

Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones

Polylactic acid: a review of production methods and their applications

Iris Rosalia Campozano Mendoza^{ab}, María Antonieta Riera^{ac*}^aUniversidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.^bInstituto de Postgrado,^cFacultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas.DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6908007>

Recibido: 07/06/2022

Aceptado: 24/07/2022

Resumen

La producción de biopolímeros es un tema que ha cobrado interés, debido a las ventajas que estos ofrecen frente a los plásticos de origen petroquímico. Uno de los biopolímeros con aumento en su demanda durante los últimos años, es el ácido poliláctico. Este se caracteriza por ser un material no tóxico, biodegradable compostable, con potencial de uso y beneficio ambiental, en comparación con los plásticos sintéticos. Dada la importancia que ha cobrado el ácido poliláctico, se presenta esta revisión bibliográfica, donde se exponen sus propiedades, aplicaciones, proceso de producción, además de una breve disertación del mercado actual. Con base en la información consultada, se considera que el ácido poliláctico es un biopolímero capaz de reemplazar en un futuro próximo a algunos polímeros sintéticos y con ello, contribuir con la disminución del impacto ambiental, causado por la acumulación de plásticos en los ecosistemas. La producción actual de ácido poliláctico, ocupa una posición importante en la producción global de bioplástico. Se espera que esta tendencia de aumento en la producción del biopolímero se mantenga, para satisfacer la demanda en el mercado de dicho material.

Palabras clave: biomateriales, biopolímeros, bioplásticos, PLA.

Código UNESCO: 2304-16 – Análisis de Polímeros. Código CAPE: 30603170 – Polímeros.

Abstract

The production of biopolymers is a subject that has gained interest due to the advantages they offer compared to plastics of petrochemical origin. One of the biopolymers with increased demand in recent years is polylactic acid. This is a non-toxic, biodegradable, compostable material with potential for use and environmental benefit compared to synthetic plastics. Given the importance that polylactic acid has gained, this review, where its properties, applications, production process and a brief dissertation of its current market is worth presenting. Based on the information consulted, polylactic acid is considered a biopolymer capable of replacing some synthetic polymers in the short and contributing to reducing the environmental impact caused by the accumulation of plastics in ecosystems. The current production of polylactic acid occupies an important position in the global market of bioplastic. It is expected that this trend of increased production will continue to satisfy the market demand for said material.

Keywords: biomaterials, biopolymers, bioplastics, PLA.

UNESCO Code: 2304-16 – Polymer Analysis. CAPE Code: 30603170 – Polymers.

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

***Autor de correspondencia.**

Iris Rosalia Campozano Mendoza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0105-154X>. Correo: icampozano3671@utm.edu.ec. Ingeniera Química. Estudiante de la Maestría en Investigación en Ingeniería Química, mención Alimentos, Instituto de Posgrado. Universidad Técnica del Manabí, Ecuador. Técnico Distrital y Articulación Territorial de Laboratorio 3 en la Agencia de Regulación y Control Fito Zoosanitario – Agrocalidad, Ecuador. [Perfil Google](#).

María Antonieta Riera*. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7195-2821>, Correo: maria.riera@utm.edu.ec, Ingeniero Industrial, Magister Scientiarum en Ingeniería Química. Profesora Investigadora en el Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica del Manabí, en Portoviejo, Ecuador. [Perfil de Google](#).

1. Introducción

El sector agroindustrial genera residuos que en su mayoría presentan características óptimas para su aprovechamiento en otra cadena de producción o como alternativa de tratamiento o recuperación y obtener nuevos compuestos [1]. A través de la biotecnología es posible la bioconversión de los residuos agroindustriales mediante procesos de extracción directa, de transformación microbiana o química en productos comerciales [2]. El ácido poliláctico (PLA) se obtiene a partir del ácido láctico, que es un ácido orgánico natural producido mediante la fermentación de azúcares obtenidos a partir de recursos renovables como residuos de la caña de azúcar, almidón de maíz, yuca o mandioca [3].

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico o ácido hidroxipropiónico), es un líquido incoloro, soluble en éter, miscible con agua y alcohol e insoluble en cloroformo, éter de petróleo y disulfuro de carbono o un sólido de punto de fusión bajo en estado puro. Tiene dos formas ópticamente activas (dextro y levo) y la forma racémica, ópticamente inactiva, que es la comercial. Un gran número de compañías en el mundo la producen, pero debido al alto costo de producción, sus sales y ésteres se utilizan en aplicaciones limitadas en las diferentes industrias. Sin embargo, el mercado potencial para elaborar ácido láctico de menor precio podría basarse en el proceso de fermentación, una ruta que provocaría un incremento considerable del mercado existente y la aparición de nuevas aplicaciones [4].

El PLA es un polímero biodegradable, de base biológica y biocompatible capaz de sustituir al polipropileno (PP) derivado del petróleo, al poliestireno (PS) y al tereftalato de polietileno (PET) en la fabricación de fibras, espumas, telas no tejidas, empaques y películas. En la actualidad existe un interés creciente en el uso de polímeros biodegradables como sustituto de los de origen petroquímico [5]. Dentro de este contexto se desarrolló esta revisión, la cual resume información sobre las propiedades y aplicaciones del ácido poliláctico, así como los diferentes métodos de síntesis que se emplean para su producción.

2. Desarrollo

2.1 Metodología

Se realizó una revisión descriptiva y no experimental, para lo cual se consultaron bases de datos de revistas indexadas, priorizando en aquellas con alto impacto. La búsqueda se hizo usando como palabra clave ácido poliláctico y se trabajó con publicaciones publicadas de los años 2009 a 2021. La información recolectada, organizada y análisis, se sistematizó para desarrollar los aspectos incluidos en este trabajo.

2.2 Ácido Láctico

El ácido láctico (AL) es un ácido orgánico de gran aplicación industrial. Aunque se puede sintetizar por vía química, la mayor parte de su producción a nivel mundial se hace mediante el proceso de fermentación. La formación de los enantiómeros ópticamente activos depende del tipo de microorganismo utilizado, la inmovilización o recirculación del mismo, el control de pH en condiciones ligeramente ácidas (5,5 a 6,5), la temperatura entre 5 °C y 45 °C, la fuente de carbono, la fuente de nitrógeno, el método de fermentación empleado y la formación de los subproductos [6]. Las bacterias ácido lácticas son heterótrofas, carecen de capacidades biosintéticas y la adición de nutrientes complejos, puede contribuir con la obtención de un AL más puro, aunque aumenta significativamente el costo de producción [7].

Existen alrededor de 20 géneros que contienen bacterias productoras de AL: *lactococcus*, *lactobacillus*, *estreptococos*, *leuconostoc*, *pediococcus*, *aerococcus*, *carnobacterium*, *enterococcus*,

oenococcus, *tetragenococcus*, *vagococcus*, y *weisella*. El microorganismo más importante es el *Lactobacillus* y este a su vez, comprende alrededor de ochenta especies que producen ácido láctico. Estos incluyen las especies *Lactobacillus amylophilus*, *Lactobacillus bavaricus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus maltozymicus* y *Lactobacillus salivarius*. Las cepas de *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus jensenii* y *Lactobacillus acidophilus* producen ácido D-láctico y una mezcla de los dos estereoisómeros al mismo tiempo [8].

La etapa de fermentación en la producción de AL es crucial para determinar el rendimiento del proceso. Entre los factores que controlan esta etapa se encuentran los microorganismos implicados, sus necesidades nutricionales y suplementos, sistemas de reactores utilizados, entre otros [9]. La principal desventaja de la producción por la vía fermentativa es el alto costo que ocasionan su aislamiento y purificación [10]. Sin embargo, existen compañías que utilizan esta ruta para sintetizar AL y posteriormente obtener productos que se utilizan ampliamente en las industrias de alimentos, bebidas y farmacéutica, y es el principal precursor del ácido poliláctico [11].

2.3 Producción de lactida

El ácido láctico producido por fermentación contiene impurezas mezcladas con los enantiómeros del ácido L- y D-láctico, que pueden afectar la calidad de producción de lactida y posteriormente de PLA. La lactida es el diéster cíclico del ácido láctico es una sustancia intermedia en la producción de ácido poliláctico PLA mediante su proceso de obtención, y es la parte más costosa del esquema de síntesis [12].

La composición del estereocomplejos de la lactida producida depende de la alimentación del crudo inicial, el catalizador utilizado y los parámetros de procesamiento (temperatura y presión) [13]. La mayoría de los procesos en la industria emplean el método de polimerización por apertura del anillo (ROP) para obtener PLA de alto peso molecular. Aunque existen otras rutas de reacción como la policondensación directa, el producto obtenido es relativamente bajo en peso molecular (<5000) y débil en propiedades mecánicas, siendo necesario el uso de agentes de acoplamiento de cadena para aumentar el peso molecular, lo que incrementa su coste y la complejidad del proceso [14].

La policondensación el ácido láctico da como resultado un prepolímero oligómero, al que le sigue un proceso de despolimerización a temperaturas que oscilan entre 150 y 180 °C a baja presión, que da el anillo de dímero de lactida. Las temperaturas más altas conducen a una mejor eliminación del agua y tiempos de reacción más bajos, pero las temperaturas superiores a 240 °C provocan una racemización no deseada por esta razón se aplican catalizadores [15].

Otra propuesta de obtención es la condensación deshidratante azeotrópica y consiste en obtener PLA de alto peso molecular sin la necesidad de emplear agentes de acoplamiento. Para ello se utilizan grandes cantidades de catalizadores para aumentar la velocidad de reacción, pero sus residuos pueden ser un inconveniente ya que pueden causar problemas posteriores tales como 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 [16].

La polimerización por apertura de anillo de la ruta de reacción de lactida, es un método de polimerización que actualmente está atrayendo la atención de las industrias en la producción de polilactida debido a su alto peso molecular [17]. El proceso consta de tres pasos: policondensación, despolimerización y polimerización por apertura de anillo (Figura 1).

Esta ruta requiere etapas adicionales de purificación que son relativamente complicadas y costosas. Al controlar el tiempo de residencia y las temperaturas en combinación con el tipo y la concentración del catalizador, es posible controlar la proporción y la secuencia de las unidades de ácido D- y L-láctico en el polímero final [19]. La fase de policondensación se fundamenta en eliminar las impurezas que pueden afectar la calidad de producción de lactida y posteriormente el PLA. La despolimerización se

lleva a cabo a altas temperaturas para permitir que la lactida cruda se evapore y se elimine continuamente del reactor, y en cada etapa la presión se reduce para producir un prepolímero PLA de peso molecular 1000-3500. Este proceso se lleva a cabo con temperaturas que van desde 135 °C a 200 °C y con la adición de un catalizador, para mejorar la selectividad y reducir el tiempo de reacción [20].

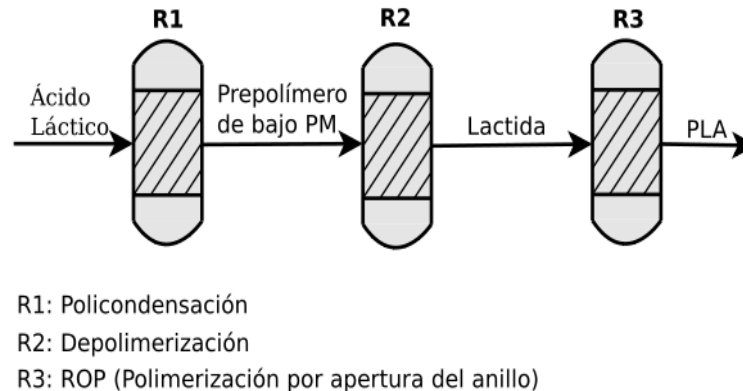


Fig. 1. Método de síntesis del PLA.

Muchos de los sistemas catalíticos pueden ser usados para polimerizar lactida, incluyendo a los metales de transición como el aluminio, el zinc, el estaño y los lantánidos (Cuadro 1). Estos óxidos y complejos metálicos tienen diferentes grados de conversión y alta racemización. Las sales metálicas de estaño son mejores catalizadores de transesterificación, más estables hidrolíticamente y más fáciles de usar en el proceso de polimerización [21]. Los complejos de estaño son de gran aplicabilidad en la polimerización en masa de lactida, especialmente el ácido bis-2-etilhexanoico de estaño (II) (octoato de estaño), debido a su solubilidad en lactida fundida, alta conversión de 90% y alta selectividad al producir menos del 1% de racemización [22].

La polimerización por apertura de anillo se lleva a cabo en un sistema basado en solvente con iniciaciones aniónicas y catiónicas. Esto tiene las ventajas de una alta reactividad y selectividad, así como bajos niveles de racemización e impurezas. El ácido trifluorometano sulfónico y el ácido metil trifluorometano sulfónico, son los iniciadores catiónicos usados para polimerizar lactida a baja temperatura (100 °C) y el producto PLA resultante es un polímero ópticamente puro [23].

El uso de un alcóxido primario, como el metóxido de potasio, como iniciador aniónico puede producir una racemización del 5% de PLA. Aunque las iniciaciones aniónicas y catiónicas tienen la ventaja de producir ácido poliláctico de baja racemización a una temperatura más baja, el proceso de reacción debe llevarse a cabo en un sistema solvente en condiciones diluidas, para controlar su reactividad y la sensibilidad a la presencia de impurezas, y alta toxicidad [24].

En la producción de PLA a gran escala, se prefiere el catalizador metálico con su rápido y alto rendimiento en la polimerización de lactida. Por su eficacia se aplica en bajas concentraciones (<10 ppm), lo que permite garantizar la seguridad cuando se utiliza en el envasado de alimentos y en aplicaciones biomédicas [25]. La reacción catalítica ROP también es aplicable para la copolimerización de lactida con otros monómeros como glicólido y ϵ -caprolactona, sirviendo además en la producción de biomateriales usados en la fabricación de implantes quirúrgicos y portadores de fármacos [26].

Cuadro 1. Catalizadores usados en la polimerización del ácido poliláctico.

Grupo metálico	Tipo	Catalizador
IA	Hidróxido de metal alcalino	Hidróxido de sodio hidróxido de potasio hidróxido de litio
	Sal de metal alcalino con ácido débil	Lactato de sodio, acetato de sodio, carbonato de sodio, octilato de sodio, estearato de sodio, lactato de potasio, acetato de potasio, carbonato de potasio, octilato de potasio
	Alcóxido de metal alcalino	Metóxido de sodio, metóxido de potasio, etóxido de sodio, metóxido de potasio
IIA	Sal de calcio de ácido orgánico	Acetato de calcio
IIB	Sal de zinc de ácido orgánico	Acetato de zinc
IVA	Polvo de estaño, catalizador de tipo estaño orgánico excepto monobutilestaño	Lactato de estaño, tartrato de estaño, dicaprilato de estaño, dilaurilato de estaño, diparmitato de estaño, diestearato de estaño, dititanato de tetrapropileato de estaño, -naftoato de estaño, - naftoato de estaño, oxalato de estaño.
IVB	Compuesto tipo titanio y compuesto tipo zirconio	Titanato de tetrapropilo, Isopropóxido de zirconio.
VA	Compuesto de tipo antimonio	Trióxido de antimonio
VIIA	Sal de manganeso de ácido orgánico	Acetato de manganeso

Fuente: Sin y Tuen [18].

2.4 Propiedades del PLA

El ácido poliláctico es un biopolímero, termoplástico, biodegradable con numerosas aplicaciones, y presenta propiedades, desde el estado amorfo hasta estado cristalino que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros (-D) y L (+), los pesos moleculares y la copolimerización [27]. Cuando el PLA tiene una alta pureza estereoquímica, tiende a formar una estructura altamente cristalina y la copolimerización de diferentes isómeros de lactida puede producir una variedad de características de PLA [28].

El PLA puede estar compuesto por los tres estereoisómeros de lactida: L-lactida, D-lactida y meso-lactida y dependiendo de sus constituyentes, se tendrán características diferentes para el polímero [18]. La composición estereoquímica del polímero tiene un efecto sobre el punto de fusión, la velocidad de cristalización y el grado final de cristalización y tiene un punto de fusión de equilibrio de 207 °C y una temperatura de transición vítrea de aproximadamente 60 °C. Comúnmente, el PLA estereoquímicamente altamente puro ya sea en L o D, posee un punto de fusión de alrededor de 180 °C con una entalpía de fusión de 40-50 J/g [29].

Las características verdes del PLA han tomado importancia en la industria del envasado de alimentos, debido a que tiene buenas propiedades de barrera para mantener la frescura de los alimentos sin contaminar el medio ambiente [30]. La selección cuidadosa del material de envasado por parte de los productores de alimentos, es un aspecto importante para evitar la contaminación química y biológica, además del rápido deterioro de los alimentos. Los materiales de envasado elaborados con PLA proporcionan una barrera contra el vapor de agua, para evitar la degradación de los alimentos o el crecimiento de microorganismos, evitar la penetración de gases atmosféricos que pueden iniciar la oxidación y mantener los compuestos orgánicos volátiles contenidos en los alimentos para preservar los aromas y sabores [31].

Muchos estudios han demostrado que el PLA tiene una baja solubilidad en una amplia gama de

disolventes líquidos como el agua, alcohol y parafina. Esto indica que el PLA se puede emplear de forma segura como material de envasado de alimentos sin causar efectos adversos para la salud [32]. El ácido poliláctico se puede disolver en cloroformo, cloruro de metileno, dioxano, acetonitrilo tricloroetano y ácido dicloroacético y también pueden ser solubles en tolueno, acetona, etilbenceno y tetrahidrofurano (THF) cuando se calienta a temperaturas de ebullición, pero su solubilidad está limitada a bajas temperaturas. Generalmente, no se puede disolver PLA en agua, alcoholes selectivos y alcanos [33].

Se ha demostrado que el PLA tiene propiedades de barrera preferenciales en relación con el nitrógeno, el dióxido de carbono y el metano, pero propiedades de barrera ligeramente más débiles para el oxígeno. Este hallazgo es importante, ya que muestra que el PLA se puede utilizar como material de envasado robusto para sustituir varias películas plásticas de base petroquímica. Sus propiedades de barrera junto con su biodegradabilidad, hacen del PLA un fuerte competidor como material de empaque futuro [22].

Aunque el ácido poliláctico tiene buena biocompatibilidad y capacidad de estiramiento, las propiedades de este polímero necesitan ser mejoradas. Ejemplo de ello es su hidrofobicidad, requiriendo la aplicación de métodos para mejorar de manera efectiva las deficiencias [16]. Como nanocompuesto, las propiedades del PLA pueden mejorarse agregando aditivos modificados durante la síntesis, o mezclándolo directamente con otros polímeros. Y se ha comprobado con varias investigaciones que el PLA si tiene compatibilidad con varios compuestos como aditivos y han obtenido buenos resultados en el proceso de investigación [34].

El control de la cristalinidad del ácido poliláctico (PLA) no es sólo importante para alcanzar la máxima temperatura de utilidad del polímero, sino también en lo que respecta a su tiempo de degradación. La biodegradación se ve influenciada por la morfología en estado sólido, el grado de cristalinidad, la estructura química principal. De esta forma, el PLA cristalino es más resistente [35].

El PLA tiene aproximadamente una vida media de degradación en el medio ambiente que van desde 6 meses a 2 años, dependiendo del tamaño y forma del artículo, su relación de isómeros y la temperatura. Este se degrada en el medio biológico, donde las células vivas o microorganismos están presentes, tales como suelos, compost, mares, ríos, lagos, cuerpos de seres humanos y animales, a través de la hidrólisis enzimática o no enzimática [36].

2.5 Aplicaciones del ácido poliláctico PLA

El ácido poliláctico se ha destacado como un polímero importante debido a su alto potencial de aplicabilidad en diversas áreas, entre las cuales se mencionan el campo químico, médico, farmacéutico o biotecnológico. Estudios recientes han reportado su uso como componente básico para la producción de equipos de protección personal requeridos para la prevención de la contaminación por Sars-Cov-2, responsable de la causa de la enfermedad por coronavirus, que actualmente es una de las principales contingencias sanitarias a nivel mundial [37].

La buena biocompatibilidad es una razón importante para el amplio uso de PLA en el campo de la biomedicina, dado que el producto intermedio (ácido láctico) puede ser metabolizado por el cuerpo humano y no es tóxico. Su degradación puede utilizarse para la liberación de fármacos. Controlando la tasa de metabolismo del portador en el cuerpo, es posible asegurar la concentración efectiva del fármaco mientras se reducen los efectos secundarios, lo que le da ventajas obvias para su uso tanto en la administración de fármacos como material para implantes [38].

En ingeniería de tejidos, el ácido poliláctico también es una alternativa viable por ser no tóxico, bioreabsorbible, hemocompatible y biocompatible capaz de generar una respuesta biológica aceptable durante el tiempo y modo de contacto de una aplicación específica, para promover la reparación y regeneración de tejidos basados en soportes o andamios (*scaffold*). Investigaciones previas [39], reportan que los soportes de PLA pueden contar con refuerzos de partículas, incluido el acero

inoxidable, haciéndolo adecuado para implantes y generar buenas perspectivas en aplicaciones de ingeniería del tejido óseo.

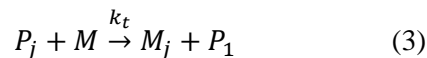
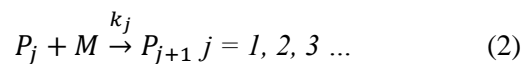
Una de las aplicaciones más importantes es que se puede utilizar con el fin de reducir el volumen de utensilios de servicio de alimentos desechables no degradables, como tazas, platos, cubiertos, además acentuar su capacidad de revestimientos laminados, embalajes multicapa de rendimiento para productos lácteos perecederos, debido a que con el PLA puede hacerse una película plástica orientada hacia el eje para empacar bolsas. Este biopolímero puede ir remplazando convencionalmente, al poliestireno y el polipropileno que se han utilizado ampliamente para formar productos de servicio de alimentos debido a sus propiedades de bajo costo, y aceptables por el consumidor [40].

La sustitución de bolsas de plástico a base de petróleo por bolsas de PLA puede generar un ahorro medioambiental significativo y el reemplazo de 20 millones de bolsas puede ayudar a ahorrar combustible fósil igual a 29.200 galones de emisiones de gases de efecto invernadero [41]. Las aplicaciones potenciales para los compuestos del ácido poliláctico, incluyen carcasas de computadora con buena rigidez, entre otros dispositivos usados en la industria electrónica. Las tarjetas de transacción hechas de PLA son duraderas si se comparan con las elaboradas con polietileno, cloruro de polivinilo o tereftalato de polietileno. La mayoría de las tarjetas de plástico existentes se hacen para un solo uso y si sólo se elaboraran a base de PLA se reduciría las emisiones de gases de efecto de invernadero [42].

2.6 Cinética y modelado de ácido poliláctico PLA

Hasta la bibliografía consultada, se registran pocas publicaciones que abordan el modelado matemático de las reacciones o la evaluación de los coeficientes de velocidades correspondientes. La producción de ácido poliláctico se puede llevar a cabo a partir de ácido láctico, de su dímero cíclico (lactida) y como monómero. El uso de lactida como monómero o producto intermedio conduce a una polimerización por apertura de anillo, que se refiere a la apertura de anillos dímeros para formar cadenas de polímero [43].

Algunas publicaciones han elaborado el modelo de ROP de lactida catalizada y las impurezas que originan los catalizadores no se han tomado en cuenta en tales modelos cinéticos. Las reacciones que representan los modelos de polimerización para la síntesis de PLA por apertura de anillo, consideran una polimerización de crecimiento en cadena, por lo que se divide en tres pasos: inicio (1), propagación (2) y terminación (3), teniendo cada uno de ellos una constante de velocidad diferente.



Donde k_0 es la constante de velocidad de iniciación, M es el monómero, I es el iniciador, P_1 es el polímero activado de una unidad, P_j es la cadena polimérica activa de j unidades, k_j es el j-ésimo paso de propagación en una cadena, M_j es el polímero desactivado de j unidades repetidas que no volverán a reaccionar y k_t es la constante de velocidad de terminación [43]. A partir de ello, la velocidad de reacción es (4):

$$\frac{-d[M]}{dt} = k[M]^n \quad (4)$$

En la que [M] es la concentración del monómero (g/g), t es el tiempo (s), k es la constante cinética (1/s) y n es el orden de reacción. El modelo de cinética de reacción predice las velocidades de

reacciones involucradas en cada paso del proceso PLA generando una reacción basada en grupos funcionales especificados. Este modelo implementado genera condensación directa e inversa, reacciones (esterificación e hidrólisis), así como reacciones de reordenamiento posteriores.

Por otra parte, para determinar la velocidad con la que se pierde masa en un proceso de obtención de PLA, se realiza un análisis no lineal para posteriormente comprobarlo con una regresión lineal, utilizando el modelo de cinético de Friedman (5, 6); el cual se utiliza para la descomposición de polímeros usando un modelado dinámico [44].

$$\ln \frac{da}{dt} = \ln[A - (1 - \alpha)^n] - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f} \quad (6)$$

Donde $\ln(da/dt)$ es la velocidad de reacción (1/s), A es la factor de frecuencia (1/s), α es la constante de descomposición cinética (mg/mg), n el orden de reacción, E es la energía de activación (J/mol), R es la constante universal de los gases ideales (J/mol.K), T es la temperatura, m_0 es la masa inicial (g), m_f es la masa final (g) y m_t es la masa en el punto (g).

2.7 Análisis de mercado del PLA

El PLA es un material que data de 1932. Empresas como Dupont seguido por Cargill, registran historia en la producción de este biopolímero [45]. En los últimos años ha aumentado la demanda global de bioplásticos, encontrándose el PLA como uno de los más comercializados después del Tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT). En el año 2021 se produjeron 0,46 millones de toneladas métricas (MMTn) de ácido poliláctico a nivel global y se espera que para el 2026 alcance 0,79 MMT [46].

A escala industrial, la planta con mayor capacidad de producción de PLA es NatureWorks ubicada en los EEUU con 150.000 Tn. Lo sigue la empresa Total y Corbion de Tailandia, con una capacidad instalada de 70.000 Tn. También se registran plantas instaladas en China, con una producción total que supera las 20.000 Tn [47]. Para el año 2025 se espera que la utilización de ácido láctico para la producción de PLA, alcance el 50% del total de AL disponible en el mercado global. Los principales productores de estos polímeros biodegradables, buscan nuevas formas de integrar las cadenas desde los residuos y desechos agrícolas hasta los polímeros de PLA con el fin de reemplazar los plásticos basados en recursos fósiles [48]. El uso de residuos es una fuente de azúcares fermentables, útil para la producción de polímeros por vía biotecnológica. En los últimos años se ha motivado la investigación orientada al uso de nuevos recursos para aumentar la competitividad del mercado de los bioplásticos y la sostenibilidad de su producción a largo plazo.

3. Conclusiones

El PLA es uno de los polímeros biodegradables más prometedores que se utilizan en la actualidad para diversas aplicaciones por su biocompatibilidad y biodegradabilidad. A nivel industrial el método de polimerización de lactida con apertura de anillo, es el más utilizado debido a que se obtiene un polímero más puro, con alto peso molecular y con mayor número de aplicaciones. En los últimos años, ha crecido sustancialmente el mercado mundial de plásticos biodegradables y se proyecta que esta tendencia continúe. Si el mercado del PLA crece tal como se espera, se podrá comercializar un biopolímero a bajo costo y con el beneficio adicional de ser más respetuoso con el ambiente.

Referencias

- [1] K. Cury; Y. Aguas; A. Martínez; R. Olivero y L. Chams. “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento”, *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, vol. 9, n.º S1, pp. 122-132, 2017. DOI: <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- [2] C. García; G. Arrázola y A. Durango. “Producción de ácido láctico por vía biotecnológica”, *Temas agrarios*, vol. 15, n.º 2, pp. 9-26, 2010. DOI: <https://doi.org/10.21897/rta.v15i2.676>
- [3] G. Luna; H. Villada y R. Velasco. “Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique: preliminares”, *DYNA*, vol. 76, n.º 159, pp. 145-151, 2009. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n159/a15v76n159.pdf>
- [4] B. Wojtyniak; J. Kołodziejczyk and D. Szaniawska. “Production of lactic acid by ultrafiltration of fermented whey obtained in bioreactor equipped with ZOSS membrane”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 305, n.º 1, pp. 28–36, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.048>
- [5] A. Samrot; T. C. Sean; T. Kudaiyappan; U. Biswarah; A. Mirarmandi; E. Faradjeva; A. Abubakar; H.H. Ali; J.L.A. Angalene and S. Kumar. “Production, characterization and application of nanocarriers made of polysaccharides, proteins, bio-polyesters and other biopolymers: A review”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 165, n.º B15, pp. 3088–3105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.104>
- [6] F. Zuluaga. “Algunas aplicaciones del ácido poli-L-láctico”, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 37, n.º 142, pp.125-142, 2013. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n142/v37n142a09.pdf>
- [7] M.H. Rahman y P.R. Bhoi. “An overview of non-biodegradable bioplastics”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, 126218, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- [8] N.A. Zaini; A. Chatzifragkou; V. Tverezovskiy and D. Charalampopoulos, “Purification and polymerisation of microbial d-lactic acid from DDGS hydrolysates fermentation”, *Biochemical Engineering Journal*, 150, 107265, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107265>
- [9] T. Ghaffar; M. Irshad; Z. Anwar; T. Aqil; Z. Zulifqar; A. Tariq; M. Kamran; N. Ehsan and S. Mehmood. “Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification”, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 7, n.º 2, pp. 222–229, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.03.002>
- [10] E. Waldir; R. Mojmir; K. Melzoch; E. Quillama y E. Egoavil. “Producción de ácido láctico por *Lactobacillus plantarum* L10 en cultivos batch y continuo”, *Revista Peruana de Biología*, vol. 14, n.º 2, pp. 271-275, 2007. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332007000300014
- [11] S. Marques; C.T. Matos; F.M. Girio; J.C. Roseiro and J.A.L. Santos. “Lactic acid production from recycled paper sludge: Process intensification by running fed-batch into a membrane-recycle bioreactor”, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 120, pp. 63–72, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.12.021>
- [12] E. Castro-Aguirre, F. Iñiguez-Franco, H. Samsudin, X. Fang, and R. Auras. “Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 333–366, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>
- [13] H. Bai, S. Deng, D. Bai, Q. Zhang, and Q. Fu. “Recent Advances in Processing of Stereocomplex-Type Polylactide”, *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 38, n.º 23, 1700454. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeccc.2021.105895>
- [14] C. L. Serna, S. A. de Rodríguez y A. F. Albán. “Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones”, *Ingeniería y Competitividad*, vol. 5, n.º 1, pp. 16-26, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.201700454>
- [15] N. Martinkus, G. Latta, S. A. M. Rijkhoff, D. Mueller, S. Hoard, D. Sasatani, F. Pierobon, & M. Wolcott. “A multi-criteria decision support tool for biorefinery siting: Using economic, environmental, and social

- metrics for a refined siting analysis”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 128, 105330, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyv.v5i1.2301>
- [16] Y. Li, C. Han, Y. Yu and D. Huang. “Morphological, thermal, rheological and mechanical properties of poly (butylene carbonate) reinforced by stereocomplex polylactide”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 137, pp. 1169–1178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105330>
- [17] A. A. Siles. Síntesis, propiedades y aplicación del ácido poliláctico apartir del almidón de la papa. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Materiales. Universidad Nacional de San Agustín. Perú, 2014. Disponible: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2885>
- [18] L. T. Sin and B. S. Tuen. “Chemical Properties of Poly (Lactic Acid)”. In *Polylactic Acid*, L. T. Sin and B. S. Tuen Ed., pp. 135–166, Elsevier, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814472-5.00004-2>
- [19] M. Nofar; D. Sacligil; P. J. Carreau; M. R. Kamal and M. C. Heuzey. “Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 125, 307–360, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.002>
- [20] M. Komorowska-Durka; G. Dimitrakis; D. Bogdał; A.I. Stankiewicz and G.D. Stefanidis. “A concise review on microwave-assisted polycondensation reactions and curing of polycondensation polymers with focus on the effect of process conditions”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 264, pp. 633–644, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.087>
- [21] L. W. Ching; F. M. Keesan and I. I. Muhamad. “Optimization of ZnO/GO nanocomposite-loaded polylactic acid active films using response surface methodology”, *Journal of King Saud University - Science*, vol. 34, n.º 3, 101835, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101835>
- [22] F. X. Espinach; J. A. Méndez; L. A. Granda; M. A. Pelach; M. Delgado-Aguilar and P. Mutjé. “Bleached kraft softwood fibers reinforced polylactic acid composites, tensile and flexural strengths”, In *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*, A. K. T. Lau and A. P. Y. Hung Ed., pp. 73–90, Elsevier, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100656-6.00005-4>
- [23] J. Campos; J. Bao and G. Lidén. “Optically pure lactic acid production from softwood-derived mannose by *Pediococcus acidilactici*”, *Journal of Biotechnology*, vol. 335, pp. 1–8. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.06.007>
- [24] T. L. de Albuquerque; J. E. Marques Júnior; L. P. de Queiroz; A. D. S. Ricardo and M. V. P. Rocha. “Polylactic acid production from biotechnological routes: A review”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 186, pp. 933–951, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.074>
- [25] M. S. Inghvi; S. S. Zinjarde and D. V. Gokhale. “Polylactic acid: Synthesis and biomedical applications”, *Journal of Applied Microbiology*, vol. 127, n.º 6, pp. 1612–1626, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- [26] T. Hussain; M. Tausif and M. Ashraf. “A review of progress in the dyeing of eco-friendly aliphatic polyester-based polylactic acid fabrics”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, pp. 476–483, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.126>
- [27] E. Vatansever; D. Arslan and M. Nofar. “Polylactide cellulose-based nanocomposites”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 137, pp. 912–938, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.205>
- [28] X. Zhao; T. Shou; R. Liang; S. Hu; P. Yu and L. Zhang. “Bio-based thermoplastic polyurethane derived from polylactic acid with high-damping performance”, *Industrial Crops and Products*, vol. 154, 112619, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112619>
- [29] W. Rodchanasuripron; M. Seadan and S. Suttiruengwong. “Properties of non-woven polylactic acid fibers prepared by the rotational jet spinning method”, *Materials Today Sustainability*, vol. 10, 100046, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814472-5.00004-2>

- [30] L. Zhang; C. Huang; Y. Xu; H. Huang; H. Zhao; J. Wang and S. Wang. “Synthesis and characterization of antibacterial polylactic acid film incorporated with cinnamaldehyde inclusions for fruit packaging”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 164, pp. 4547–4555, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.065>
- [31] K. Litauski and A. Kmetty. “Investigation of the damping properties of polylactic acid-based syntactic foam structures”, *Polymer Testing*, vol. 103, 107347, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107347>
- [32] H. Rahman and P. R. Bhoi. “An overview of non-biodegradable bioplastics”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, 126218, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- [33] Yulianto; D. N. Putri; M. S. Perdani; R. Arbianti; L. Suryanegara and H. Hermansyah. “Effect of cellulose fiber from sorghum bagasse on the mechanical properties and biodegradability of polylactic acid”, *Energy Reports*, vol. 6, n.º 1, pp. 221–226, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.048>
- [34] S. Zhu and L. Nie. “Progress in fabrication of one-dimensional catalytic materials by electrospinning technology”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 93, 28–56. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.09.016>
- [35] A. Anžlovar; A. Kržan and E. Žagar. “Degradation of PLA/ZnO and PHBV/ZnO composites prepared by melt processing”, *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, n.º 3, pp. 343–352, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.07.001>
- [36] Y. Bozkurt and E. Karayel. “3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 1430–1450, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.050>
- [37] P. Saini; M. Arora and M. Kumar. “Poly (lactic acid) blends in biomedical applications”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 47–59, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.014>
- [38] G. Li; M. Zhao; F. Xu; B. Yang; X. Li; X. Meng; L. Teng; F. Sun and Y. Li. “Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid”, *Molecules*, vol. 25, n.º 21, 5023, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25215023>
- [39] M. S. Singhvi; S. S. Zinjarde, and D. V. Gokhale. “Polylactic acid: Synthesis and biomedical applications”, *Journal of Applied Microbiology*, vol. 127, n.º 6, pp. 1612–1626. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- [40] P. E. Fathima; S. K. Panda; P. M. Ashraf; T. O. Varghese and J. Bindu. “Polylactic acid/chitosan films for packaging of Indian white prawn (*Fenneropenaeus indicus*)”, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 117, pp. 1002–1010, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.214>
- [41] T. Ghaffar; M. Irshad; Z. Anwar; T. Aqil; Z. Zulifqar; A. Tariq; M. Kamran; N. Ehsan and S. Mehmood. “Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification”, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 7, n.º 2, pp. 222–229, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.03.002>
- [42] C. Lim; S. Yusoff; C. G. Ng; P. E. Lim and Y. C. Ching. “Bioplastic made from seaweed polysaccharides with green production methods”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, n.º 5, 105895. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105895>
- [43] A. J. R. Lasprilla; G. A. R. Martinez; B. H. Lunelli; A. L. Jardini and R. M. Filho. “Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—A review”, *Biotechnology Advances*, vol. 30, n.º 1, pp. 321–328, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.019>
- [44] A. F. Rojas-Gonzales; J. A. Carrero-Mantilla, “Thermal degradation Kinetic of polylactic acid in multiple extrusions”, *Ingeniería y Universidad*, vol.19, n.º 1, pp. 189-206, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.tdkp>

- [45] Herryman, M. and Blanco, G. “Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias”, *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 36, n.º 1, pp. 49-59, 2005. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659007.pdf>
- [46] European Bioplastic. Bioplastics market data, 2021. <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [47] K. J. Jem and B. Tan. “The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid)”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 3, n.º 2, pp. 60–70, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.00>
- [48] A. Djukić-Vuković; D. Mladenović; J. Ivanović; J. Pejcin and L. Mojović. “Towards sustainability of lactic acid and poly-lactic acid polymers production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 238–252, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.050>

Como citar:

I.R. Campozano Mendoza y M.A. Riera, “Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones”, *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol 16, n° 1, pp. 42-53, 2022. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

Fuente de financiamiento

Los autores declaran que la investigación presentada en este artículo fue realizada sin la necesidad de financiamiento.

Contribuciones intelectuales de los autores

Concepción y diseño del trabajo: IRCM.

Revisión de literatura y adquisición de datos: IRCM.

Análisis e interpretación de los datos: IRCM.

Redacción y/o revisión crítica del manuscrito: IRCM, MAR.

Todos los autores han leído y aceptado la versión final del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.