

# El ácido poliláctico (PLA): Un material innovador en la actualidad.



AUTOR: JAIME RAMPÉREZ BARRAJÓN

# ÍNDICE

I.	Introducción.....	2
II.	Estado del Arte.....	4
	Los bioplásticos.....	4
	Situación de los bioplásticos en Europa.....	5
	Degradación biológica.....	6
	El ácido poliláctico.....	8
	Síntesis del PLA.....	9
	Propiedades del PLA.....	14
	Biodegradación del PLA.....	17
	Mejora de las propiedades del PLA.....	18
III.	Aplicaciones del ácido poliláctico.....	19
	Posible aplicación en la construcción de claraboyas.....	23
	El metacrilato en la actualidad.....	24
IV.	Conclusiones.....	25
V.	Referencias bibliográficas.....	26

## Introducción

---

Con el objetivo de mejorar la calidad de vida, se están desarrollando continuamente novedosos e interesantes avances en la producción de polímeros. Sin embargo, debido a la explotación de estos materiales, producidos sobre todo para envases, han aparecido problemas graves que afectan a nivel global, la contaminación por plásticos.

Muchos de los polímeros sintéticos empleados, que son derivados del petróleo, requieren de cientos de años para degradarse completamente y por lo tanto permanecen bastante tiempo acumulándose (Ebnesajjad, 2013).

Al principio, los polímeros químicos producidos en la industria del petróleo se vieron favorecidos debido a su bajo costo, facilidad de producción, excelentes propiedades mecánicas y buena capacidad de termosellado.

Su rápida producción tuvo un impacto negativo en los recursos, las economías, el medio ambiente y la seguridad, por ejemplo, (a) el uso de recursos de petróleo y gas ha provocado aumentos en los precios del petróleo y el gas natural; (b) el progreso del calentamiento ambiental global; (c) el uso de materiales no reciclables; y (d) la ocurrencia de contaminación cruzada (Li et al., 2020).

A raíz de esto y desde que se comenzó a intentar resolver el problema contra el cambio climático y la reducción de las reservas de petróleo, se han desarrollado numerosas investigaciones con el fin de desarrollar nuevos polímeros a partir de fuentes naturales renovables, los cuales tienen la ventaja de reducir la dependencia de los recursos fósiles que son limitados y de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los plásticos convencionales.

Destacan principalmente los bioplásticos biodegradables, que son capaces de reducir significativamente el impacto medioambiental (Li et al., 2020)

Sin embargo, debido a los progresos en la síntesis de estos polímeros, se han reducido considerablemente los costes de producción de los plásticos como polietilentereftalato (PET), policloruro de vinilo (PVC), polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) o poliamida (PA).

Entre estos materiales biodegradables, destaca principalmente el **ácido poliláctico** (PLA), un derivado del ácido láctico que presenta unas características similares al PET (Tereftalato de polietileno) y al poliestireno. Presenta un amplio rango de propiedades debido a que existen diferentes grados, con distinto peso molecular, estereoquímica y morfología, variando desde el estado amorfo hasta el estado semicristalino.

Dadas sus características como su buena biodegradabilidad, sus buenas propiedades ópticas y mecánicas y su fácil procesabilidad, se han utilizado en diversos ámbitos, principalmente en el de la industria y en el envasado de alimentos (Serna, L., & Albán, F., 2003) ya que es un material económicamente viable para su uso.

Además, dada la biocompatibilidad del material, durante las últimas décadas en el campo de la biomedicina se ha convertido en el material preferido por la mayoría de los investigadores.

En la actualidad, los bioplásticos sólo representan menos del uno por ciento de los 300 millones de toneladas de plásticos producidos anualmente. Pero a medida que la demanda va aumentando y surgen materiales, aplicaciones y productos más sofisticados, el mercado va creciendo consiguiendo un aumento de un 20 a un 100 por ciento al año (F. Aeschelmann y M. Carus., 2015)

Dado esto, se prevé que en el mercado global la capacidad productiva de PLA aumentará cuatro veces entre el periodo comprendido entre 2014 y 2020. Esto presenta una gran importancia, ya que hay que tenerlo en cuenta para posibles efectos que este crecimiento pueda causar a largo plazo.

A consecuencia de esto, se plantea la posibilidad de reutilizar y reciclar dichos materiales, con el fin de reducir significativamente las cantidades de materia prima necesarias.

# Estado del Arte

---

## Los bioplásticos:

La mayoría de los bioplásticos poliméricos que se generan a partir de fuentes naturales renovables (o de residuos diarios), son a menudo biodegradables y no tóxicos. Éstos pueden ser producidos o bien por sistemas biológicos (microorganismos, plantas y animales), o sintetizados químicamente a partir de materias primas de origen natural (por ejemplo, azúcares, almidón, grasas o aceites naturales, etc.).

Hay tres grupos de bioplásticos, cada uno con sus propias características (European Bioplastics, 2014):

- Plásticos de fuentes renovables y no biodegradables, como el polietileno biológico o biopolietileno (bioPE), el bioPET o los poliuretanos de base biológica (bioPUR).
- Plásticos biodegradables y obtenidos de fuentes renovables, tales como poli(ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), succinato de polibutileno (PBS) y mezclas de almidón.
- Plásticos que se basan en recursos fósiles pero que son biodegradables, tales como la policaprolactona (PCL).

Actualmente, son los **renovables** los que mayor protagonismo tienen en la industria y los que mayor crecimiento van a registrar en los próximos años. Gracias a la procedencia de las materias primas utilizadas en su fabricación, estos materiales permiten a la industria reducir su dependencia de las fuentes fósiles. Por su parte, los **biodegradables** suponen una gran ventaja en la gestión de residuos, ya que pueden ser gestionados junto con el resto de materia orgánica en plantas de compostaje.

La industria de los bioplásticos ha presentado numerosas soluciones técnicas y materiales innovadoras. Muchos plásticos de base biológica ofrecen nuevas propiedades para un rendimiento mejorado, incluyendo mayor transpirabilidad, mayor resistencia del material, espesor reducido y propiedades ópticas mejoradas. Materiales nuevos e innovadores como PLA, PHA o PBS ofrecen soluciones adicionales al final de la vida al ser compostables. Otros materiales nuevos, como el furanoato de polietileno al 100 % (PEF), presentan mejores propiedades de barrera que los polímeros establecidos y pueden reciclarse mecánicamente fácilmente (Ebnesajjad, 2013).

La producción mundial de bioplásticos representa tan solo un 1% de los plásticos que cada día se ponen en el mercado. Pero las previsiones de crecimiento son muy alentadoras para esta industria, ya que se prevé que el mercado mundial de bioplásticos crezca aproximadamente un 25% en los próximos cinco años. Esta tendencia es posible gracias a la creciente demanda de productos sostenibles tanto por parte de los consumidores como de las marcas, a un mayor apoyo político a la bioeconomía y a los continuos esfuerzos de la industria de los bioplásticos para desarrollar materiales

innovadores con mejores propiedades y nuevas funcionalidades (Canales Sectoriales, 2019).

La capacidad de producción mundial de bioplásticos aumentará de unos 2,1 millones de toneladas en 2018 a 2,6 millones de toneladas en 2023 (Canales Sectoriales, 2019).

Los envases siguen siendo el mayor campo de aplicación de los bioplásticos, con casi el 65% (1,2 millones de toneladas) del mercado total de bioplásticos en 2018. Los datos también confirman que los materiales bioplásticos ya se están utilizando en muchos otros sectores, incluidos los textiles, construcción, los bienes de consumo y las aplicaciones en el sector de la automoción y el transporte, así como en el sector de la agricultura y la horticultura.

Asia sigue siendo un importante centro de producción, donde se produce actualmente más del 50% de los bioplásticos. En la actualidad, sólo una quinta parte de la capacidad de producción se encuentra en Europa. Se prevé que esta proporción aumente hasta el 27% en 2023.

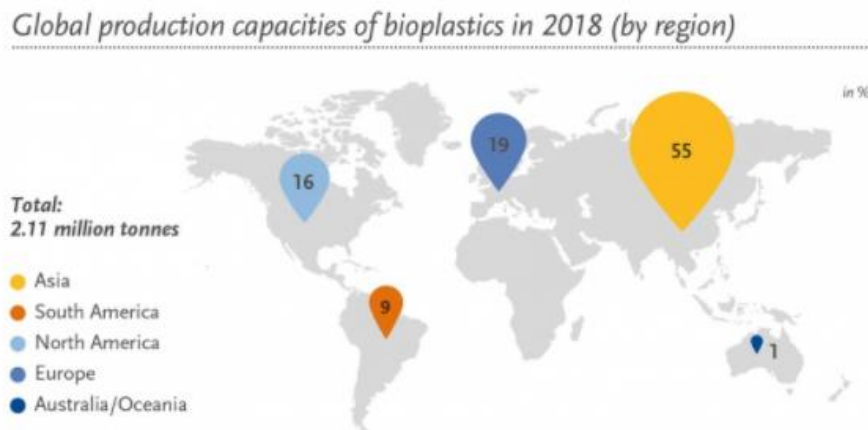


Figura 1: Capacidad de producción de bioplástico por zonas geográficas. (Canales Sectoriales, 2019).

- **Situación de los bioplásticos en Europa:**

La industria de los bioplásticos es un sector joven e innovador con un enorme potencial económico y ecológico para una economía baja en carbono, y que utilice los recursos de manera sostenible. La UE ha empezado a reconocer los numerosos beneficios de la economía basada en la bioenergía y está asignando fondos y recursos a la investigación y el desarrollo en este sector (L. Shen et al., 2009).

Se prevé que el mercado global de bioplásticos crecerá continuamente durante los próximos años. Según los últimos datos de mercado recopilados por European Bioplastics en colaboración con el nova-Institute (European Bioplastics, 2014), se prevé que las capacidades mundiales de producción de bioplásticos crecerán de alrededor de 4,16 millones de toneladas en 2016 a aproximadamente 6,11 millones de toneladas en 2021.

Los plásticos biobasados, no biodegradables, como el PE y los poliuretanos están a la cabeza, mientras que el PLA será el conductor principal del crecimiento en el campo de los plásticos biobasados y biodegradables.

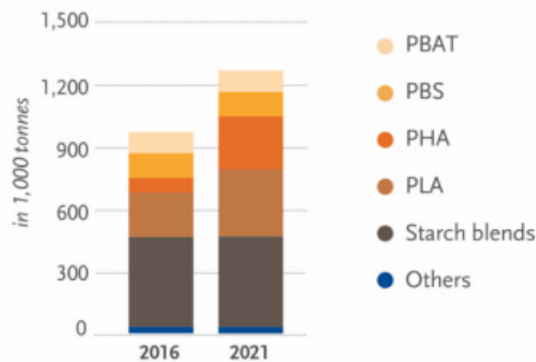


Figura 2: Producción de bioplásticos biodegradables (2016 vs. 2021) (European Bioplastics, 2014)

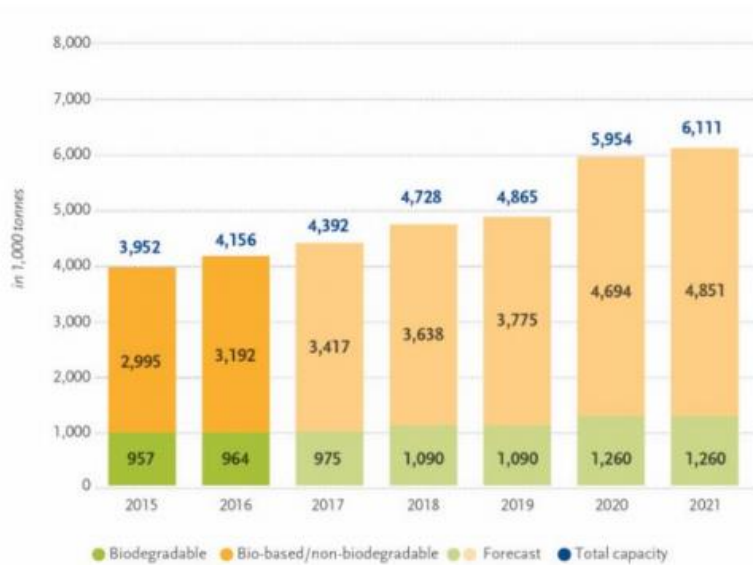


Figura 3: Capacidad de producción internacional. (European Bioplastics, 2014)

- Degradación biológica

La velocidad de la biodegradación de los bioplásticos es algo muy dependiente de las condiciones del medio ambiente, por ejemplo, destacan factores como la temperatura (50-70 °C), la humedad, el número y tipo de microorganismos.

El proceso de compostaje de los bioplásticos para dar biomasa, agua y CO<sub>2</sub> tiene una duración de aproximadamente 6 -12 semanas (V. Siracusaa et al., 2008).

Los bioplásticos deben biodegradarse de forma controlada. Algunos polímeros naturales (caucho, lignina) y algunos polímeros sintéticos como las poliolefinas son degradados biológicamente siguiendo un mecanismo de oxobiodegradación y que tarda en producir la suficiente mineralización necesaria para la biodegradación estándar. Además, a temperatura ambiente, la oxobiodegradación es un proceso más lento que la hidrobiodegradación. Scott et al. explicaron que, durante la oxodegradación, las

moléculas de alcoholes, aldehídos y cetonas biodegradables con baja masa molar se producen por peroxidación, iniciada por el calor o la luz, que son la causa principal de la pérdida de propiedades mecánicas de polímeros provenientes de hidrocarburos.

Además, para el proceso de degradación, son necesarias bacterias, hongos y enzimas que inician la bioasimilación dando lugar a la biomasa y el CO<sub>2</sub> y que finalmente forman el humus. Generalmente, los polímeros sintéticos contienen antioxidantes y estabilizantes añadidos para proteger el polímero contra la oxidación durante la operación de procesamiento y proporcionar la vida útil requerida. Aunque es necesario añadir antioxidante para mejorar el rendimiento de estos materiales, para el proceso de biodegradación es mejor no añadir estas moléculas durante el procesamiento del polímero.

El beneficio que se obtiene de esta descomposición biológica es que se generan productos como el dióxido de carbono (beneficioso y perjudicial para el medio ambiente), agua y otros biomateriales que sirven como abono orgánico para el suelo.

Además, también se consigue reducir los tiempos de degradación de los bioplásticos con respecto a los convencionales que pueden llegar a tardar 100-1000 años.



Figura 4: ensayo de biodegradación de un envase (ErcrosBio® LL650 blanco) por compostaje industrial basado en la norma EN 13432.

La norma EN 13432 requiere que el 90% del envase se degrade antes de 9 semanas, transformándose en CO<sub>2</sub>, agua y compost (Ercros, 2014).



## El ácido poliláctico:

El ácido poliláctico, es un poliéster alifático termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico (químicamente, ácido 2-hidroxiopropanoico, LA). El PLA presenta una rigidez similar al polietileno (PS), o el poli tereftalato de etilo (PET) (Auras et al., 2011).

Normalmente deriva de recursos renovables que son fácilmente biodegradables como por ejemplo productos como el almidón de maíz, tapioca, remolacha azucarera o caña de azúcar, almidones de arroz, trigo y patata. Dado esto, puede ser degradado en dióxido de carbono y agua por la acción de hongos adecuados (Ren et al., 2011).

Hoy en día, el ácido láctico se utiliza como monómero para la producción de PLA que tiene amplia aplicación como plástico biodegradable. Este tipo de plástico es una buena opción para la sustitución de plástico convencional producido a partir de aceite de petróleo debido a la baja emisión de dióxido de carbono que contribuye al calentamiento global (Ren et al., 2011) y sin necesidad de rediseñar productos o ejecutar grandes inversiones en nuevos equipos de proceso (Galactic Laboratories, 2000).

Teniendo en cuenta esto, el consumo de PLA en 2007 fue de alrededor de 60 mil toneladas y, hasta el momento, sólo el 30% del ácido láctico producido se utiliza para fabricar PLA. El productor más importante es sin dudas el de NatureWorks (Nebraska, EEUU) con una capacidad de 140 mil ton/año y precios de venta (por kilogramo) entre los € 2,5 y los € 5,5 (Textos científicos, 2009).

El PLA es un polímero versátil, reciclable y compostable (al menos alguno de sus grados), con alta transparencia, alto peso molecular y fácilmente procesable.

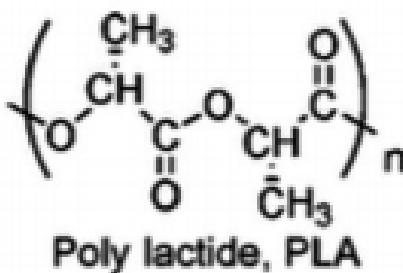


Figura 5: Fórmula química de PLA (R. Auras et al., 2004)

Su estructura presenta un carbono asimétrico, por lo que existen dos estereoisómeros D y L, siendo el L el que se obtiene de forma natural. Dependiendo de la relación de los enantiómeros L y D, las propiedades de PLA pueden variar considerablemente obteniéndose muy variados pesos moleculares y estructuras desde semicristalinas hasta amorfas. En general, el PLA comercial es un copolímero entre poli(ácido L-láctico) y poli(ácido D-láctico) con mayor contenido en el primero (R. Auras et al., 2010).

Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango

inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino; propiedades que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D(-) y L(+), los pesos moleculares y la copolimerización.

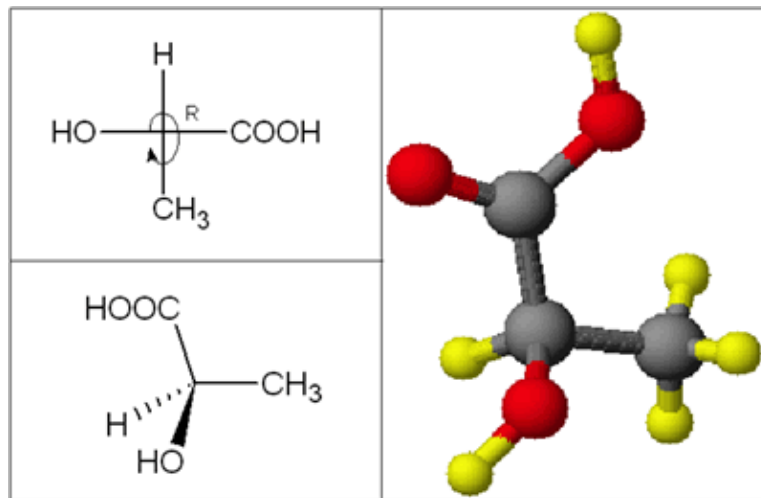


Figura 6: El ácido láctico con sus isómeros D (-) y L (+).

PLA puede ser producido mediante polimerización por condensación directamente de su ácido láctico básico, que es derivado de la fermentación anaeróbica de los azúcares de las fuentes de carbohidratos tales como maíz, caña de azúcar, o de tapioca (Auras et al., 2011).

El ácido láctico obtenido de la fermentación es ópticamente activo, por lo que la producción específica de los isótopos L (+) o D (-) puede determinarse utilizando un lactobacilo apropiado.

- Síntesis del PLA.

El ácido poliláctico, se produce mediante polimerización del ácido láctico el cual se puede obtener mediante la fermentación anaeróbica de carbohidratos o por síntesis química. El ácido láctico, desempeña un papel vital en el ciclo de la energía glucolítica en los organismos, además de ser una sustancia importante para mantener el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos (Varadarajan et al., 1999).

La obtención de PLA ocurre generalmente en dos etapas consecutivas: la primera la síntesis del ácido láctico y la segunda la polimerización.

El ácido láctico comercial se deriva principalmente de la fermentación de azúcares por bacterias (Yao K. y Tang C., 2013), por lo tanto, el primer paso para la fermentación de carbohidratos es la extracción del azúcar (glucosa, lactosa y maltosa) o almidones producidos por el maíz, remolacha azucarera y las patatas mediante un proceso de molienda.

En el caso de obtener almidón, este se convierte en azúcar mediante hidrólisis enzimática o ácida y una vez obtenida la solución azucarada, se fermenta mediante microorganismos o bacterias. El microorganismo más utilizado a nivel industrial para llevar a cabo esta tarea es *Lactobacillus delbrueckii* (Serna et al., 2003) que tiene la ventaja de consumir eficientemente glucosa y ser termófilo con temperatura óptima de crecimiento en el rango de 45 a 62°C, lo que reduce costos de enfriamiento y esterilización, así como riesgos de contaminación microbiológica en el fermentador (Textos científicos, 2009). Estas bacterias, se clasifican como homofermentativas y las condiciones generales de procesamiento incluyen un PH de 5,4-6,4 y una concentración baja de oxígeno.

En el método de obtención comercial, al sustrato (bacterias) se le adiciona una fuente de vitaminas y de cofactores, se utiliza una mezcla de 10 a 15 % de glucosa, 10% CaCO<sub>3</sub>, cantidades menores de fosfato de amonio y extracto de levadura. El medio se inocula y se agita sin aireación para optimizar la neutralización del ácido formado.

La fermentación dura entre 2 a 4 días a un PH bajo (alrededor de 5) con una temperatura de operación próxima a los 40° y se termina cuando todo el azúcar es consumido, con el fin de facilitar la purificación. Al final de la fermentación el medio es ajustado a PH 10 y calentado para solubilizar el lactato de calcio y coagular proteínas presentes. Posteriormente el medio se filtra para eliminar sustancias insolubles, así como biomasa. Después de concentrar por evaporación, el ácido libre se obtiene por adición de ácido sulfúrico seguido de filtración para remover el sulfato de calcio formado (Textos científicos, 2009).

La conversión alcanza en general valores por encima del 95% en sustrato de carbohidratos. La fermentación puede realizarse tanto en procesos batch como continuos. El ácido láctico debe separarse del cultivo fermentable y purificarse antes de la polimerización en la mayoría de los casos. Los procesos de purificación más comunes involucran neutralización con bases seguido por filtración, concentración y acidificación.

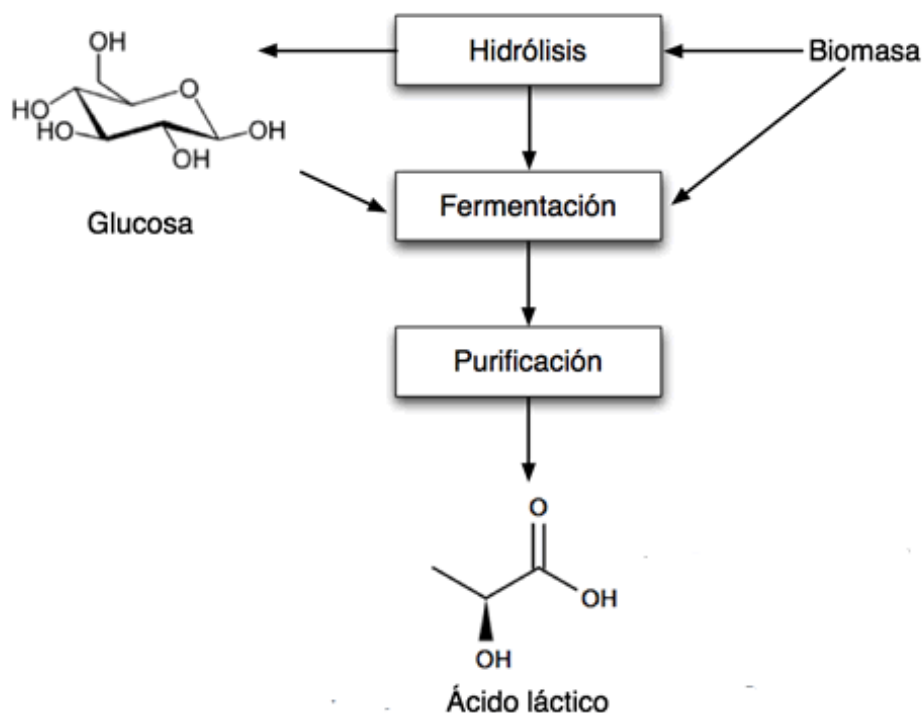


Figura 7: Obtención de Ácido Láctico mediante la vía fermentativa anaerobia.

Por otro lado, el ácido láctico producido mediante síntesis química se obtiene a partir de la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico (HCN) para dar lactonitrilo, el cual puede ser hidrolizado a ácido láctico.

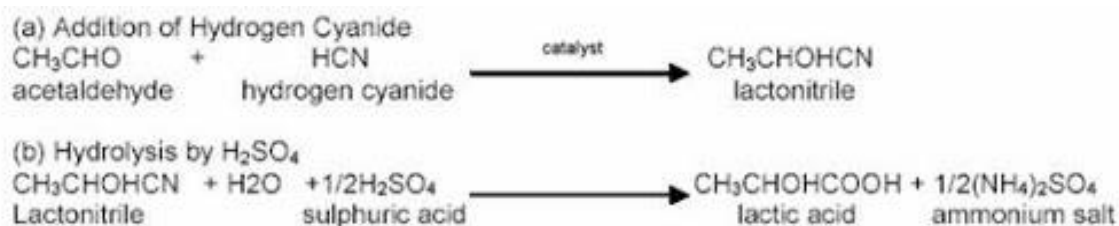


Figura 8: Síntesis química del ácido láctico.

Otro tipo de reacción se basa en la reacción a alta presión de acetaldehído con monóxido de carbono y agua en presencia de ácido sulfúrico como catalizador. En este caso, el producto es una mezcla racémica, que tiene propiedades amorfas con posibles aplicaciones como adhesivos biodegradables.

En el método del ácido propiónico, se emplea ácido propiónico como materia prima y se obtiene ácido láctico crudo mediante cloración e hidrólisis; luego, el producto se obtiene mediante esterificación, rectificación e hidrólisis. Solo unos pocos fabricantes utilizan este método debido a las costosas materias primas (Athanasίου et al., 1996).

Aunque los métodos químicos pueden lograr una producción continua a gran escala de LA, la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) ha aprobado el producto resultante y establece que las materias primas son generalmente tóxicas (Li et al., 2020).

Teniendo en cuenta esto, la producción por fermentación de carbohidratos ha sido hasta ahora el método más exitoso debido a la demanda del mercado de ácido láctico para envasado (R. Auras et al., 2010).

Una vez obtenido el ácido láctico, el siguiente paso para obtener el PLA es llevar a cabo la polimerización de estos monómeros.

Existen tres métodos de polimerización para la obtención de PLA de alto peso molecular (R. Auras et al., 2010):

- a) polimerización directa de condensación
- b) condensación deshidratante azeotrópica
- c) polimerización a través de la formación de lactida.

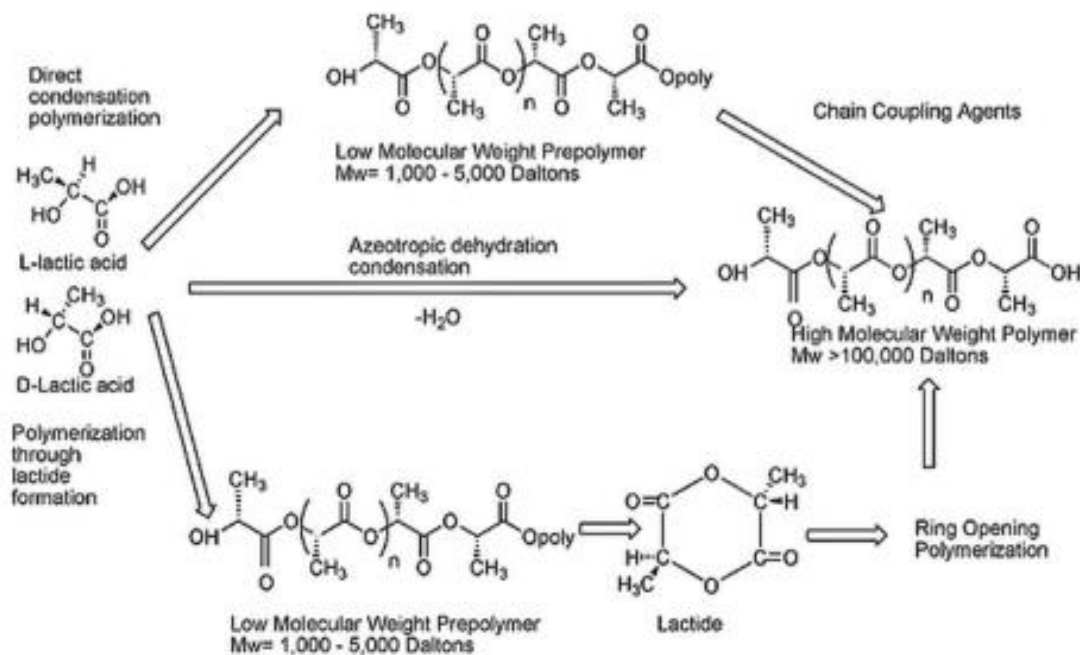


Figura 9: Métodos de polimerización para obtener PLA (R. Auras et al., 2004).

**a) polimerización directa de condensación:** el ácido láctico es polimerizado mediante condensación debido a la presencia de grupos hidroxilo y carbonilo. Aunque es la vía más sencilla y económica, no tiene aplicación industrial ya que el PLA obtenido es de bajo peso molecular. Este es un polímero vítreo quebradizo por lo que es necesario el uso de agentes de acoplamiento de cadena para

aumentar el peso molecular, lo que incrementa su coste y la complejidad del proceso.

**b) condensación deshidratante azeotrópica:** Mediante esta vía, se obtiene PLA de alto peso molecular sin la necesidad de emplear agentes de acoplamiento. Para ello, se emplean grandes cantidades de catalizador para aumentar la velocidad de reacción. Los residuos del catalizador, pueden ser un inconveniente ya que pueden causar problemas posteriores, como por ejemplo: la degradación no deseada, velocidades incontroladas o incluso toxicidad que hace que no se pueda emplear para aplicaciones médicas.

Para evitar estos problemas, se puede desactivar el catalizador mediante la adición de ácidos o por precipitación y filtración.

**c) polimerización a través de la formación de lactida:** Podría decirse que es la vía que más se utiliza actualmente para producir PLA comercial de alto peso molecular.

Este método, consiste en la despolimerización catalítica de PLA de bajo peso molecular intermedio en condiciones de baja presión en una mezcla de L-lactida, D-lactida y meso-lactida. El porcentaje de estereoisómeros de lactida formados depende del estereoisómero de ácido láctico obtenido en la fermentación de dextrosa, la temperatura y el catalizador.

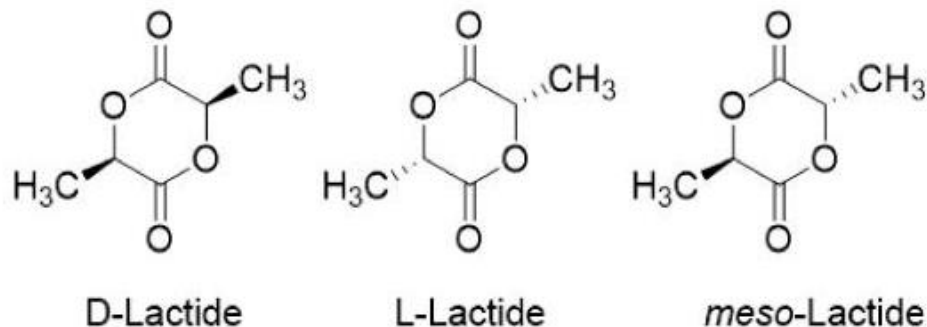


Figura 10: Estereoisómeros de lactida (Li et al., 2020).

Posteriormente, se obtiene PLA de alto peso molecular mediante la apertura del anillo de la lactida (ROP) por dos vías: de forma catiónica, si se inicia la polimerización bien con ácido trifluorometanosulfónico (ácido tríflico) o con triflato de metilo; o de forma aniónica, si se inicia con bases como el benzoato de potasio.

Los catalizadores comúnmente utilizados para la polimerización de lactida son sales metálicas de aluminio y estaño. La diferencia entre ambos reside en que los catalizadores basados en estaño son mejores catalizadores de transesterificación, más estables hidrolíticamente y más fáciles de usar en el proceso de polimerización. El proceso no genera agua y, por lo tanto, se puede lograr una amplia gama de pesos moleculares mediante el procedimiento.

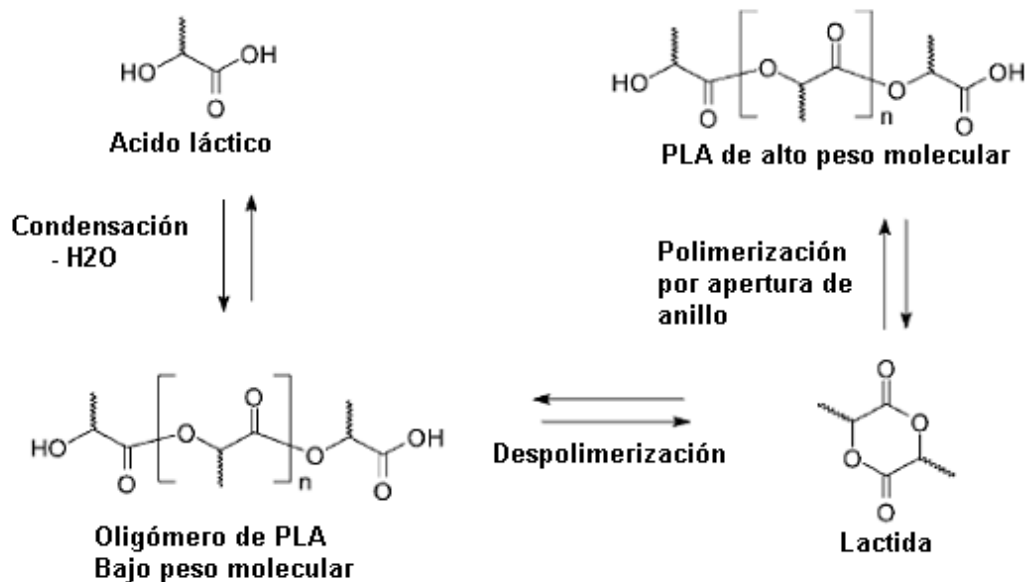


Figura 11: Reacción de polimerización de PLA mediante apertura de anillo (ROP) (Mariano, 2011).

El monómero sin reaccionar tiene que ser eliminado por lavado con etanol después del proceso de polimerización debido a que el monómero puede actuar como plastificante y, disminuir la resistencia mecánica, la estabilidad térmica del PLA y su vida útil. Durante el procesamiento, la presencia de monómeros residuales puede causar varios problemas como cambios en la viscosidad y en las propiedades reológicas.

- **Propiedades del PLA:**

El ácido poliláctico presenta muy buenas perspectivas de mercado y un valor comercial excelente, con una gama de aplicaciones que van desde un uso industrial hasta el civil. El interés de producir en masa dicho producto, se debe en parte a sus buenas propiedades. Posee buenas características en cuanto a brillo, transparencia, tacto, resistencia al calor (puede soportar temperaturas de 110°C) y un alto módulo de elasticidad y alta dureza.

Tiene suficiente estabilidad térmica para retardar la degradación (que depende del tiempo, la temperatura, las impurezas de bajo peso molecular y la concentración de catalizador) (Abdel-Rahman et al., 2013) y mantener el peso molecular y el rendimiento. A temperaturas superiores a 200 ° C, el ácido poliláctico sufre hidrólisis,

recombinación de lactida, escisión oxidativa de la cadena principal y transesterificación intermolecular o intramolecular.

Tanto las propiedades ópticas como las mecánicas del PLA van a depender de la relación y distribución de los isómeros, la temperatura de procesado, el tiempo de recocido y del peso molecular del polímero (R. Auras et al., 2010).

Entre los diferentes polímeros de PLA, se hallan los ópticamente puros, poli(ácido L-láctico) (PLLA) y poli(ácido D-láctico) (PDLA) (R. Auras et al., 2010).

La temperatura de procesamiento ( $T_g$ ) está entre 60 y 125°C, incluso puede ser igual o superior a 185-190 °C, depende de la proporción de D o L ácido láctico en el polímero.

A estas temperaturas, se producen descomposiciones y rupturas de cadena que producen descenso de peso molecular promedio.

La cristalinidad también es importante, puede ajustarse desde un valor de 0% a 40% en forma de homopolímeros lineales o ramificados, y como copolímeros al azar o de bloque. El grado de cristalinidad afecta a la degradación del PLA de tal manera que los polímeros altamente cristalinos duran varios meses, y el metabolismo solo tiene lugar después de unos pocos años, mientras que los polímeros con baja cristalinidad pueden descomponerse en unas pocas semanas (Li et al., 2020).

El PLLA puede tener una cristalinidad de alrededor del 37 %, tiene una temperatura de transición vítrea entre 60- 65 °C, una temperatura de fusión entre 173-178 °C y un módulo de elasticidad entre 2,7 a 16 GPa.

De la mezcla de ambos isómeros (PLLA Y PDLA) se obtiene el poli(ácido DL-láctico) (PDLLA), un material amorfo con una temperatura de transición vítrea de 50-57 °C, y muestra una resistencia a la tracción mucho menor.

El PDLLA puede ser usado para disminuir el punto de fusión y conseguir así mejorar la procesabilidad de PLA. Desgraciadamente, la disminución del punto de fusión se acompaña de una disminución significativa de la cristalinidad y la velocidad de cristalización.

El PLA además, presenta buenas propiedades físicas y puede usarse para producir diversos productos plásticos, como loncheras de comida rápida y telas para uso industrial y civil (Inkinen et al., 2011).

La buena resistencia a la tracción y la ductilidad lo hacen adecuado para diferentes medios de procesamiento, como moldeo por extrusión por fusión, moldeo por inyección, moldeo por película soplada, moldeo por espuma y moldeo al vacío.



<i>Propiedades Mecánicas generales de PLA</i>	
<b>Modulo Elástico</b>	3000 - 4000 MPa
<b>Resistencia a la Tracción</b>	50 - 70 MPa
<b>Alargamiento a la Rotura</b>	2 - 5 %
<b>Resistencia a la Flexión</b>	100 MPa
<b>Módulo de Flexión</b>	4000 - 5000 MPa
<b>Temperatura de transición vítrea Tg</b>	60 - 70 °C

Figura 12: Propiedades mecánicas y físicas del PLA (Auras et al., 2011).

Sus propiedades mecánicas son buenas en comparación con otros biopolímeros, pero presentan, sin embargo, baja resistencia al impacto (aumenta al aumentar la cristalinidad y el peso molecular). Puede presentar en algunos grados dureza, rigidez, resistencia al impacto y elasticidad similares a las del PET, pero es más hidrofílico y tiene una densidad más baja.

El PLA puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno, rígido como el poliestireno o flexible como un elastómero. Las resinas de PLA pueden ser sometidas a esterilización con rayos gama y es estable cuando se expone a los rayos ultravioleta. Al PLA se le atribuyen también propiedades de interés como la suavidad, resistencia al rayado y al desgaste. Además, se puede procesar, como la mayoría de los termoplásticos, en fibra (por ejemplo, usando el proceso convencional de hilatura por fusión) y en película.

En definitiva, El PLA se puede formular para ser tanto rígido como flexible y copolimerizarse con otros materiales.

Su buena biocompatibilidad lo ha llevado a ser ampliamente utilizado en el campo de la medicina bioquímica. El PLA de alto peso molecular se ha utilizado para producir suturas quirúrgicas que no se desmontan y el de bajo peso molecular como agente de envasado de fármacos de liberación lenta (Vasir et al., 2007).

En general, el PLA es soluble en dioxanos, acetonitrilo, cloroformo, cloruro de metileno, 1,1,2 tricloroetano y ácido dicloroacético (depende de su grado de cristalinidad). El PLA presenta unas propiedades de barrera aceptables respecto al oxígeno, al agua y al dióxido de carbono, aunque a veces se consideran insuficientes para algunos envases de alimentos. Los coeficientes de permeabilidad para el dióxido de carbono se encuentran entre los del poliestireno y el PET.

## Biodegradación de PLA

Una de las propiedades que ha creado un gran interés en el PLA es su capacidad de biodegradarse bajo condiciones adecuadas a diferencia del resto de los polímeros. Lo que le confiere una gran ventaja desde el punto de vista ecológico. Además, es un polímero obtenido de recursos renovables.

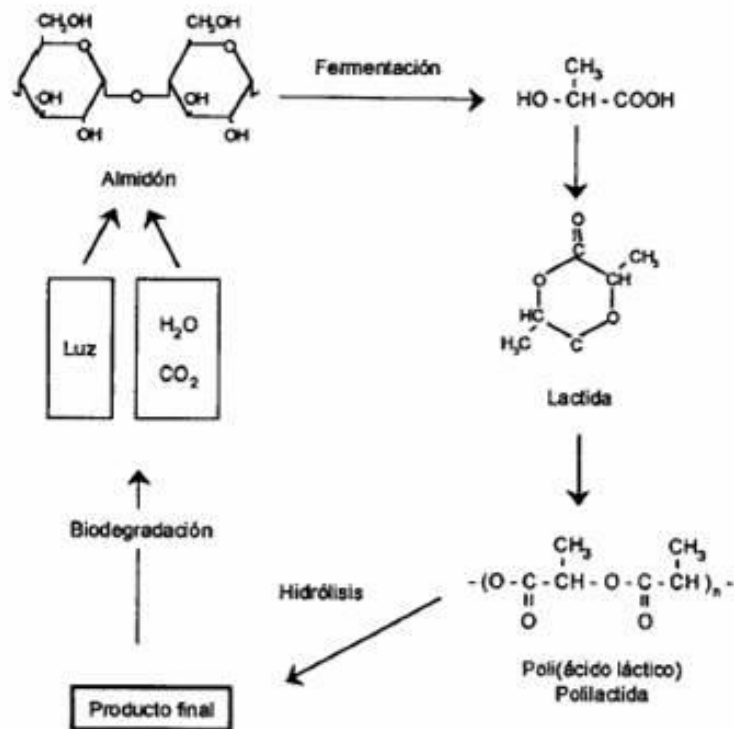


Figura 13: Síntesis y biodegradación del PLA. (Mariano, 2011)

El hecho de que durante la fase biológica el PLA lance dióxido de carbono y metano se ha cuestionado ya que son sustancias que participan en el efecto invernadero. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el balance neto en dióxido de carbono es nulo ya que el CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera es aquel que fue absorbido durante la fotosíntesis de la planta.

También ha sido criticado por el hecho de necesitar combustibles fósiles para producir el PLA. Estos combustibles no se emplean en el polímero en sí mismo, sino que son necesarios para los procesos de cosecha y recogida de la planta, así como en su producción química.

De hecho, los productores de ácido poliláctico han reconocido que se emplean los combustibles fósiles para producir el plástico, pero manifiestan que durante su fabricación se requiere entre 20 y 50% menos de recursos fósiles que aquellos que aquellos plásticos que provienen del petróleo (Mariano, 2011).

Además, los recursos fósiles que suelen emplear son los que se encuentran en una mayor cantidad como son el carbón y el gas natural y se están realizando investigaciones para poder hacer uso de la biomasa.

Por otra parte, hay que resaltar que la tecnología empleada para la fabricación de PLA es muy reciente, solamente han pasado 10 años frente a los casi 100 de existencia de la petroquímica del plástico, durante los cuales ha ido mejorando.

Otro de los inconvenientes del PLA puede ser el hecho de que al crecer su consumo se deberá generar mayor cantidad de sembradíos para satisfacer la demanda de materia prima para su obtención, lo que elevaría el desmonte de los suelos para ser sembrados.

### **Mejora de las propiedades de PLA.**

A pesar de que el ácido poliláctico tenga una buena biocompatibilidad y capacidad de estiramiento, las propiedades de este polímero aparentemente prometedor no son perfectas y aún deben mejorarse (Zalusky et al., 2002).

Por ejemplo, el PLA es extremadamente hidrófobo lo que hace que se convierta en inadecuado para la administración de fármacos, y su baja tenacidad al impacto hace que tenga ciertas desventajas como material para implantes en el campo del trasplante óseo en un entorno de alta resistencia mecánica (Agrawal y Athanasiou, 1997).

Sin embargo, existen varios métodos para mejorar de manera eficaz las deficiencias anteriores del PLA y hacerlo más adecuado para su aplicación en diversos campos.

Estas propiedades, se pueden mejorar añadiendo aditivos modificados durante su síntesis o mezclándolo directamente con otros polímeros como por ejemplo el ácido poliglicólico que su adición puede conducir a un polímero amorfo con una Tg más baja.

El efecto de mezcla es asombroso ya que se observan propiedades físicas y mecánicas superiores a las del polímero original (Maiti et al., 2002).

Los copolímeros con baja Tg y flexibilidad obtenidos pueden ser más adecuados para su uso en dispositivos médicos implantables y sistemas de administración de fármacos (Vaz, 2005; Luckachan et al., 2011).

Por lo tanto, se está prestando cada vez más atención a mejorar el comportamiento a baja temperatura y la maleabilidad del ácido poliláctico.

La biocompatibilidad del PLA también puede verse modificada mediante el método de mezcla, empleando almidón (Nampoothiri et al., 2010). Esto presenta una ventaja y es que es un método de bajo costo y simple con respecto a sintetizar copolímeros que también cambian las propiedades mecánicas.

Por un lado, este método presenta una ventaja y es que la absorción del agua se ve mejorada, pero por otro lado presenta una desventaja y es que la acumulación de

almidón conduce a una reducción de la resistencia a la tracción y al alargamiento, es decir aumenta la fragilidad del material.

Esta deficiencia se puede compensar agregando plastificantes como el poliéter, ácido cítrico de bajo peso molecular, el ácido succínico, el ácido tartárico y el oxalato que se mezclan con PLA para cambiar sus propiedades mecánicas y termodinámicas hasta desarrollar un buen polímero hidrófilo, no tóxico, biodegradable, biocompatible y flexible. (Li et al., 2020).

Según Li et al. (2020) se ha observado que la adición de estos plastificantes consigue reducir la Tg del PLA en 26°C.

## Aplicaciones del ácido poliláctico

---

Debido a las ventajas que presenta el PLA por sus buenas propiedades y la facilidad de su procesamiento, ha demostrado ser un material prometedor y por ello tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en la industria como en productos básicos que se mencionarán más adelante.

Inicialmente, el PLA comenzó a usarse como hilo para suturas reabsorbibles y a medida que se incrementó su demanda se desarrollaron nuevas utilidades incluidas las primeras prótesis médicas.

Como resultado de los numerosos estudios y avances en la síntesis del PLA, el precio de fabricación y la sencillez del proceso han impulsado el comercio de PLA para otras aplicaciones, tales como agricultura, ingeniería, productos compostables y materiales de embalaje (Ebnesajjad, 2013). A medida que el precio del PLA caiga y las nuevas instalaciones produzcan mayores volúmenes de PLA, se buscarán nuevas aplicaciones.

Las utilidades más destacadas del PLA son las siguientes:

1. *Materiales de embalajes:* Los envases y empaques para alimentos y bebidas constituyen la aplicación más prometedora ya que mediante diversos estudios económicos se ha llegado a demostrar que el PLA es un material económicamente viable para utilizar como un envase de polímero. Además, debido al alto consumo de productos precocinados ayuda en gran medida a mitigar el impacto medio ambiental, ya que se trata de un material biodegradable.

Incluso se ha llegado a demostrar que el empaquetado con PLA puede llegar a ahorrar un 30% con respecto al PET (Mariano, 2011).

Existen 4 tipos de ácidos polilácticos en la industria del empaquetado y cada uno de ellos con características especiales (Zuluaga, 2013):

- **4041D:** gran estabilidad hasta los 265°F (130°C)
- **4031D:** también se utiliza a gran temperatura hasta 130°C
- **1100D:** se utiliza para hacer tazones, las cajas de las patatas fritas, empaquetado de congelado vegetal.
- **2000D:** se utiliza en envases transparentes de alimentos, para fabricar tazas, envases de leche.

El PLA principalmente es utilizado como embalaje polimérico para productos de vida útil corta con aplicaciones comunes tales como botellas de agua, contenedores (se consigue termoformando al PLA) de frutas y hortalizas, tazas desechables de helado y ensalada, láminas de envolturas de alimentos y envases en blíster (pastillas).



Figura 14: ejemplos de envases y embalajes fabricados con PLA (Mariano, 2011).

2. **En fibras:** El PLA al ser tan humectante como el algodón, se ha visto como un sustituto de fibras sintéticas, por ello, la aplicación en la fabricación de prendas de vestir tales como camisas, vestidos, ropa interior etc... (Ren, 2011).  
También se han elaborado trapos y toldos y cubiertas resistentes a la luz UV.



Figura 15: Ropa desechable para intervenciones quirúrgicas (Mariano, 2011).

El hecho de emplear el PLA en la industria textil presenta una serie de ventajas (Ren, 2011):

- Bajo peso específico comparado con otras fibras naturales, lo que implica productos más ligeros.
- Una tenacidad más alta o lo que es lo mismo una fuerza extensible mayor que las fibras naturales.
- Resistencia UV excepcional comparado con otras fibras.
- Índice de refracción bajo, lo cual genera intensos colores una vez teñidas las fibras de PLA.
- Comparado con el PET y otros sintéticos, las fibras de PLA presentan bajo poder calorífico por lo que generan menor cantidad de humos al quemarse y una extensión más rápida de la humedad.
- Recuperación de la humedad perceptiblemente más baja con ello se hace un hueco en los tejidos de secado rápido.

Sin embargo, también existen puntos débiles (Ren, 2011):

- Baja resistencia a compuestos alcalinos, causando pérdida de fuerza en los convencionales procesos de dispersión por teñido.
- Resisten temperaturas de planchado bajas puesto que presenta una temperatura cristalinidad baja.

3. En la Industria Médica y Farmacéutica: El PLA ha llegado a tal punto que se ha convertido en un material indispensable en la industria médica y farmacéutica, donde es utilizado desde hace 25 años. Al ser un material, aparte de biodegradable, bioabsorbible, este puede ser asimilado fácilmente por el organismo, por lo tanto, sus características y absorbibilidad han permitido desarrollar novedosas aplicaciones en cirugía, ortopedia, ortodoncia, oftalmología, traumatología, para suturas (cirugía del ojo, cirugía del pecho y abdomen) y como soporte para el suministro controlado de numerosos



## Posible aplicación en la construcción de claraboyas:

Tras la visita realizada a la empresa Plásticos y Claraboyas Matilla. SL (Almería), el problema que planteaba la empresa es que se genera una gran cantidad de residuos de metacrilato, material con el que actualmente se fabrican las claraboyas.



Figura 18: Residuos de metacrilato acumulados por la empresa (Plásticos y Claraboyas SL).

Dicho material llega a acumularse en los contenedores de la fábrica rápidamente, además de que ocupa bastante espacio. Se han intentado buscar varias soluciones frente a este problema y uno de los propuestos por la empresa consistía en la instalación de un sistema de molienda.

Dicho sistema trituraba el metacrilato hasta convertirlo en gránulos minúsculos. Con este sistema, se conseguía que los fragmentos de metacrilato ocupasen un menor volumen dentro del contenedor, que los contenedores no se llenasen tan rápido, y que su transporte para deshacerse del mismo resultara más fácil. Sin embargo, el sistema no era del todo óptimo ya que el tiempo empleado para triturar cada resto de metacrilato resultaba excesivo para la empresa.

Como alternativa, se plantea evaluar la idea de cambiar el metacrilato por un material que fuera biodegradable, en este caso el ácido poliláctico, ya que de esta manera la eliminación de los residuos se lleva a cabo más fácilmente.



## El metacrilato en la actualidad:

A raíz de la situación provocada por la crisis sanitaria del *COVID-19*, se ha disparado la fabricación de mamparas y cascos protectores entre otros elementos para diferentes ámbitos de carácter público, como, por ejemplo: supermercados, tiendas, empresas, bancos...

Para evitar el agotamiento excesivo de este material debido a su alta demanda sobre todo en estos últimos años, se han impuesto unos porcentajes mínimos de metacrilato que han de ser reciclados. El 15%.

Sin embargo, ya se ha desarrollado un metacrilato de colada que es 100% reciclado, denominado Green Cast. Su manipulación, resistencia y aspecto es muy similar al de los metacrilatos estándares. La diferencia radica principalmente en su composición.

El **metacrilato Green Cast** se fabrica en Polimetil Metacrilato (PMMA), el único plástico que “tras eliminar las impurezas” puede descomponerse en sus monómeros originales (MMA) permitiendo volver a su estado líquido inicial. Este proceso puede repetirse infinitamente para obtener un material reciclado de gran calidad libre de VOCs (Compuestos Orgánicos Volátiles) e hidrocarburos.

Además, presenta una serie de ventajas desde un punto de vista medioambiental y es que durante su fabricación se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> en un 20%, así como el consumo de agua y el vertido de residuos a la tierra.

### **CARACTERÍSTICAS**

- ⇒ **Green Cast®** está fabricado de materia prima 100% reciclada (MMA reciclado)
- ⇒ Puede ser reciclado infinitas veces
- ⇒ **Green Cast®** es una placa de metacrilato de colada de marca de primera calidad producida en Italia
- ⇒ **Green Cast®** cumple la ISO 7823.1
- ⇒ **Green Cast®** está libre de compuestos orgánicos volátiles así como de hidrocarburos
- ⇒ La fabricación de **Green Cast®** utiliza menos agua y libera menos CO<sub>2</sub> que las placas de metacrilato de colada estándares

Figura 19: Características del metacrilato 100% reciclado (Green Cast).

## Conclusiones

---

1) El ácido láctico es un producto químico que puede obtenerse de materias primas renovables entre las que están las de la industria azucarera. En el mundo, su empleo para la fabricación de polímeros biodegradables (PLA) está teniendo mucho auge porque se degradan y contribuyen a la disminución de la contaminación y por su capacidad para ser reabsorbidos por el organismo, que los hace apropiados para múltiples usos.

2) El PLA es un material muy versátil con diversas aplicaciones en distintas industrias. Este polímero ha creado un gran interés en las industrias médica, textil y de envases y envolturas por sus magníficas propiedades y su biodegradabilidad y, según la literatura abordada en este trabajo, tiene un gran futuro porque es una innovación que puede sustituir a los plásticos de la petroquímica en muchos campos.

3) Debido a que el PLA posee problemas tales como fragilidad, malas propiedades mecánicas, velocidad de cristalización lenta y baja cristalinidad, está severamente restringido en muchos aspectos, especialmente con respecto a las películas sopladas. Para superar las deficiencias del PLA, se mejoran sus propiedades, pero todavía se requieren de más investigaciones.

4) El ácido poliláctico es un gran material para elementos de usar y tirar principalmente (por ejemplo: envases, botellas...), por lo que su uso en la industria de la construcción de claraboyas es muy poco factible. Las claraboyas, mamparas y demás elementos fabricados con este material podrían experimentar agujeros, roturas entre otras cosas, ya que pueden llegar a degradarse. Pueden aplicarse sustancias antioxidantes para evitarlo, pero todavía se requieren de investigaciones en este sector.

## Referencias bibliográficas

---

Abdel-Rahman MA, Tashiro Y., Sonomoto K. Avances recientes en la producción de ácido láctico mediante procesos de fermentación microbiana. *Biotechnol. Adv.* 2013; 31 : 877–902. doi: 10.1016 / j.biotechadv.2013.04.002.

Agrawal CM, Athanasiou KA Técnica para controlar el pH en las proximidades de implantes PLA-PGA biodegradables. *J. Biomed. Mater. Res.* 1997; 38 : 105-114. doi: 10.1002 / (SICI) 1097-4636 (199722) 38: 2 <105 :: AID-JBM4> 3.0.CO; 2-U.

Athanasiou KA, Niederauer GG, Agrawal CM Esterilización, toxicidad, biocompatibilidad y aplicaciones clínicas de copolímeros de ácido poliláctico / ácido poliglicólico. *Biomateriales.* 1996; 17 : 93-102. doi: 10.1016 / 0142-9612 (96) 85754-1.

Auras, R. A., Lim, L. T., Selke, S. E., & Tsuji, H. (Eds.). (2011). Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications (Vol. 10). John Wiley & Sons.

Biopolymers as viable alternatives to common plastic materials. (2000) Galactic Laboratories. (Sitio web de Galactic Laboratories: [www.lactic.com](http://www.lactic.com)) ([www.nf-2000.org/secure/Fair/S1264.htm](http://www.nf-2000.org/secure/Fair/S1264.htm))

Canales Sectoriales. La Tendencia positiva para la industria de bioplásticos se mantiene estable. 2019.

Ebnesajjad, S. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications. s.l. : William Andrew, Elsevier, 2013.

Ercros. Ensayo de biodegradación por compostaje industrial. Departamento de Ingeniería Química de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en septiembre de 2014.

European Bioplastics. Bioplastics: Facts and Figures. [En línea] 2014. <http://www.european-bioplastics.org/>.

F. Aeschelmann, M. Carus. Bio-based Building Blocks and Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020. [En línea] 2015. <http://bio-based.eu/markets/>.

G. Scott, D. M Wiles. Reviews - programmed-life plastics from polyolefins: a new look at sustainability. *Biomacromolecules.* 3. 2001, Vol. 2, pág. 615e622.

Inkinen S., Hakkarainen M., Albertsson A.-C., Sodergard A. Del ácido láctico al poli (ácido láctico) (PLA): caracterización y análisis de PLA y sus precursores. *Biomacromoléculas.* 2011; 12 : 523–532. doi: 10.1021 / bm101302t.

Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., Teng, L., Sun, F. y Li, Y. (2020). Síntesis y aplicación biológica del ácido poliláctico. *Moléculas (Basilea, Suiza)*, 25 (21), 5023. <https://doi.org/10.3390/molecules25215023>

L. Serna, A. Rodríguez, F. Albán. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*. 1. 2003, Vol. 5, págs. 16-26.

L. Shen, J. Haufe, M. K. Patel. Product overview and market projection of emerging biobased plastics. Utrecht University : Group Science, Technology and Society (STS), Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, 2009.

Luckachan GE, Pillai CKS Biodegradable Polymers-A Review on Recent Trends and Emerging Perspectives. *J. Polym. Reinar*. 2011; 19 : 637–676. doi: 10.1007 / s10924-011-0317-1.

Maiti P., Yamada K., Okamoto M., Ueda K., Okamoto K. Nuevos nanocompuestos de polilactida / silicato en capas: papel de las arcillas orgánicas. *Chem. Mater*. 2002; 14 : 4654–4661. doi: 10.1021 / cm020391b.

Mariano. Tecnología de los Plásticos: Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado: Poliláctico (PLA). 2011.

Munilla, M. H., & Carracedo, G. B. (2005). Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 49-59.

Nampoothiri KM, Nair NR, John RP Una descripción general de los desarrollos recientes en la investigación de polilactidas (PLA). *Bioresour. Technol*. 2010; 101 : 8493–8501. doi: 10.1016 / j.biortech.2010.05.092.

R. Auras, B. Harte, S. Selke. An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *Macromolecular Bioscience*. 2004, Vol. 4, págs. 835-864.

R. Auras, L. Lim, S. E. M. Selke, H. Tsuji. Poly(Acid Lactic): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. [ed.] Domasius Nwabunma Richard F. Grossman. *Polymer Engineering and Technology*. s.l. : Wiley, 2010.

Ren, J. (2011). *Biodegradable poly (lactic acid): synthesis, modification, processing and applications*. Springer.

[Residuos profesional. La Industria de los Bioplásticos Pisa fuerte \(Y sostenible\). 2014](#)

Serna, L., & Albán, F. (2003). Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1), 16-26.

Textos científicos. El Ácido poliláctico (PLA). 2009.

Varadarajan S., Miller DJ Mejora catalítica de ácidos orgánicos derivados de la fermentación. *Biotechnol. Prog*. 1999; 15 : 845–854. doi: 10.1021 / bp9900965.

Vasir JK, Labhasetwar V. Nanopartículas biodegradables para la administración citosólica de productos terapéuticos. *Adv. Drug Deliv. Rev*. 2007; 59 : 718–728. doi: 10.1016 / j.addr.2007.06.003.

Vaz CM, van Tuijl S., Bouten CVC, Baaijens FPT Diseño de andamios para la ingeniería de tejidos de vasos sanguíneos utilizando una técnica de electrohilado multicapa. *Acta Biomater.* 2005; 1 : 575–582. doi: 10.1016 / j.actbio.2005.06.006.

V. Siracusaa, P. Rocculib, S. Romanib, M. Dalla Rosa. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology.* (2008, Vol. 19, págs. 634-643.

Yao K., Tang C. Polimerización controlada de monómeros renovables de próxima generación y más allá. *Macromoléculas.* 2013; 46 : 1689-1712. doi: 10.1021 / ma3019574.

Zalusky AS, Olayo-Valles R., Wolf JH, Hillmyer MA Polímeros nanoporosos ordenados a partir de copolímeros de bloques de poliestireno-polilactida. *Mermelada. Chem. Soc.* 2002; 124 : 12761–12773. doi: 10.1021 / ja0278584.

Zuluaga, F. (2013). Algunas aplicaciones del ácido poli-L-láctico. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(142), 125-142.