónico y automotriz para la fabricación de paneles, armarios y piezas de carcasa protectoras retardantes a la llama (Sanchez-Olivares Sanchez-Solis; Calderas; Alongi, 2017).

Cada vez se generan nuevos y mejores materiales compuestos que permiten un aumento sustancial en la eficiencia de los vehículos, esto como consecuencia directa a una disminución considerable de su peso, atribuida a las bondades que otorgan los materiales poliméricos compuestos, todo esto se refleja en una disminución directa gases de efecto invernadero (Figura 1).

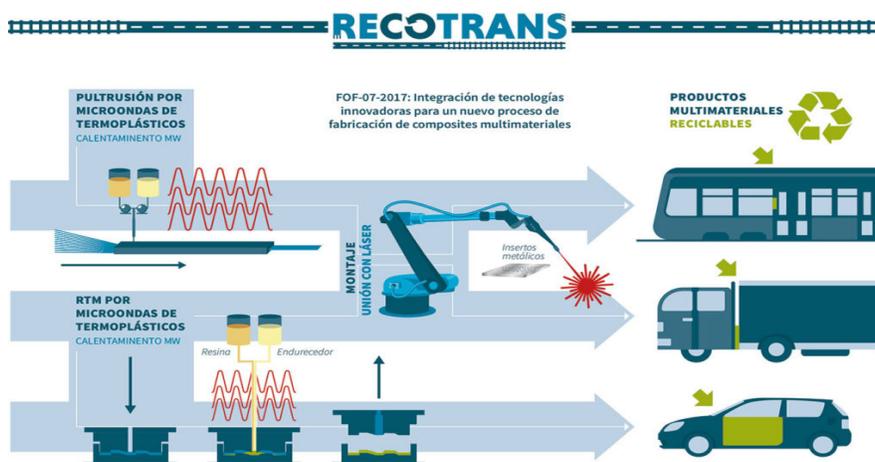


Figura 1. Tendencias de nuevos Materiales en Vehículos.
Fuente: Tomado de Ambiente Plástico (2020).

2.2.3. Aplicaciones en ingeniería

A pesar de las propiedades intrínsecas del PLA como lo son la rigidez, biocompatibilidad, biodegradabilidad y su comportamiento termoplástico similar a los plásticos sintéticos utilizados tradicionalmente, el PLA presenta algunas deficiencias, como su fragilidad y su poca resistencia a la temperatura, que lo limitan para ser utilizado en muchas áreas de la ingeniería, donde la alta tenacidad y la resistencia a altas temperaturas son características esenciales, por lo que mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas al agregar fibras naturales es de gran importancia para ampliar sus aplicaciones en diferentes sectores (Hamad; Kaseem; Ayyoob; Joo; Deri, 2018; Rasal; Janorkar; Hirt, 2010; Saeidlou; Huneault; Li; Park, 2012).

Con el propósito de encontrar nuevos materiales amigables con el medio ambiente que cumplan con unas propiedades específicas, se llevó a cabo la elaboración de un material compuesto, obtenido al adicionar diferentes proporciones de aceite de linaza epoxi en una resina de PLA con harina de cascara de avellana (HSF), para dar un efecto plastificante y mejorar las propiedades de ductilidad en el PLA. Para ese fin se le realizaron

estudios de propiedades físico-mecánicas, térmicas y termo-mecánicas, con resultados prometedores, pues se concluyó que el aceite de linaza permite una disminución en la fragilidad de compuestos de PLA/HSF (Balart; Fombuena; Fenollar; Boronat; Sánchez-Nacher, 2016).

Otros estudios encaminados a buscar alternativas se han dado a partir del PLA reforzado con fibras de plátano (BF) enlazadas mediante el uso de un agente de acoplamiento modificado químicamente. Como consecuencia de esto, se aumentó significativamente su estabilidad térmica y sus propiedades mecánicas. Esto conlleva a una reducción del costo de producción de los productos elaborados por PLA (Shih; Huang, 2011).

En otro estudio, a partir de las fibras de bambú como reforzante en una matriz polimérica de PLA se obtuvo un compuesto biodegradable. Los resultados indicaron que las propiedades mecánicas aumentaron debido a la adición de estas fibras, en otros resultados la temperatura de transición vítrea del PLA se redujo ligeramente, lo que puede mejorar las características frágiles del PLA (Wang; Wu; Shih; Huang, 2008). Un compuesto de PLA reforzado con fibra de ramio se obtuvo mediante el uso de un mezclador de rodillos, la fibra se trató con álcali y silano, los resultados arrojaron que el tratamiento superficial permite la compatibilidad entre la matriz de PLA y la fibra de ramio, lo que permite un aumento de las propiedades físico-mecánicas de este material, en comparación con las propiedades del PLA puro (Yu; Ren; Li; Yuan; Li, 2010).

También se han estudiado las propiedades mecánicas y térmicas de un biocompuesto de fibra de seda y PLA, del cual se obtuvo valores óptimos en términos de longitud de fibra y contenido de peso de 5 mm y 5 % en peso, respectivamente. Para lograr un valor máximo de microdureza, el módulo de elasticidad y ductilidad aumentaron sustancialmente entre un 39 y un 53 %, respectivamente, en comparación con el PLA puro. Además, se logró una interacción interfacial entre las fibras de seda y la matriz de PLA, que le otorgan propiedades de humectabilidad durante el proceso de inyección y extrusión (Cheung; Lau; Tao; Hui, 2008).

Siguiendo con esta tendencia, se desarrolló un tejido de bambú, el cual se utilizó como refuerzo de una matriz de PLA, para elaborar un material a partir de recursos renovables y materiales biodegradables. Al evaluar sus propiedades de tracción, flexión e impacto, se estableció que son equiparables o superiores a un PLA puro. Además, presentó una capacidad de absorción de energía al impacto que puede ser aprovechado para el desarrollo de aplicaciones estructurales de ingeniería y en el diseño de sistemas balísticos (Porras; Maranon, 2012).

2.3. Impacto ambiental

Los polímeros son materiales versátiles debido a su relación costo-rendimiento y durabilidad, sin embargo, en la actualidad por diversas causas como el nivel de vida de las personas y aplicación en diversos sectores, entre otros, su tiempo de vida útil ha disminuido sustancialmente. Por esta razón, se hacen necesarias nuevas técnicas eficientes para reciclarlos o aumentar su vida útil, y así disminuir su impacto ambiental (Valerio; Muthuraj; Codou, 2020). A pesar del impacto negativo que generan los desechos poliméricos, algunos estudios demostraron en el año 2015 que solamente el 9 % fueron reciclados, el 12 % incinerados y el 79 % depositados en rellenos sanitarios. Por esta razón, se hace necesario un aumento del reciclaje eficiente de estos polímeros o su reutilización como materia prima en diferentes productos de valor agregado (Geyer; Jambeck; Law, 2017).

La economía circular es un nuevo concepto que permite un modelo sostenible que ayuda a la disminución de los impactos ambientales generados en los sectores comerciales (Gaustad; Krystofik; Bustamante; Badami, 2018). En la actualidad se cuenta con el modelo lineal de producción, que consiste en la extracción de recursos elaboración de productos para su posterior uso. Un gran porcentaje de estos productos después de cumplir su ciclo de vida van a parar a un relleno sanitario. Este tipo de modelo no garantiza la sostenibilidad en el tiempo de los recursos naturales, lo que se refleja en su agotamiento progresivo (Suárez-Eiroa; Fernández; Méndez-Martínez; Soto-Oñate, 2019).

La economía circular busca entonces reemplazar los modelos industriales lineales ineficaces en su sostenibilidad, con sistemas de producción de ciclo cerrado basados en el principio de no desperdicio, mitigando la problemática inherente (pérdida de materiales y energía, dependencia de recursos escasos, obsolescencia programada) (De Angelis, 2020). Para dar soluciones en torno a la problemática ambiental que rodea a los plásticos, se han generado diferentes propuestas, entre las cuales se encuentra “Una estrategia europea para los plásticos en una economía circular” lanzada por la Unión Europea, que cuenta con diversas directrices encaminadas al aumento de la vida útil de los envases plásticos y a su disposición final, garantizando los canales eficientes para su reutilización o reciclabilidad de una forma sostenible (Matthews; Moran; Jaiswal, 2020).

Surge entonces la necesidad de encontrar nuevos y eficientes materiales biodegradables, en los que se considere desde diseño inicial hasta un aumento de la vida útil para de cierta forma garantizar su reutilización como materia prima en diferentes productos. Es así, como se puede pensar en una posible disminución de los impactos que este tipo de materiales generan en el medio ambiente. Estudios realizados en China demuestran que la estructura industrial, el nivel tecnológico y la promoción de políticas, de la mano de la conciencia pública, son los factores relevantes para el desarrollo de la economía circular (Fan; Fang, 2020).

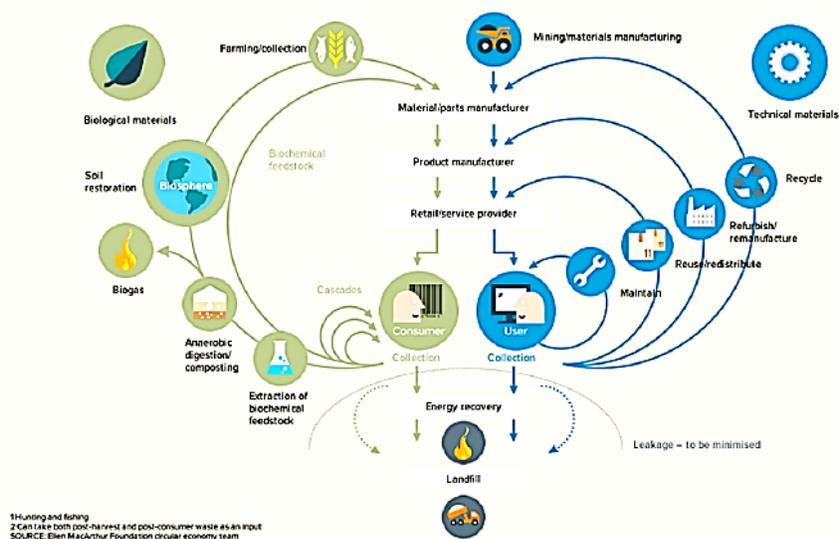


Figura 2. Mapa de la economía circular.

Fuente: Tomado de Ellen MacArthur Foundation (2014).

Debido al impacto ambiental negativo que generan los desechos plásticos causado por su mala disposición final, se hace imperativo generar un cambio sustancial en el modelo actual hacia uno eficiente y con responsabilidad, como es el de la economía circular, en la que los plásticos no se convierten en residuos, sino que regresan a la cadena productiva. Para que esto sea posible en la industria de los plásticos, es necesario rediseñar tanto los procesos como los productos, al permitir que estos puedan ser utilizados como materia prima en la misma cadena de valor (Figura 1) (Paletta *et al.*, 2019).

3. Conclusiones

La nueva disposición mundial con relación a las diferentes regulaciones y restricciones sobre el uso de plásticos de un solo uso ha generado la necesidad de producir nuevos materiales que permitan su utilización en diversos productos en los múltiples sectores de la industria, conservando en iguales proporciones las características que hasta el momento permiten los polímeros convencionales.

Se puede observar una creciente oferta de materiales poliméricos de origen natural como son el PLA, los almidones termoplásticos, entre otros, los cuales han aumentado su participación en múltiples y diversos productos, cumpliendo con las especificaciones que el mercado exige, han mostrado un gran potencial en su posible utilización, para mitigar los impactos adversos que los polímeros pueden ocasionar al medio ambiente.

Los diferentes estudios e investigaciones relacionadas en este artículo permiten establecer la necesidad actual de generar nuevos compuestos de manera eficiente y con responsabilidad ambiental, para incursionar en diferentes sectores comerciales e industriales, garantizando así un desarrollo responsable y sostenible bajo el modelo de economía circular.

La información relacionada en este artículo se convierte en un insumo de importancia que da vía a la generación de nuevos diseños, desarrollos y nuevas estrategias enfocadas en la utilización sostenible en diversos sectores industriales y comerciales de este tipo de materiales biodegradables.

Referencias

- Altan, Aylin; Aytac, Zeynep; Uyar, Tamer (2018). Carvacrol loaded electrospun fibrous films from zein and poly(lactic acid) for active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 81, 48-59.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.028>
- Alvarado, Nancy; Romero, Julio; Torres, Alejandra; López de Di Castillo, Carol; Rojas, Adrián; Galotto, María; Guarda, Abel (2018). Supercritical impregnation of thymol in poly(lactic acid) filled with electrospun poly(vinyl alcohol)-cellulose nanocrystals nanofibers: Development an active food packaging material. *Journal of Food Engineering*, 217, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.008>
- Ambiente Plástico. (3 de junio de 2020). Apuesta por vehículos más sostenibles y menos contaminantes. *Ambiente Plástico*.
<https://www.ambienteplastico.com/apuesta-por-vehiculos-mas-sostenibles-y-menos-contaminantes/>
- Ashter, Syed (2016). Processing Biodegradable Polymers. *Introduction to Bioplastics Engineering* (pp. 179-209). Nueva York: William Andrew.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-323-39396-6.00007-5>
- Bajracharya, Rohan; Bajwa, Dilpreet; Bajwa, Sreekala (2017). Mechanical properties of polylactic acid composites reinforced with cotton gin waste and flax fibers. *Procedia Engineering*, 200, 370-376.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.052>
- Balart, J. F.; Fombuena, Vicent; Fenollar, Octavio; Boronat, Teodomiro; Sánchez-Nacher, L. (2016). Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO). *Composites Part B: Engineering*, 86, 168-177.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.063>
- Bax, Benjamin; Müssig, Jörg (2008). Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Science and Technology*, 68, 1601-1607.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.004>
- Bledzki, A. K.; Reihmane, S.; Gassan, J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 59(8), 1329-1336.
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19960222\)59:8<1329::aid-app17>3.3.co;2-5](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19960222)59:8<1329::aid-app17>3.3.co;2-5)

- Borrowman, Cuyler; Johnston, Priscilla; Adhikari, Raju; Saito, Kei; Patti, Antonio (2020). Environmental degradation and efficacy of a sprayable, biodegradable polymeric mulch. *Polymer Degradation and Stability*, 175, 109126.
<https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109126>
- Chaitanya, Saurabh; Singh, Inderdeep; Song, Jung (2019). Recyclability analysis of PLA/Sisal fiber biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106895.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.106>
- Chen, Jie; Wang, Xia; Long, Zhu; Wang, Shuangfei; Zhang, Jingxian; Wang, Lei (2020). Preparation and performance of thermoplastic starch and microcrystalline cellulose for packaging composites: Extrusion and hot pressing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2295-2302.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.117>
- Cheung, Hoi-Yan; Lau, Kin-Tak; Tao, Xiao-Ming; Hui, David (2008). A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 1026-1033.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.11.009>
- Chotiprayon, Patra; Chaisawad, Buchita; Yoksan, Rangron (2020). Thermoplastic cassava starch/poly(lactic acid) blend reinforced with coir fibres. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 960-968.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.121>
- Conchubhair, Diarmuid; Fitzhenry, Deirdre; Lusher, Amy; King, Andrew; van Emmerik, Tim; Lebreton, Laurent; Ricaurte-Villota, Constanza; Espinosa, Luisa; O'Rourke, Eleanor (2019). Joint effort among research infrastructures to quantify the impact of plastic debris in the ocean. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab17ed>
- Conn, R. E.; Kolstad, J. J.; Borzelleca, J. F.; Dixler, D. S.; Filer, L. J.; Ladu, B. N.; Pariza, M. W. (1995). Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer. *Food and Chemical Toxicology*, 33(4), 273-283. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(94\)00145-E](https://doi.org/10.1016/0278-6915(94)00145-E)
- De Angelis, Roberta (2020). Circular economy and paradox theory: A business model perspective. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124823.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124823>
- De Oliveira, Sueli; Nunes de Macedo, José; Dos Santos Rosa, Derval (2019). Eco-efficiency of poly (lactic acid)-Starch-Cotton composite with high natural cotton fiber content: Environmental and functional value. *Journal of Cleaner Production*, 217, 32-41.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.198>
- Dong, Yu; Ghataura, Arvinder; Takagi, Hitoshi; Haroosh, Hazim; Nakagaito, Antonio; Lau, Kin-Tak (2014). Polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced with coir fibres: Evaluation of mechanical performance and multifunctional properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 63, 76-84.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.003>
- Eichhorn, S. J.; Dufresne, A.; Aranguren, M.; Marcovich, N. E.; Capadona, J. R.; Rowan, S.; ... Peijs, T. (2010). Review: Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 45(1), 1-33.
<https://doi.org/10.1007/s10853-009-3874-0>
- Ellen Macarthur Foundation (2014). *The circular model: an overview*.
<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/circular-economy/the-circular-model-an-overview>

- Fabra, María; Martínez-Sanz, Marta; Gómez-Mascaraque, L. G.; Gavara, Rafael; López-Rubio, Amparo (2018). Structural and physicochemical characterization of thermoplastic corn starch films containing microalgae. *Carbohydrate Polymers*, 186, 184-191.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.039>
- Fan, Yupeng; Fang, Chuanglin (2020). Circular economy development in China-current situation, evaluation and policy implications. *Environmental Impact Assessment Review*, 84(junio), 106441.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106441>
- Faruk, Omar; Bledzki, Andrzej; Fink, Hans-Peter; Sain, Mohini (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- García, Omar; Pinzón, Magda; Villa, Cristian (2020). Analysis and Modeling of Mechanical and Barrier Properties of Arracacha Starch-Chitosan Composite Biodegradable Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(8), 2253-2262.
<https://doi.org/10.1007/s10924-020-01765-0>
- Gaustad, Gabrielle; Krystofik, Mark; Bustamante, Michele; Badami, Kedar (2018). Resources, Conservation & Recycling Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(junio), 24-33.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.002>
- Geyer, Roland; Jambeck, Jenna; Law, Kara (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 25-29.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gómez, Silvia (13 de octubre de 2018). Colombia, mejor sin plásticos. *El tiempo*.
<https://www.eltiempo.com/opinion/columnistas/silvia-gomez/colombia-mejor-sin-plasticos-silvia-gomez-281060>
- Hamad, Kotiba; Kaseem, Mosab; Ayyoob, Muhammad; Joo, Jinho; Deri, Fawaz (2018). Polylactic acid blends: The future of green, light and tough. *Progress in Polymer Science*, 85, 83-127.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.001>
- Hernández-López, Mónica; Correa-Pacheco, Zormy; Bautista-Baños, Silvia; Zavaleta-Avejar, Leonor; Benítez-Jiménez, José; Sabino-Gutiérrez, Marcos; Ortega-Gudiño, Pedro (2019). Bio-based composite fibers from pine essential oil and PLA/PBAT polymer blend. Morphological, physicochemical, thermal, and mechanical characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 234(enero), 345-353.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.01.034>
- Hong, Haoqung; Xiao, Ruijing; Guo, Quannan; Liu, Hao; Zhang, Haiyan (2019). Quantitatively characterizing the chemical composition of tailored bagasse fiber and its effect on the thermal and mechanical properties of polylactic acid-based composites. *Polymers*, 11(10).
<https://doi.org/10.3390/polym11101567>
- Huerta-Cardoso, Omar; Durazo-Cardenas, Isidro; Longhurst, Phil; Simms, Nigel; Encinas-Oropesa, Adriana (2020). Fabrication of agave tequilana bagasse/PLA composite and preliminary mechanical properties assessment. *Industrial Crops and Products*, 152(mayo), 112523.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112523>
- Jandas, P. J.; Mohanty, Smita; Nayak, Sanjeev (2013). Surface treated banana fiber reinforced poly (lactic acid) nanocomposites for disposable applications. *Journal of Cleaner Production*, 52, 392-401.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.033>

- Kaplan, David (Ed.). (1998). Introduction to Biopolymers from Renewable Resources. *Biopolymers from Renewable Resources* (pp. 1-29). Medford: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-03680-8_1
- Kumar, Kiran; Babu, Suresh; Rao, R. N. (2018). State of the Art on Automotive Lightweight Body-in-White Design. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 20966-20971.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.486>
- Kumar, Navdeep; Das, Dipayan (2017). Fibrous biocomposites from nettle (*Girardinia diversifolia*) and poly (lactic acid) fibers for automotive dashboard panel application. *Composites Part B*, 130, 54-63.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.059>
- Ruiz, Angela (17 de junio de 2017). wasteadvantagemag.com.
<https://wasteadvantagemag.com/contact/>
- Lomelí-Ramírez, María; Satyanarayana, Kestur; Iwakiri, Setsuo; de Muniz, Graciela; Tanobe, Valcineide; Flores-Sahagun, Thais. (2011). Study of the properties of biocomposites. Part I. Cassava starch-green coir fibers from Brazil. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1712-1722.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.07.002>
- Matthews, Chris; Moran, Fintan; Jaiswal, Amit (2020). A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production*, 283, 125263.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125263>
- Mazzanti, Valentina; Pariante, R.; Bonanno, Antonino; Ruiz de Ballesteros, O.; Mollica, Francesco; Filippone, Giovanni (2019a). Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system. *Composites Science and Technology*, 180(mayo), 51-59.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.015>
- Mazzanti, Valentina; Pariante, R.; Bonanno, Antonino; Ruiz de Ballesteros, O.; Mollica, Francesco; Filippone, Giovanni (2019b). Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system. *Composites Science and Technology*, 180(marzo), 51-59.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.015>
- Mazzanti, Valentina; Salzano de Luna, M.; Pariante, R.; Mollica, Francesco; Filippone, Giovanni (2020). Natural fiber-induced degradation in PLA-hemp biocomposites in the molten state. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137(enero), 105990.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105990>
- Mohamed, Salah; El-Sakhawy, Mohamed; El-Sakhawy, Mohamed Abdel-Monem (2020). Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 238(febrero), 116178.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>
- Mohanty, Amar; Vivekanandhan, Singaravelu; Pin, Jean; Misra, Manjusri (2018). Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. *Science*, 362(6414), 536-542.
<https://doi.org/10.1126/science.aat9072>
- Motru, Suneel; Adithyakrishna, V. H.; Bharath, J.; Guruprasad, R. (2020). Development and Evaluation of Mechanical Properties of Biodegradable PLA/Flax Fiber Green Composite Laminates. *Materials Today: Proceedings*, 24(parte 2), 641-649.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.318>
- Netravali, Anil (2019). Advanced green composites: New directions. *Materials Today: Proceedings*, 8(parte 3), 832-838.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.025>

- Nofar, Mohammadreza; Sacligil, Dilara; Carreau, Pierre; Kamal, Musa; Heuzey, Marie (2019). Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 307-360. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.002>
- Ozyhar, T.; Baradel, F.; Zoppe, J. (2020). Effect of functional mineral additive on processability and material properties of wood-fiber reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 132(enero), 105827. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105827>
- Paletta, Angelo; Leal, Walter; Balogun, Abdul; Foschi, Eleonora; Bonoli, Alessandra (2019). Barriers and challenges to plastics valorisation in the context of a circular economy: Case studies from Italy. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118149>
- Pappu, Asokan; Pickering, Kim; Kumar, Vijay (2019). Industrial Crops & Products Manufacturing and characterization of sustainable hybrid composites using sisal and hemp fibres as reinforcement of poly (lactic acid) via injection moulding. *Industrial Crops & Products*, 137(octubre), 260269. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.040>
- Plastics Europe; Conversio Market; Strategy GmbH. (2019). *Plastics, the Facts*, 2019. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- PlasticsEurope; Plastics Europe Market Research Group; Consultic Marketing; Industrieberatung GmbH. (2017). *Plastics, the Facts*, 2017. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- Porras, Alicia; Maranon, Alejandro (2012). Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2782-2788. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.039>
- Quintero, Juan; Falguera, Víctor; Muñoz, Aldemar (2010). Films and edible coatings: importance, and recent trends in fruit. *Revista Tumbaga*, 5(1), 93-118.
- Ramos, Marina; Jiménez, Alfonso; Peltzer, Mercedes; Garrigós, María (2012). Characterization and antimicrobial activity studies of polypropylene films with carvacrol and thymol for active packaging. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 513-519. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.031>
- Rasal, Rahul; Janorkar, Amol; Hirt, Douglas (2010). Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35(3), 338-356. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003>
- Saeidlou, Sajjad; Huneault, Michel; Li, Hongbo; Park, Chul (2012). Poly(lactic acid) crystallization. *Progress in Polymer Science*, 37(12), 1657-1677. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.07.005>
- Sanchez-Olivares, Guadalupe; Sanchez-Solis, Antonio; Calderas, Fausto; Alongi, Jenny (2017). Keratin fibres derived from tannery industry wastes for flame retarded PLA composites. *Polymer Degradation and Stability*, 140, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.04.011>
- Sawpan, Moyeenuddin; Pickering, Kim; Fernyhough, Alan (2011). Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(3), 310-319. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.004>

- Scott, Gerald (2007). *Polymers and the Environment*. Londres: Royal Society of Chemistry.
- Shih, Yeng-Fong; Huang, Chien-Chung (2011). Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF) biodegradable green composites. *Journal of Polymer Research*, 18(6), 2335-2340.
<https://doi.org/10.1007/s10965-011-9646-y>
- Soroudi, Azadeh; Jakubowicz, Ignacy (2013). Recycling of bioplastics , their blends and biocomposites : A review. *European Polymer Journal*, 49(10), 2839-2858.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025>
- Stloukal, Petr; Kalendova, Alena; Mattausch, Hannelore; Laske, Stephan; Holzer, Clemens; Koutny, Marek (2015). The influence of a hydrolysis-inhibiting additive on the degradation and biodegradation of PLA and its nanocomposites. *Polymer Testing*, 41, 124-132.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.10.015>
- Suárez-Eiroa, Brais; Fernández, Emilio; Méndez-Martínez, Gonzalo; Soto-Oñate, David (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of Cleaner Production*, 214, 952-961.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271>
- Sung, Soo; Chang, Yoonjee; Han, Jaejoon (2017). Development of polylactic acid nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals derived from coffee silverskin. *Carbohydrate Polymers*, 169, 495-503.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.037>
- Suwanamornlert, Panitee; Kerddonfag, Noppadon; Sane, Amporn; Chinsirikul, Wannee; Zhou, Weibiao; Chonhenchob, Vanee (2020). Poly(lactic acid)/poly(butylene-succinate-co-adipate) (PLA/PBSA) blend films containing thymol as alternative to synthetic preservatives for active packaging of bread. *Food Packaging and Shelf Life*, 25(junio), 100515.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100515>
- Tawakkal, Intan; Cran, Marlene; Bigger, Stephen (2014). Effect of kenaf fibre loading and thymol concentration on the mechanical and thermal properties of PLA/kenaf/thymol composites. *Industrial Crops and Products*, 61, 74-83.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.032>
- Thompson, Richard; Moore, Charles; vom Saal, Frederick; Swan, Shanna (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153-2166.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- Valerio, Oscar; Muthuraj, Rajendran; Codou, Amadine (2020). ScienceDirect Strategies for polymer to polymer recycling from waste : Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, 100381.
<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100381>
- Vanitha, Rajamani; Kavitha, Chandramohan (2020). Development of natural cellulose fiber and its food packaging application. *Materials Today: Proceedings*, 36(part 4), 903-906.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.029>
- Wang, Guilong; Zhang, Dongmei; Wan, Gengping; Li, Bo; Zhao, Guoqun (2019). Glass fiber reinforced PLA composite with enhanced mechanical properties, thermal behavior, and foaming ability. *Polymer*, 181(octubre).
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121803>

- Wang, Jundong; Tan, Zhi; Peng, Jinping; Qiu, Qiongxuan; Li, Meimin (2016). The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research*, 113, 7-17.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.10.014>
- Wang, Kuo-Hsiung; Wu, Tzong-Ming; Shih, Yeng-Fong; Huang, Chien-Ming (2008). Water bamboo husk reinforced poly(lactic acid) green composites. *Polymer Engineering and Science*, 48(9), 1833-1839.
<https://doi.org/10.1002/pen.21151>
- Wen, Peng; Zhu, Ding-He; Feng, Kun; Liu, Fang-Jun; Lou, Wen-Yong; Li, Ning; Zong, Min-Hua; Wu, Hong (2016). Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for antimicrobial packaging. *Food Chemistry*, 196, 996-1004.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.043>
- Wu, Chin-San (2015). Renewable resource-based green composites of surface-treated spent coffee grounds and polylactide: Characterisation and biodegradability. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 51-59.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.08.011>
- Yu, Tao; Ren, Jie; Li, Shumao; Yuan, Hua; Li, Yan (2010). Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4), 499-505.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.12.006>
- Zhong, Yajie; Godwin, Patrick; Jin, Yongcan; Xiao, Huining (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 27-35.
<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>