



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Guía de entrega y formato de informe final de investigación, Digi 2023

- 1. El informe final de investigación debe estar elaborado en el formato aprobado Digi 2023.**

- 2. Veinte días antes de la entrega del informe final, el coordinador del proyecto debe:**
 - a. Solicitar el usuario para el uso del software de coincidencias en el siguiente enlace: <https://digi.usac.edu.gt/coincidencias>. Video de YouTube de apoyo.
 - b. Revisar el uso correcto de citas y referencias.
 - c. Elaborar manuscrito según instrucciones de autor de la revista Digi a seleccionar i) Ciencia, Tecnología y Salud , ii) Ciencias Sociales y Humanidades u otra que se encuentre indizada.
 - d. Preparar carpetas que contienen bases de datos y fotografías.
 - e. Presentar a la unidad avaladora para su revisión y elaboración de carta de entrega.
 - f. Enviar electrónicamente al coordinador del programa universitario de investigación

- 3. Revisión del informe final por el coordinador del programa universitario de investigación.** El coordinador del programa universitario de investigación recibe, revisa y envía observaciones al coordinador del proyecto, quien dispondrá de una semana para incluir las observaciones y podrá hacer la entrega digital hasta tener el Vo.Bo. del coordinador del programa.

- 4. Entrega de versión digital del informe final corregido a los coordinadores de programas universitarios de investigación**

Envío de versión digital al correo electrónico del coordinador de programa universitario:

 - Carta membretada de entrega de la unidad avaladora en formato PDF
 - Informe final en formato Microsoft Word



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Manuscrito científico en formato Microsoft Word
- Carpeta conteniendo al menos 10 fotografías propiedad del proyecto de investigación con resolución mínima de 300 dpi, en formato JPG
- Documento Microsoft Word donde describa las fotografías con los siguientes componentes:
 1. Nombre del archivo de la fotografía
 2. Créditos del autor
 3. Breve descripción de la fotografía
 4. Identificación del lugar dónde fue tomada
- Bases de datos, generadas en el proyecto, mínimo en formato Microsoft Excel con las columnas identificadas con sus dimensionales (si aplica).

5. Los coordinadores de programas, devuelven firmados el informe final junto con la constancia del Área de Informática para entrega impresa. Los coordinadores de programas son los responsables de subir los archivos digitales a las carpetas correspondientes para la revisión por parte del Área de Informática. Informática generará una constancia de revisión. Centro de Documentación de Digi (Cindigi) tendrá acceso a la carpeta con los archivos de informes finales para la catalogación y difusión.

6. Entrega de informe final corregido e impreso al Fondo de Investigación de la Digi, proyectos ejecutados en Centros Universitarios entregar a la Secretaria de Coordinación General de Programas:

- a. Carta membretada de entrega de la unidad avaladora.
- b. 2 copias del informe impreso a color con folder simple y con gancho.
- c. Manuscrito científico, impreso según las instrucciones de autor de la revista indizada seleccionada.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- d. Constancia de informática de entrega digital de los aspectos contenidos en el numeral 4 y revisados en la carpeta digital correspondiente.
- e. Cindigi tendrá acceso a la carpeta digital de los aspectos contenidos en el numeral 4.

La entrega digital e impresa debe ser realizada en los últimos tres días hábiles previos a la fecha de finalización de la ejecución del proyecto de investigación o prórroga concedida por las autoridades.

Los coordinadores de los proyectos son los responsables de viabilizar la entrega del informe final al Fondo de Investigación.

Guía para elaborar el informe final de investigaciones cofinanciadas por Digi 2022

Información General

Elaborar el informe final, con tipo de letra *Times New Roman* 12 puntos, interlineado 1 ½ y justificado. Utilice las Normas APA (*American Psychological Association*) 7a. edición para citas, referencias, tablas y figuras.

Formato de informe final (carátula)



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Evaluación de la síntesis de un biopolímero de ácido láctico (PLA) a partir de biomasa lignocelulósica desechada proveniente de la industria de madera y cafetalera, para su utilización en la fabricación de filamentos mediante extrusión como inicio de una economía circular de impresión 3D.

nombre del proyecto de investigación

4.8.63.4.61

Partida presupuestaria

Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

Coordinador M.Sc. Erick Giovanni Estrada Palencia

Investigador Ing. Mauricio Rivera

Auxiliar José Carlos Marroquín

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Guatemala 27 de noviembre del 2023

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Inga. Liuba María Cabrera Ovalle de Villagrán Cabrera
Coordinadora del Programa de Investigación

Autores

M.Sc. Erick Giovanni Estrada Palencia
Coordinador del proyecto

Nombre del investigador
Mauricio Rivera Tello

Auxiliares de investigación II
Renato Rodolfo Rivera Tello
Nancy Elizabeth Ramírez Alvares
José Carlos Marroquín

Colaboradores (si aplica): anotar nombres apellidos e institución que representa



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2023. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.63.4.61 en el Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

1 Índice general

Contenido

1	Índice general (incluir índice de tablas y figuras)	7
2	Resumen	9
3	Introducción.....	10
4	Antecedentes.....	11
5	Planteamiento del problema.....	12
6	Marco teórico	14
7	Estado del arte.....	22
8	Objetivos.....	24
9	Hipótesis	24
10	Materiales y métodos.....	25
11	Aspectos éticos y legales (si aplica)	33
12	Resultados y discusión	34
13	Conclusiones	46
14	Recomendaciones.....	46
15	Referencias	48
16	Apéndice	52
17	Vinculación.....	67
18	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual.....	67
19	Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) identificando su meta correspondiente:	67
20	Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente al 31 de diciembre de 2023)	69
21	Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación	69
22	Aval de la Directora del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	70
23	Visado de la Dirección General de Investigación.....	70

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1 *Resumen de metodologías para polimerización de ácido poliláctico.*, 11

Figura 2 *Diagrama del uso de desechos de biomasa y su incorporación a ciclo de economía circular para la impresión en 3D.*, 13

Figura 3 *Ciclo de la vida ecológicamente amigable del ácido poliláctico*, 22

Figura 4 *Fotografías macroscópicas de filamentos analizados*, 39

Figura 5 *Fotografías macroscópicas de filamentos analizados para determinar tensión máxima*, 40

Figura 6 *Filamentos obtenidos mediante extrusión a alta temperatura*, 42

Tabla 1 *Rendimiento de extracción de celulosa a partir de materia prima*, 34

Tabla 2 *Formación de polímero PLA en función del catalítico*, 35

Tabla 3 *Iteraciones de polimerizaciones evaluadas*, 36

Tabla 4 *Pruebas de solubilidad*, 37

Tabla 5 *Propiedades físico-mecánicas de filamentos extruidos*, 38

Tabla 6 *Análisis de varianza*, 41



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

2 Resumen

La propuesta de investigación se sustenta en la necesidad de encontrar fuentes accesibles para la producción de biopolímeros de menor impacto con el ambiente utilizando materiales de desecho y aplicando los productos obtenidos a una industria naciente como lo es la impresión 3D por deposición de filamento. Se planteo la elaboración de un biopolímero de ácido poliláctico a partir de desechos de aserrín de bambú y pulpa de café, empleando un método de extracción de celulosa para posteriormente emplear una polimerización autocatalítica empleando catalizadores inorgánicos, obteniéndose un 46.54 % de rendimiento para la producción de un biopolímero de bambu y 22.67 para el biopolímero de pulpa de café. Los cuales fueron extruidos a alta temperatura para obtener un filamento de dimensiones y morfología consistentes y apropiadas para su utilización subsiguiente.

Palabras clave: Polimerización, Celulosa, Catálisis, Vacío, Reutilización.

Abstract

The research proposal is based on the need to find accessible sources for the production of environmentally friendly biopolymers using waste materials and applying the resulting products to an emerging industry such as filament deposition 3D printing. The aim was to develop a polylactic acid biopolymer from bamboo sawdust and coffee pulp waste by employing a cellulose extraction method, followed by an autocatalytic polymerization method using inorganic catalysts. A yield of 46.54% was achieved for the production of a bamboo biopolymer, and 22.67% for the coffee pulp biopolymer. These were extruded at high temperatures to obtain a filament with consistent dimensions and morphology suitable for subsequent utilization

Keywords: Polymerization, Cellulose, Catalysis, Vacuum, Reuse.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

3 Introducción

Actualmente son miles las toneladas de plástico de diversos tamaños lo que contaminan nuestros océanos y que tienen un efecto devastador sobre la fauna marina y las aves. El ser humano, al estar en la cúspide de la pirámide trófica, no está exento de los peligros que conlleva esta grave contaminación (Estévez, 2013). Los plásticos tiene la terrible característica de una degradación demasiado lenta, lo cual, acompañado de una cultura de consumismo, carente de educación ambiental, ha llegado a generar un problema de contaminación multifactorial, en diversos sectores de la sociedad, ya que se han hallado microplásticos en todos los lugares del océano donde se han buscado, desde los sedimentos del lecho marino más profundo hasta los hielos flotantes del Ártico (que, según una estimación, a medida que se vayan fundiendo en la próxima década, podrían soltar al agua más de un billón de fragmentos de plástico) (Parker, 2018) Se considera que la cantidad de desechos que se han acumulado tiene la capacidad de cubrir por completo la superficie del planeta Tierra (McKie, 2016).

Considerando este problema, se han planteado diversas soluciones y alternativas que ayuden a reducir, combatir e idealmente, erradicar el problema. Dado que el plástico es un material tan versátil, resulta difícil imaginarse la vida sin utilizar plástico, sin embargo incursionar en la generación de biopolímeros más amigables con el ambiente permite seguir utilizando las bondades de estos materiales, sin el daño severo al ambiente, aun mas importante el establecimiento de protocolos y estándares para el reciclado y la implementación de una economía circular, permitiría en nuestro medio, impulsar la creación de métodos y formulaciones para generar biopolímeros, permitiendo un desarrollo sostenible en materia de manejo de desechos de biomasa y tratamiento de plásticos.

Dado el aumento en tecnologías para la fabricación de objetos tridimensionales en Guatemala, se convierte en una necesidad encontrar formas adecuadas para la generación de suministros de biopolímeros, así como mecanismos para reciclar este tipo de materiales.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

4 Antecedentes

Debido a la necesidad de establecer una economía mundial ambientalmente sostenible, el interés por los polímeros provenientes de fuentes de energía renovable ha ido incrementando en los últimos años. Es por ello que el PLA sobresale entre los bioplásticos, por sus características de biocompatibilidad, biodegradación, no toxicidad y versatilidad para aplicarse en diversas áreas. Por ello, se ha considerado importante definir una ruta efectiva hacia la producción de este polímero, desde la obtención de la materia prima, de donde se obtiene el ácido láctico, pasando por las metodologías de síntesis del PLA, hasta el momento de su uso y posterior biodegradación, buscando su utilización sostenible sea efectivamente posible y económicamente viable (de Albuquerque et al., 2021).

Figura 1 Resumen de metodologías para polimerización de ácido poliláctico.

S.No.	Polymer	Catalyst	Solvent(s)	Reaction temp. °C	Reaction time	Molecular weight	Reference
1	D,L PLA L-PLA	Al Isopropoxide	Toluene	70–100	Up to 100 hrs.	$M_n > 90,000$	Dubois et al. (35)
2	L-PLA	Stannous octoate	Glycerol	130	6 hrs.	$DP_n = 43-178$	Han et al. (36)
3	D-L PLA	Stannous octoate	Alcohols	200	60–75 min.	$M_n < 3,50,000$	Korhonen et al. (37)
4	L-PLA L-PLA	Stannous octoate	Alcohols, carboxylic acid	130	2–72 hrs.	$M_n < 250,000$	Zhang et al. (38)
5	D-L PLA	Stannous octoate	No solvent	130	72 hrs.	$M_n = 20,000-680,000$	Hyon et al. (39)
6	L-PLA	Stannous octoate and triphenylamine	No solvent	180–185	7 min.	$M_n = 91,000$	Jacobsen et al. (40)
7	L-PLA	Stannous octoate and compounds of titanium and zirconium	Toluene	180–235	15–180 min.	$M_n = 40,000-100,000$	Rafter et al. (41)
8	D-L PLA D-PLA	Stannous trifluoromethane sulphate, Scandium(III) trifluoromethane sulfonate	Ethanol	40–65	50–100 hrs.	$DP_n = 15-30$	Moller et al. (42)
9	L-PLA D-L PLA L-PLA	Sn substituted mesoporous silica molecular sieve	No solvent	130	72 hrs.	$M_n < 36,000$	Fattah et al. (43)
10	L-PLA	Mg, Al, Zn, Titanium alkoxides	Methylene chloride	100	—	$DP_n < 400$	Kricheldorf (44)
11	L-PLA	Yttrium tris(2,6-di-tert butyl phenolate) (in toluene)	2-propanol, butanol, ethanol	22	2–5 min.	$M_n < 25,000$	Stevens et al. (45)
12	D-L PLA	Butyl lithium, butyl magnesium (in hexane)	THF	—	30 min	$M_n < 45,000$	Kasperczyk et al. (33)
13	D-L PLA	Zn lactate	No solvent	140	96 hrs.	$M_n = 212,000$	Schwach et al. (46)
14	D-L PLA	Butylmagnesium, Grignard reagent	Ethers	0–25	4–8 days	$M_n < 300,000$	Kricheldorf et al. (47)
15	L-PLA	Potassium naphthalenide	THF, toluene	40	48–120 hrs.	$M_n < 16,000$	Stere et al. (48)
16	L-PLA	Complexes of iron with acetic, butyric, isobutyric and dichloroacetic acids	No solvent	170–210	0.5–25 hrs.	$M_n = 150,000$	Stolt et al. (49)
17	D-L PLA	(Trimethyl triazacyclohexane) praseodymium triflate	No solvent	120–200	18 hrs.	$M_n = 10,000-20,000$	Kohn et al. (50)
18	D-L PLA	Lanthanum isopropoxide	Dichloromethane/ toluene (70/30)	21	30 min.	$M_n = 5300-21,900$	Save et al. (51)
19	PLA (type not specified)	Lead monoxide, lead stearate, basic lead carbonate, antimony trioxide, zinc oxide, zinc borate, cadmium oxide, titanyl stearate, magnesium oxide and calcium formate	No solvent	140–180	10–111 hrs.	IV (in benzene) = 1.21	Schneider et al. (16)

Fuente: Mehta, R., Kumar, V., Bhunia, H. & Upadhyay, S. (2005). Synthesis of Poly(Lactic Acid): A Review. *Journal of Macromolecular Science*, 45(4), 325 -349.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Algunos polímeros biodegradables utilizados ampliamente, son el ácido poliláctico (PLA), alcohol polivinílico (PVA), polihidroxibutirato (PHB) y tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT). Al incorporar aditivos en sus estructuras, es posible modificar sus propiedades para diversas aplicaciones (Kalita et al., 2021).

5 Planteamiento del problema

La problemática que motivó esta investigación, es la contaminación causada por el plástico. Este material milagroso, ha hecho la vida moderna posible, pero más del 40% del mismo es de uno solo uso, y termina ahogando y dañando nuestros cuerpos acuáticos (Parker, 2018). Por más de 50 años, la producción y consumo global de plástico ha ido en aumento.

Para el 2008, se estimó que el consumo de plástico había sido de 260 millones de toneladas, y para el 2012, la Global Industry Analysts estimó que el consumo de plásticos para el 2015 alcanzaría las 297.5 millones de toneladas; sin embargo, en el 2013 se reportó un estimado de 299 millones de toneladas, incrementando en un 4%, con respecto al año anterior (Le Guern, 2018).

Los biopolímeros de ácido poliláctico presentan una menor persistencia en el ambiente y una degradación mayor en condiciones apropiadas, por lo que el estudio de fabricación y la evaluación de las características de este, partiendo de desechos de la industria de madera y cafetalera, presenta una solución a una problemática persistente a nivel mundial en cuanto a sostenibilidad y reducción de contaminantes en el ambiente.

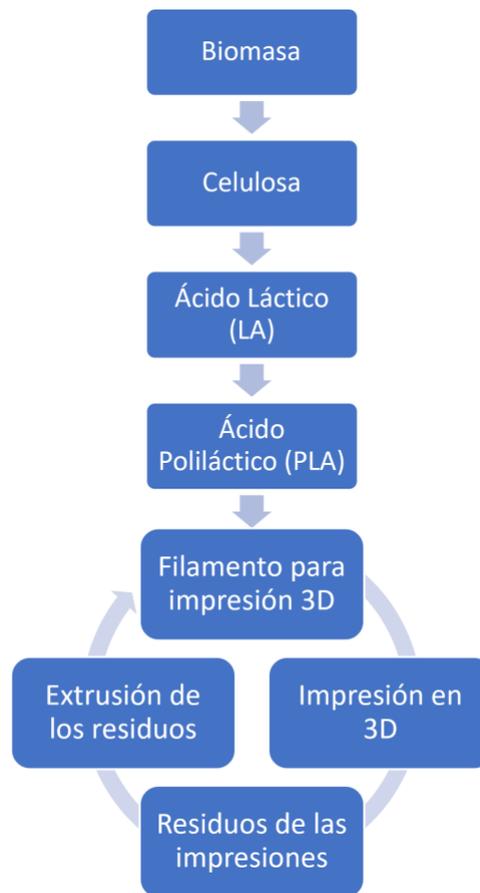
Diversos estudios internacionales han reportado avances en cuanto a la obtención de biopolímeros, centrándose en la adición de materiales y la síntesis de composites capaces de ser utilizados en impresión 3D y que permitan utilizar desechos celulósicos como materia prima. Sin embargo, Guatemala carece de una industria dedicada al estudio y/u obtención de biopolímeros que puedan ser utilizados en la tecnología de impresión 3D (Balla et al., 2021).

El objetivo final fue evaluar la viabilidad de generar biopolímeros de ácido láctico a partir de desechos de biomasa, e incorporar estos a un ciclo de economía circular, como medio

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

de promoción para la impresión 3D (figura 2), la cual ha demostrado ser una herramienta de suma importancia en ámbitos industriales, investigativos, docentes y artísticos, pues ha permitido obtener piezas especializadas para maquinaria y equipos, desarrollar equipo de laboratorio y elementos que faciliten la labor de investigadores y a estudiantes que han sido capaces de diseñar elementos necesarios para prácticas de campo y de laboratorio.

Figura 2 Diagrama del uso de desechos de biomasa y su incorporación a ciclo de economía circular para la impresión en 3D.



Fuente: Elaboración propia.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

6 Marco teórico

6.1 Polímeros

Los polímeros son macromoléculas de cadena larga, constituidos por unidades repetidas, denominadas monómeros, que se enlazan principalmente de forma covalente. Se han desarrollado diversas técnicas de polimerización, que permiten unir los monómeros con diferentes estructuras y morfologías, lo cual les confiere características particulares. Es por ello, que se utilizan en casi todas las áreas de la vida, ya que se puede controlar su cristalinidad, polaridad, estabilidad térmica, propiedades mecánicas, permeabilidad de gases, propiedades ópticas, solubilidad y funcionalización; acompañado también con el uso de aditivos y diversos métodos de procesamiento. Todo esto, permite desarrollar materiales poliméricos con diferente tamaño, diseño y función, de manera que son adecuados para aplicaciones específicas y diversas (Millican & Agarwal, 2021).

6.2 Plásticos

La palabra “plástico” hace referencia a determinados tipos de materiales sintéticos, derivados del petróleo, que se obtienen mediante el proceso de polimerización. La amplia variedad de aplicaciones de los plásticos, como se mencionó antes, se debe a sus propiedades, entre ellas, facilidad para moldear resistencia a la corrosión, resistencia a factores químicos y biológicos. impermeabilidad, baja densidad, baja conductividad eléctrica. Y sumado a todas las propiedades, el material resulta ser de bajo costo (Segura et al., 2007).

La producción de plástico ha florecido a una escala industrial, desde las décadas de 1940 y 1950, principalmente durante la II Guerra Mundial. Debido a su utilidad, la industria del plástico ha tenido un elevado crecimiento, generando avances, innovaciones y satisfacción de infinidad de necesidades, por lo que los plásticos se consumen masivamente, de manera que el 5% del total del petróleo extraído en el mundo se asigna a la industria del plástico (Meneses et al., 2007). Desde hace 20 años, la producción global anual de plástico ha ido aumentando, alcanzando los 299 millones de toneladas en el 2013 (Hahladakis et al., 2018);



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

y actualmente, se estima que la producción es mayor a 400 millones de toneladas métricas por año (Millican & Agarwal, 2021).

Los plásticos, se utilizan en fibras, hilos, láminas y películas, adhesivos, revestimientos, dispositivos biomédicos, textiles, construcción, electrónicos, agricultura, industria automotriz, aplicaciones del hogar, deportes, empaques, entre otros (Millican & Agarwal, 2021). La problemática con el plástico es su alta demanda y baja biodegradabilidad, lo cual genera acumulación de residuos. Esto, a la vez, se ve influenciado por la gran estabilidad estructural de los plásticos, lo que los hace muy resistentes a las agresiones del medio; además, son materiales livianos con un bajo costo, debido a su alta producción a escala industrial, características que los hacen productos muy demandados por las empresas y consumidores finales (Meneses et al., 2007).

Esta problemática, se comenzó a observar desde la década de 1970, pues aumentó la producción de plásticos desechables (generalmente de un solo uso). Esto, acompañado de la tendencia de descarte y la inadecuada gestión de eliminación de desechos, hizo evidente la acumulación en vertederos y contaminación excesiva, además de la detección de fragmentos plásticos en cuerpos de agua (Millican & Agarwal, 2021).

La demanda por los plásticos ha aumentado, y se estima que seguirá aumentando en los próximos años, por lo que la problemática continúa, ya que aumenta también la cantidad de desechos de material plástico. Aproximadamente, el 40% de los productos plásticos, tienen un tiempo de uso menor a 1 mes, lo cual genera más contaminación y dificultades en la gestión de los desechos. Actualmente, más del 65% de los desechos plásticos recolectados, son incinerados o terminan en vertederos, en donde se generan macro y microplásticos, como producto de la descomposición del material. Por tanto, se ha buscado innovar en la producción de materiales más amigables con el medio ambiente, desarrollando materiales a partir de fuentes naturales (bioplásticos), que tengan la capacidad de degradarse o reciclarse más fácilmente (Hahladakis et al., 2018; Millican & Agarwal, 2021).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

6.3 Búsqueda de Soluciones

La incineración de los plásticos, que se utiliza para eliminar estos desechos, resulta también en daños al medio ambiente, por las emisiones de CO₂, productos de combustión incompleta, y la liberación de compuestos químicos como cloruro y cianuro de hidrógeno (Segura et al., 2007).

Otra estrategia es el reciclaje, que consiste en la recolección, acopio, reprocesamiento y remercadeo de productos plásticos que se han considerado desecho. De igual forma, esta estrategia presenta sus inconvenientes, como el manejo adecuado, recolección, procesamiento, limpieza, selección y separación adecuada de los desechos plásticos. Además, no pueden ser reciclados indefinidamente, se pueden reciclar las veces que las condiciones físicas y químicas del plástico lo permitan (Segura et al., 2007). Se considera, que solo el 10% del plástico producido mundialmente es reciclado; el resto se desecha en vertederos (Bhatia et al., 2021).

La acumulación de desechos en vertederos es otra de las técnicas utilizadas para residuos en general. Esta técnica, se complementa con incineración, reciclaje y compostaje. Para los plásticos, se ha mencionado ya, que producen macroplásticos y microplásticos en los vertederos, además de liberar químicos como catalizadores, plastificantes, pigmentos, antioxidantes y demás sustancias utilizadas para su manufactura; tienen subproductos contaminantes al incinerarse; y el reciclaje es trabajoso y limitado. Por su parte el compostaje solo aplica para algunos bioplásticos, pero no para los plásticos derivados de petróleo (Kyrikou & Briassoulis, 2007).

Otra alternativa, es el desarrollo de nuevos materiales y métodos que permitan la formación de plásticos que posean las mismas características deseadas, pero con un tiempo de degradación corto. De esta idea, surgen los bioplásticos o biopolímeros, los cuales se sintetizan a partir de fuentes biológicas, como plantas, animales o microorganismos, y son biodegradables en el medio ambiente. La introducción de estos bioplásticos en la industria

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

química ha presentado esperanza en la reducción del impacto perjudicial de los plásticos derivados de petróleo (Bhatia et al., 2021; Kyrikou & Briassoulis, 2007).

6.4 Bioplásticos

Para abordar la crisis de los plásticos petroquímicos (derivados del petróleo), se ha propuesto reemplazarlos por plásticos elaborados a partir de fuentes naturales o biodegradables, los cuales son ambientalmente más amigables. La palabra bioplásticos, hace referencia a una clase de materiales que puede incluir, los plásticos elaborados a partir de materiales naturales o biológicos (bio-basados), que no necesariamente serán biodegradables; y plásticos petroquímicos o bio-basados que sí sean biodegradables. Estos últimos son el material ideal que se busca, pues los plásticos a partir de material biológico, llamados bioplásticos o biopolímeros, ayudan a reducir el uso de combustibles fósiles, y disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero, además de que permiten aprovechar la materia prima proveniente de biomasa residual (Xia et al., 2021). Adicionalmente, suelen presentar propiedades mecánicas y fisicoquímicas interesantes y novedosas (de Albuquerque et al., 2021).

6.5 Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés), es uno de los biopolímeros (o bioplásticos) considerados entre los mejores candidatos para diversas aplicaciones, gracias a sus propiedades, entre las que destacan su elasticidad, rigidez, comportamiento de termoplástico y buena capacidad para ser moldeado (de Albuquerque et al., 2021).

Diversos estudios han reportado que el ácido poliláctico (PLA), es un material que puede ser biodegradado en un corto periodo de tiempo bajo condiciones de compostaje, y en un periodo de tiempo más largo bajo condiciones del suelo (en vertederos). La biodegradación se lleva a cabo en dos pasos: degradación hidrolítica, en donde el PLA reduce su masa molar; y biodegradación, que puede ser realizada por microorganismos o enzimas, obteniendo como producto final biomasa, CO₂ y agua (Kalita et al., 2021; Xia et al., 2021).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Además de ser biodegradable, el ácido poliláctico se puede obtener a partir de materias primas renovables, como celulosa, almidón, ésteres de almidón, colágeno, acetato de celulosa, entre otros (Kyrikou & Briassoulis, 2007). Existe una variedad de materiales de fuentes naturales de descarte que pueden utilizarse, como caña de azúcar, maíz, papas, arroz, trigo, desechos de madera, bagazo de agave, bagazo de café, suero de queso, lixiviado de desechos municipales, aceites usados, pulpa de manzanas, e infinidad de opciones, todas ellas ricas en azúcares (Bhatia et al., 2021; Islam, 2012; Naser et al., 2021).

El precursor en la síntesis del ácido poliláctico es su monómero, el ácido láctico. Este es un importante bloque de construcción química, utilizado ampliamente en alimentos, farmacéuticos, cosméticos e industria química; su demanda ha aumentado, considerando su uso para la producción de bioplásticos, por lo que se han explorado diversas opciones para su obtención. Uno de los métodos más comunes, es la fermentación de azúcares, que requiere un pretratamiento de hidrólisis de celulosa para la obtención de glucosa; también puede realizarse por conversión química, utilizando iones metálicos en solución. En ambos casos, el ácido láctico se puede obtener a partir de las materias primas residuales mencionadas anteriormente (Wang et al., 2013). Otra alternativa para la obtención del ácido láctico, es su síntesis química, a partir de acetaldehído, la cual no es de las favoritas, ya que no permite el aprovechamiento de biomasa residual (de Albuquerque et al., 2021).

El ácido láctico, existe en dos formas ópticamente activas, los isómeros L y D. Dependiendo del método elegido para su obtención, se pueden tener mezclas de ambos isómeros, o se puede obtener uno de los dos selectivamente. Esto es importante, ya que la proporción cada isómero en el bioplástico afecta las propiedades del material. Los polímeros con mayor contenido del isómero L se utilizan para producir un material cristalino, mientras que niveles elevados del isómero D (>15%), resultan en un material amorfo (Mehta et al., 2006).

El primer reporte de la producción de ácido poliláctico, en 1932, indica que el proceso se realizó calentando el ácido láctico al vacío, mientras se eliminaba el agua condensada. Esta



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

primera técnica únicamente producía polímeros de bajo peso molecular. Actualmente, se utilizan otras técnicas, que permiten obtener un material de elevado peso molecular, con mejores propiedades. La síntesis del PLA inicia con la producción del ácido láctico, descrita anteriormente, seguido de la formación de lactida y finalmente la polimerización, que puede realizarse por policondensación del ácido láctico y por polimerización con apertura de anillo; o deshidratación azeotrópica con polimerización enzimática (de Albuquerque et al., 2021; Naser et al., 2021).

El biopolímero que se obtiene puede presentar diversas propiedades y funciones, dependiendo de diversos factores, como el método de síntesis utilizado, la proporción de isómeros L y D en su composición, y la inclusión de aditivos en la estructura. En general, el ácido poliláctico resulta ser un material prometedor, con diversas propiedades mecánicas deseables, como estabilidad térmica, facilidad de procesamiento, bajo impacto ambiental, además de ser el polímero biodegradable de más bajo precio. Puede procesarse por extrusión, moldes de inyección, moldes de soplado o hilatura, similarmente como otros termoplásticos. Se puede compostar e introducir en el ciclo natural de la biomasa. Entre otras propiedades interesantes, se tiene la termoplasticidad, barrera de gases, resistencia a los rayos UV, elasticidad, rigidez, hidrofobicidad y biocompatibilidad. La producción de PLA tiene un futuro prometedor, y tiene el potencial de sustituir los plásticos petroquímicos y otros polímeros biodegradables (de Albuquerque et al., 2021; Naser et al., 2021).

6.6 Aplicaciones del Ácido Poliláctico

El ácido poliláctico, debido a sus propiedades y bajo costo, busca ser el sustituto de plásticos petroquímicos, ya que además, es un material amigable con el ambiente. Se considera uno de los bio poliésteres con más alto potencial para envases y empaquetado, ya que su disponibilidad y facilidad de moldeo lo hacen una alternativa fuerte para los plásticos convencionales utilizados en la fabricación de vasos, botellas, platos, bandejas. Como se mencionó, resulta ser más amigable con el ambiente que otros plásticos destinados al mismo uso, como poliestireno (PS) o polipropileno (PP). Adicionalmente, se



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

considera que es ideal para el empaque de alimentos, ya que brinda protección contra humedad, luz, grasas y algunos gases, y la FDA lo considera un material seguro (Naser et al., 2021; Södergard, 2000).

Tiene aplicaciones médicas, tales como el desarrollo de estructuras porosas, como sustitutos para matrices extracelulares, vitales para la fijación de células, guía de crecimiento celular y mantenimiento de las características de la célula durante la regeneración de órganos o tejidos; biocompositos ortopédicos para implantes, considerando las ventajas del PLA de degradación espontánea en condiciones fisiológicas y eliminación de los efectos adversos de una segunda cirugía para remover implantes del cuerpo; acarreadores farmacéuticos, que permiten prevenir la degradación enzimática de fármacos al ser expuestos al ambiente biológico, así como también, la liberación lenta y controlada de los mismos; fibras para que pueden utilizarse como hilos para sutura reabsorbibles; equipo de protección personal para evitar enfermedades causadas por virus o microorganismos, ya que tiene la capacidad de actuar como barrera para algunos, en particular, se ha utilizado en caretas para la prevención del virus SARS-CoV-2; inmunosensores para detectar virus en conjunto con electrodos impresos en 3D. Adicionalmente, se puede mencionar su uso en cirugías oftalmológicas y reconstructivas craneofaciales y maxilofaciales, además del desarrollo de tornillos, broches, placas y grapas (de Albuquerque et al., 2021; De La Torre-Cantero et al., 2015; Serna et al., 2011).

Se utiliza también en la industria de agricultura, en la elaboración de películas para la protección de cultivos. Tiene potencial para sustituir al policarbonato (PC), ya que adicionalmente a su funcionalidad, el PLA presenta un precio más bajo, siendo adecuado para cubiertas o carcasas electrónicas y eléctricas. Y una de las aplicaciones más innovadoras, es su uso como filamento para impresiones 3D (De La Torre-Cantero et al., 2015; Naser et al., 2021).

Adicionalmente, en las aplicaciones donde el PLA no tiene las características adecuadas, se puede combinar con otros materiales para formar biocompositos, los cuales resultan en



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

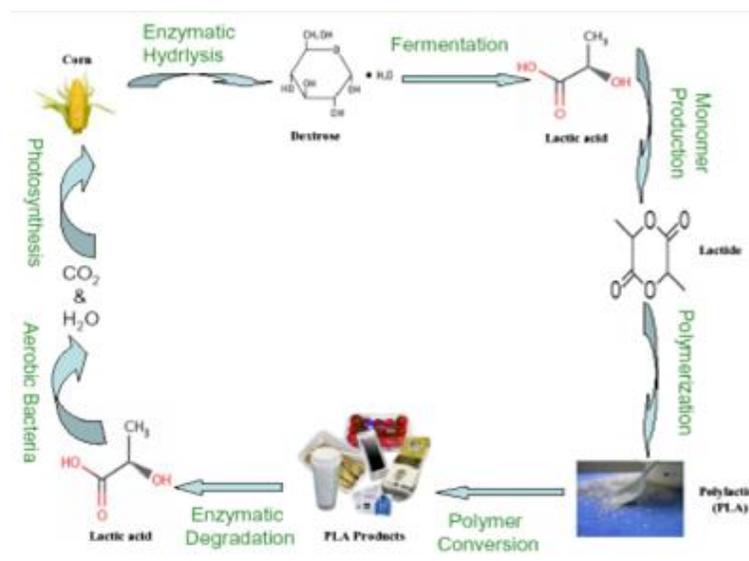
materiales con propiedades optimizadas y adecuados para aplicaciones específicas. Por lo tanto, además de las aplicaciones mencionadas, sigue habiendo infinidad de aplicaciones más por explorar, estudiar y desarrollar. La versatilidad del material abre las puertas para la implementación de técnicas de modificación que pueden mejorar casi a gusto sus propiedades. Estas técnicas pueden ser, incrementar o disminuir el peso molecular, mezclar con otros polímeros, usar plastificantes, adición de rellenos y fibras de refuerzo. Todo esto incrementa las posibilidades de lo que puede hacerse con el PLA (de Albuquerque et al., 2021; Naser et al., 2021)

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

7 Estado del arte

El polímero ácido poliláctico es una alternativa formidable como sustituto del plástico, pues además de ser biodegradable y producirse a partir de fuentes renovables, tiene la capacidad de fijar el dióxido de carbono, permite un ahorro de energía significativo, puede ayudar a la economía en las granjas, y se pueden mejorar sus propiedades físicas y mecánicas utilizando técnicas de arquitectura polimérica, tales como orientación, mezclas, ramificaciones, uniones cruzadas o plastificación (Islam, 2012) Sigue el ciclo de vida que se presenta en la figura 3.

Figura 3 Ciclo de la vida ecológicamente amigable del ácido poliláctico



Fuente: Islam, M. (2012). *Synthesis of Polylactic Acid for Biomedical, Food Packaging, Structural Applications*. University of Minho, Portugal: Nova Science Publishers

El ácido láctico, utilizado para la síntesis del ácido poliláctico, se puede obtener por síntesis química, o por rutas de fermentación microbiana. En ambos casos, pueden utilizarse subproductos de la industria agrícola, ricos en celulosa, tales como cáscaras de naranja, bagazo de la caña de azúcar, desechos de maíz, bagazo del café, desechos de trigo, cartón pretratado, madera, fibras de alfalfa, entre otros (de Albuquerque et al., 2021).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Posteriormente, el ácido láctico se polimeriza, para convertirse en PLA. Se utilizan dos métodos tradicionales: la policondensación directa y la policondensación por apertura del anillo. El primer método, se inicia con una oligomerización o deshidratación donde se esterifica por medio de una destilación reactiva al vacío y posteriormente, una segunda etapa de polimerización, en presencia de un catalítico a alta temperatura y vacío; en el segundo método, luego de una oligomerización homóloga, el oligómero sintetizado se depolimeriza con ayuda de un catalítico, y por destilación azeotrópica o sublimación, se obtiene el dímero cíclico del ácido láctico, el cual, se polimeriza posteriormente con calor, vacío y en presencia de un catalizador (Jimenez-Bonilla et al., 2012)

En la figura 3, se pueden apreciar diferentes métodos que pueden emplearse para obtener PLA a partir de ácido láctico, empleando catalizadores en la reacción. Puede observarse que es ampliamente utilizado el octanoato de estaño, así como diferentes sales inorgánicas, y que, en diferentes condiciones, se pueden obtener porcentajes de rendimiento considerablemente altos (Mehta et al., 2006).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

8 Objetivos

8.1 Objetivo General

Sintetizar un biopolímero de ácido láctico a partir de biomasa lignocelulósica empleando catalizadores inorgánicos, capaz de ser extruido en filamentos a alta temperatura.

8.2 Objetivos Específicos

- Determinar el grado de extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica proveniente de aserrín de bambú y pulpa de café.
- Emplear zinc (II) y bismuto (III), como catalizadores para la transformación de celulosa a un biopolímero de ácido poliláctico (PLA)
- Caracterizar el biopolímero mediante pruebas fisicomecánicas y químicas
- Extruir filamentos de ácido poliláctico empleando una extrusora comercial de alta temperatura

9 Hipótesis

H₁: Es posible emplear desechos de biomasa lignocelulósica para la obtención de un biopolímero de ácido poliláctico

H₀: No es posible emplear desechos de biomasa lignocelulósica para la obtención de un biopolímero de ácido poliláctico.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

10 Materiales y métodos

10.1 Delimitación en tiempo

11 meses de febrero a diciembre de 2023

10.2 Área geográfica

Laboratorio de fisicoquímica, edificio T12, facultad de ciencias químicas y farmacia

10.3 Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, pues fue posible cuantificar el rendimiento del biopolímero sintetizado a partir de desechos de biomasa, además de las pruebas de caracterización que permitieron contrastar los resultados contra valores reportados por la literatura especializada y clasificar de esta manera los productos finales obtenidos.

10.4 Métodos

La etapa inicial para la obtención del biopolímero de ácido poliláctico consistió en la selección de material lignocelulósico adecuado para dicho fin, así como la obtención de pulpa de café proveniente de desechos de la industria cafetalera. Estas materias primas fueron desecadas para reducir el porcentaje de humedad y aumentar el grado de conversión al producto final.

La extracción de celulosa varía levemente en ambas materias primas, siendo la más compleja los desechos de industria maderera, pues la composición de celulosa, lignina, extraíbles y hemicelulosa, presenta una serie de procedimientos para eliminar aquellos constituyentes interferentes, estos fueron eliminados mediante tratamientos químicos, empleando soluciones capaces de remover dichos compuestos, realizando lavados y filtraciones entre cada uno de los pasos descritos en la sección de técnicas.

Por otro lado, la obtención de celulosa a partir de pulpa de café, fue un proceso con menos pasos intermedios, requiriendo lavados para eliminar contaminantes, y extracciones en medios



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

alcalinos que favorezcan la eliminación de compuestos ajenos a la celulosa, para finalmente purificarla haciendo uso de una solución blanqueadora empleando clorito de sodio a bajas concentraciones.

Estos dos tipos de celulosa fueron transformados químicamente en ácido láctico, empleando dos catalizadores inorgánicos diferentes (zinc y bismuto), evaluando el rendimiento de cada uno, con los dos tipos de celulosa. Para ello se añadieron cantidades catalíticas de los metales en forma de nitratos, y se mantuvieron en un medio de reacción a 190° C durante un periodo de 4 horas, tras lo cual la temperatura se redujo de forma gradual, permitiendo la eliminación de agua y la condensación del ácido láctico resultante en oligómeros adecuados para la polimerización, principalmente lactidas.

A esta solución de oligómeros se le añadieron cantidades catalíticas del iniciador de polimerización; dado que el proceso es autocatalítico, se optó por utilizar lactato de zinc, como agente iniciador, el cual se añadió a un matraz de reacción purgado, donde los oligómeros reaccionaron, promoviendo la polimerización y la obtención de ácido poliláctico, se evaluaron 3 tiempos de polimerización, esperando que a mayor tiempo de reacción el polímero resultante incrementara sus propiedades fisicomecánicas, haciéndolo mejor candidato para la extrusión de filamentos a alta temperatura, empleando una extrusora comercial de PLA utilizadas para el reciclaje de desechos de filamentos de impresión 3D.

Los resultados de las pruebas fisicomecánicas y químicas fueron analizados mediante una prueba ANOVA con un nivel de significancia de 0.05, para determinar el impacto en la calidad de los biopolímeros en función de las condiciones iniciales, esto permitió establecer un modelo numérico descriptivo para la metodología propuesta y contrastarla con datos teóricos reportados en estudios cinéticos de polimerización.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

De forma paralela se planteó un análisis de dinámica molecular *in silico* empleando el software Groningen Machine for Chemical Simulation (GROMACS) con el objetivo de calcular la viscosidad teórica del polímero a 500 K en función del grado de polimerización empleando el modelo de Rouse (ecuación 1) y la relación de Einstein (ecuación 2), estos resultados fueron contrastados contra los obtenidos experimentalmente en el laboratorio.

Ecuación 1:

$$\eta = \frac{c\zeta(T)b^2N}{36}$$

Ecuación 2:

$$\eta = \frac{1V}{2K_B T} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} \left\langle \left(\int_{t_0}^{t_0+t} P_{xz}(t') dt' \right)^2 \right\rangle_{t_0}$$

10.5 Recolección de información

Universo: Aprovechamiento de desechos de la industria de madera (aserrín de bambú proveniente de subproductos de la elaboración de tableros laminados obtenidos en un proyecto de investigación por parte de la sección de Tecnología de la Madera, financiado por DIGI), y desechos de la industria cafetalera provenientes de la producción de café.

Sujeto de estudio: Desechos lignocelulósico y de la industria cafetalera, apropiados para la extracción de celulosa mediante métodos químicos, para su transformación en un biopolímero de ácido poliláctico.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

10.6 Técnicas e instrumentos

Extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica. Basado en (Esfahani et al., 2020)

Materiales

Reactivos

- Aserrín de bambú
- Benceno
- Etanol
- Agua destilada
- Hipoclorito de sodio
- Ácido acético
- Hidróxido de potasio

Cristalería

- Kitasato
- Embudo Büchner
- Vasos de precipitado de 250 mL
- Vasos de precipitado de 500 mL
- Probetas de 25 mL
- Probetas de 50 mL
- Balón aforado de 100 mL
- Balón Aforado de 250 mL

Equipo

- Micropipeta de 100 a 1000 uL
- Plancha de calentamiento y agitación
- Equipo de extracción soxhlet
- Horno de secado



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Secado de materia prima

La fuente de celulosa (aserrín), fue secada a 60° C durante 24 horas previo al inicio de la extracción.

Extracción soxhlet

Se realizó una extracción de ceras y compuestos extraíbles en un equipo soxhlet empleando una mezcla de benceno y etanol en una relación 2:1, a 155°C durante 5 horas. Al finalizar la extracción el material fue removido del matraz de reacción y secado a 60°C durante 24 horas.

Eliminación de ligninas y polisacáridos solubles en agua

La lignina y polisacáridos solubles en agua fueron eliminados mediante solubilización en agua destilada, la biomasa libre de ceras y extraíbles, fue dispersada en agua destilada con una relación 1:25 (g:mL), y mantenida a 80° C y agitación vigorosa durante 4 horas.

La biomasa fue aislada de la solución mediante filtración al vacío, tras lo cual fue secada a 60° C durante 24 horas.

Eliminación de lignina insoluble

Se eliminó empleando una solución acuosa de hipoclorito de sodio al 3 % p/p, agregando ácido acético al 10 % hasta un pH de 3.6, con una relación 1:20 (g:mL). Se mantuvo en agitación a 75° C durante 2 horas, tras lo cual se filtró al vacío y se realizaron lavados con agua destilada hasta un pH neutro. El sólido aislado fue secado a 60° C durante 24 horas.

Eliminación de hemicelulosa

La hemicelulosa fue eliminada empleando un tratamiento alcalino haciendo uso de una solución de KOH (18 % p/v) en una relación 1:20 (g:mL), manteniendo la solución en agitación durante 2 horas a temperatura ambiente. El sólido se aisló mediante filtración al vacío realizando lavados con etanol y agua destilada, hasta un pH neutro.

El producto final (celulosa pura) fue colectado y secado en un horno a 60° C durante 24 horas.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Extracción de celulosa a partir de pulpa de café. Basado en (El Achaby et al., 2019)

Materiales

Reactivos

- Pulpa de café
- Agua destilada
- Clorito de sodio
- Ácido acético glacial
- Hidróxido de sodio

Cristalería

- Kitasato
- Embudo Büchner
- Vasos de precipitado de 250 mL
- Vasos de precipitado de 500 mL
- Probetas de 25 mL
- Probetas de 50 mL
- Balón aforado de 100 mL
- Balón Aforado de 250 mL

Equipo

- Micropipeta de 100 a 1000 μ L
- Plancha de calentamiento y agitación
- Horno de secado

Preparación de materia prima

La pulpa de café seca fue triturada hasta reducir su tamaño a 2 milímetros, tras lo cual fue lavada durante 1 hora a 60° C en agitación vigorosa. Transcurrido este tiempo se añadió una



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

solución de NaOH al 4 % p/v, manteniendo agitación constante durante 2 horas a 80° C, tras lo cual fue secada durante 24 horas a una temperatura de 60° C.

Purificación

El producto secado fue tratado con una solución blanqueadora durante 2 horas a 80° C, repitiendo este procedimiento 3 veces, aislando mediante filtración al vacío en cada repetición.

Solución blanqueadora: esta se preparó añadiendo volúmenes iguales de un buffer de acetato (27 gramos de NaOH, 75 mL de ácido acético glacial aforado en un balón de 1 L con agua destilada) y clorito de sodio (1.7 % p/v de NaClO₂ en agua)

La celulosa obtenida fue lavada con agua destilada, hasta un pH neutro y secada a 60° C durante 24 horas.

Obtención de biopolímero de ácido poliláctico (PLA). Basado en (Milena Savioli Lopes et al., 2014; Wang et al., 2013)

Materiales

Reactivos

- Lactato de zinc (II)
- Nitrato de zinc (II)
- Nitrato de bismuto (III)
- Ácido láctico
- Celulosa
- Agua destilada

Cristalería

- Kitasato
- Embudo Büchner
- Vasos de precipitado de 250 mL



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Vasos de precipitado de 500 mL
- Probetas de 25 mL
- Probetas de 50 mL
- Balón de fondo redondo 100 mL
- Balón de fondo redondo 500 mL
- Corchos
- Mangueras de vacío

Equipo

- Micropipeta de 100 a 1000 μ L
- Micropipeta de 20 a 100 μ L
- Plancha de calentamiento y agitación
- Horno de secado
- Extrusora de filamentos de PLA

Conversión de celulosa a ácido láctico

La conversión de celulosa a ácido láctico se realizó empleando catalizadores inorgánicos (zinc (II) y bismuto (III)). Para ello, se utilizó una solución acuosa del catalizador seleccionado y la celulosa obtenida a partir de biomasa en una relación de 0.14 mmol de catalizador por cada 0.10 gramos de celulosa, dispersados en 20 mL de agua destilada. Esta mezcla fue agitada vigorosamente durante 4 horas a una temperatura de 190° C, tras lo cual la solución fue enfriada a temperatura ambiente de manera lenta, propiciando la eliminación de agua y la formación de oligómeros precursores para la polimerización.

Polimerización de ácido láctico a PLA

La polimerización del ácido láctico se promoverá mediante un método autocatalítico en presencia de zinc (II), para ello se utilizará el ácido láctico obtenido de los desechos de biomasa y lactato de zinc en una relación 5000:1, utilizando un sistema de reacción al vacío,



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

purgando de aire un matraz de reacción y añadiendo los componentes para la polimerización, se evaluarán diferentes tiempos de polimerización: 24 horas, 48 horas y 96 horas.

Extrusión de filamentos

La extrusión se llevará a cabo empleando una extrusora comercial utilizada para la obtención de filamentos para su utilización en impresoras 3D con tecnología de deposición.

Cantidades apropiadas de cada biopolímero obtenido serán añadidas para obtener filamentos de un largo adecuado para su caracterización física, considerando la morfología de estos, la resistencia y elasticidad

10.7 Procesamiento

10.8 Análisis de la Información

11 Aspectos éticos y legales (si aplica)

Si la propuesta de investigación requirió opinión favorable de un comité de bioética debidamente constituido en la Usac, así como permisos, registros o licencias de instituciones del Estado (Idaeh, Conap, Marn, etc.), adjuntar lo correspondiente en este apartado.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

12 Resultados y discusión

12.1 Resultados

Partiendo de materia prima, considerada desecho por parte de las industrias del bambú y cafetaleras, esta se adecuó a los parámetros requeridos para la obtención de celulosa mediante un método de hidrólisis básica, incluyendo: limpieza de materiales ajenos, tamizaje y molienda para uniformar el tamaño de las fibras, el porcentaje de extracción para ambas materias primas se reporta en la tabla 1, así como la desviación estándar asociada considerando 5 repeticiones del proceso extractivo.

Tabla 1

Rendimiento de extracción de celulosa a partir de materia prima

Materia prima	Humedad	Desviación estándar (s)	Porcentaje de extracción (%)	s
Aserrín de bambú	11.473	0.04677606	68.30 %	2.621068484
Pulpa de café	12.24833333	0.39679255	26.67 %	2.081665999

La tabla 1 presenta el rendimiento de extracción total de celulosa, para cada una de las materias primas analizadas, reportándose la desviación estándar asociada considerando el número de repeticiones.

Considerando el diseño experimental sugerido, se contempló el uso de catalíticos inorgánicos de bajo costo, para lo cual se analizaron 3 candidatos de características electrónicas semejantes en la capa de valencia descritos en la Tabla 2.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Tabla 2

Formación de polímero PLA en función del catalítico

Fuente de celulosa	Catalizadores		
	Oxido de zinc (ZnO)	Cloruro de estaño (II) (SnCl ₂)	Oxido de magnesio (MgO)
Aserrín de bambú	+	-	-
Pulpa de café	+	-	-

La Tabla 2 resume el impacto del catalizador metálico en la formación del polímero a partir de celulosa, indicando mediante el símbolo de más (+) una formación positiva del polímero, y un símbolo menos (-) indica que el polímero no fue obtenido.

En la Tabla 3 se resumen los diferentes procesos de polimerización llevados a cabo, encontrándose condiciones propicias para la formación de ácido láctico y posteriormente la polimerización del mismo en ácido poliláctico, variando la temperatura y presión del sistema.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Tabla 3

Iteraciones de polimerizaciones evaluadas

Fuente de celulosa	Temperatura (°C)	Presión (mmHg)	Obtención de polímero	Rendimiento de polímero por cada 100 gramos de materia prima (%)
Aserrín de bambú	120	760	-	-
		300	++	-
	170 - 190	760	-	-
		300	+++*	46.54
Pulpa de café	120	760	-	-
		300	+	-
	170 - 190	760	-	-
		300	+++*	22.67

La Tabla 3 presenta las diferentes condiciones evaluadas durante el proceso de polimerización, indicando con el signo más (+) las combinaciones exitosas y con menos (-) las síntesis no exitosas para la obtención del polímero PLA, mayor cantidad de signos indican mejores rendimientos

*Los cálculos de rendimiento se calculan sobre esta polimerización por ser la de mayor eficiencia

Análisis de biopolímeros

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las pruebas de solubilidad, dada la naturaleza de las estructuras químicas, este parámetro permitió evidenciar la presencia de impurezas y subproductos de las reacciones, comparando el comportamiento de los biopolímeros obtenidos, contra PLA de origen comercial.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Tabla 4

Pruebas de solubilidad

Biopolímero	Solubilidad		
	Acetona	Agua	Cloroformo
B-PLA	+	-	+
C-PLA	+	-	+
PLA comercial	+	-	+

La Tabla 4 presenta las pruebas de solubilidad realizadas a los dos biopolímeros sintetizados, así como al PLA comercial como comparación.

(+), resultado positivo

(-), resultado negativo

Continuando con la descripción de los resultados fisicomecánicos, en la Tabla 5 se reportan los parámetros evaluados, así como la desviación estándar asociada, considerando 5 repeticiones en los valores que así lo requieran, encontrándose valores semejantes entre los diferentes filamentos.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Tabla 5

Propiedades fisicomecánicas de filamentos extruidos

Biopolímero	T. de fusión (°C) *	Diámetro (mm)	s	Tensión (MPa)	s
B-PLA	138.2	1.3	0.1	10.1814716	0.37859389
C-PLA	122.4	1.1	0.057735	10.250291	0.321455025
PLA comercial	144.8	1.2	0.057735	20.79619727	0.1

En la Tabla 5 se reportan las propiedades fisicomecánicas utilizadas para comparación contra el filamento PLA comercial.

*La temperatura reportada indica el punto de ablandamiento de los materiales evaluados

La Figura 4 presenta fotografías macro de la superficie de los polímeros evaluados, observándose imperfecciones en la superficie causadas por exceso de humedad en los materiales (4a), parámetros de control (4b) así como diferentes morfologías en las impurezas, llegándose a encontrar pequeñas burbujas de vapor de agua atrapado en la superficie de los filamentos (4c y 4d).

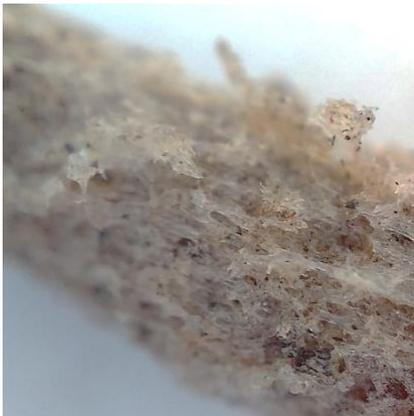


Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

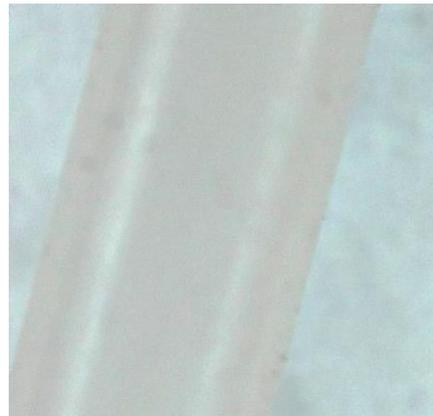
Figura 4

Fotografías macroscópicas de filamentos analizados

4a



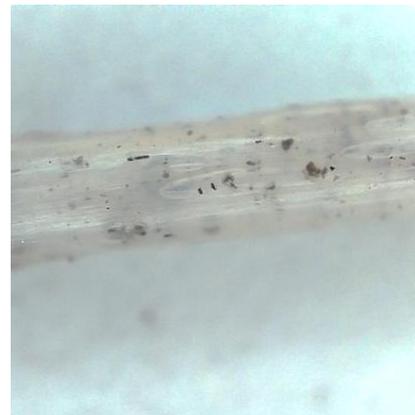
4b



4c



4d



La Figura 4 presenta fotografías macroscópicas de los filamentos extruidos y analizados

4a) Filamento con alto contenido de humedad

4b) Filamento PLA comercial extruido en laboratorio (patrón de comparación morfológico)

4c) Filamento de PLA de bambú

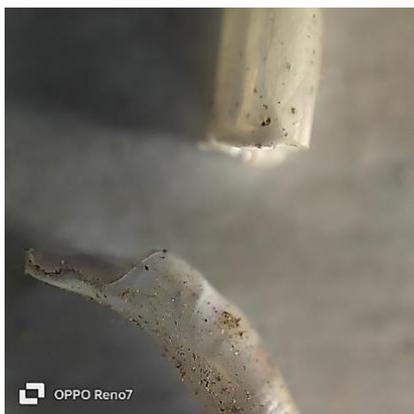
4d) Filamento de PLA de pulpa de café

Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Figura 5

Fotografías macroscópicas de filamentos analizados para determinar tensión máxima

5a



5b



5c



5d



La Figura 4 presenta fotografías macroscópicas de los filamentos extruidos y analizados

5a) Filamento de bambú ensayado para prueba de tensión

5b) Detalle de la ruptura de filamento de bambú

5c) Filamento de café

5d) Filamento de café



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

En la Tabla 6 se presenta el análisis estadístico de los resultados fisicomecánicos, reportados en la Tabla 5, demostrando la consistencia que existe entre las diferentes variables analizadas para los 3 filamentos reportados en la Tabla 5.

Tabla 6

Análisis de varianza

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Filas	107.76388	2	53.8819401	1.85865185	0.21729473	4.45897011
Columnas	41779.4719	4	10444.868	360.294621	4.623E-09	3.83785335
Error	231.918377	8	28.9897971			
Total	42119.1542	14				

Análisis de varianza realizado a las propiedades fisicomecánicas evaluadas para los polímeros sintetizados, contrastados contra el PLA comercial

La Figura 5 presenta los filamentos obtenidos mediante extrusión a alta temperatura, cortados en tramos de 10 centímetros, para evidenciar las variaciones morfológicas apreciadas durante la extrusión

Figura 6

Filamentos obtenidos mediante extrusión a alta temperatura

6a



6b



La Figura 6 presenta fotografías de los filamentos extruidos obtenidos a partir de bambú y café

6a) Filamento de PLA proveniente de aserrín de bambú

6b) Filamento de PLA proveniente de pulpa de café



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

12.2 Discusión de resultados

En la actualidad los polímeros plásticos se encuentran dentro de los materiales más utilizados por la sociedad, en prácticamente todos los niveles socioeconómicos e industriales (Mehmood et al., 2023)., sin embargo el impacto ambiental tanto en la producción como la reutilización de estos, ha desbocado en la crisis de plásticos que actualmente atraviesa nuestra sociedad, es aquí donde los biopolímeros cobran relevancia pues se presentan como alternativas de menor impacto ambiental y propiedades tales como: bajo costo de fabricación, alta durabilidad y en el mejor de los casos reutilización o degradación adecuada, respecto al polímero de ácido poliláctico (PLA), este puede degradarse mediante distintas vías, siendo la menos contaminante la biodegradación, esta se divide en procesos enzimáticos y no enzimáticos (Maharana et al., 2009).

El monómero del ácido poliláctico, llamado ácido láctico puede ser obtenido de diferentes fuentes de origen natural, como almidones o azúcares mediante procesos de refinamiento o por vías sintéticas (Hoque et al., 2021; M R et al., 2020; Oladele et al., 2021). En esta sección presentamos los resultados obtenidos de la polimerización de ácido láctico, obtenido a partir de la hidrólisis de celulosa, empleando compuestos inorgánicos y cantidades catalíticas de ácido láctico, en un proceso de autocatálisis para la obtención de un biopolímero de ácido poliláctico a partir de fuentes de celulosa desechadas por las industrias madereras y cafetaleras. En la Tabla 1 se presentan los resultados del primer paso en la obtención del biopolímero, el cual consiste en la extracción de celulosa a partir de aserrín de bambú y pulpa seca de café, se presenta el porcentaje de humedad presente en las muestras previas a someterse al proceso de hidrólisis básica, este parámetro influye directamente en el grado de cristalinidad de la celulosa obtenida (Karim et al., 2023) y la calidad del producto, sin embargo debido a la naturaleza de la investigación (el proceso industrial no contempla el grado de cristalinidad ni la separación de hemicelulosa), este valor fue utilizado para los cálculos de rendimiento de la celulosa obtenida, se reporta porcentajes de humedad de XX % para el bambú y XX para el café. De igual forma la Tabla 1 presenta el porcentaje de extracción para ambas materias primas, encontrándose para el aserrín de bambú de la especie *Dendrocalamus asper* un porcentaje de



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

extracción de celulosa correspondiente a 68.30 %, la literatura reporta un valor máximo de celulosa de 73.8 % (*Thermal properties of bamboo cellulose isolated from bamboo culms and shoots*, s. f.). Mientras que para la extracción de celulosa de pulpa de café se obtuvo un rendimiento de 26.67 %, la literatura especializada reporta para la pulpa de café una composición de 31.26 % de celulosa en total, en ambos casos se reporta una desviación estándar asociada, obtenida de las 5 repeticiones contempladas.

El proceso de polimerización de ácido láctico a partir de celulosa involucra diversos pasos intermedios desde la escisión de enlaces entre azúcares para formar hexosas así como el rompimiento de estos azúcares en intermediarios C3, para posteriormente interconvertirse en ácido láctico, la literatura especializada reporta diferentes mecanismos de reacción, los cuales suelen requerir presiones reducidas o aumentadas, y el uso de catalizadores inorgánicos. La función de estos es ayudar a estabilizar estructuras y promover el rompimiento de intermediarios C4 a C3, los cuales son precursores del ácido poliláctico (Deng et al., 2018).

La Tabla 2 presenta los diferentes catalizadores utilizados en el estudio, estos catalíticos fueron evaluados para la transformación en ácido láctico y la polimerización subsiguiente en el mismo sistema de reacción, para ello se planteó un proceso de autocatálisis, formando in situ el Lactato de Zinc, Lactato de Estaño y Lactato de Magnesio, de los 3 catalizadores utilizados únicamente el Óxido de Zinc (ZnO) obtuvo resultados favorables para el rompimiento de la celulosa y la formación del polímero de ácido poliláctico, la literatura reporta este compuesto como adecuado para la reacción catalítica entre glucosa y ácido láctico, bajo condiciones de alta temperatura (Xu et al., 2022), sin embargo su utilización para la transformación de celulosa no se encuentra reportada.

Las condiciones de reacción para la síntesis autocatalítica fueron evaluadas y reportadas en la Tabla 3, se consideraron como variables la temperatura y la presión atmosférica dentro del sistema de reacción (presentado en apéndices) se encontró una alta dependencia de la presión y la temperatura, siendo las condiciones óptimas para el proceso una presión reducida (inducida por alto vacío) a 300 mmHg y una temperatura en el rango de 170 a 190 °C, utilizando como estabilizador de la temperatura un baño de arena rica en sílice, para lograr un



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

desplazamiento adecuado de la reacción se armaron sistemas de reacción capaces de eliminar agua del medio mediante destilación lo cual favoreció la formación del biopolímero. Este comportamiento concuerda con lo reportado por la literatura para la policondensación directa en vacío empleando presiones de 200 mmHg y destilación azeotrópica (Milena Savioli Lopes et al., 2014).

Respecto a los resultados obtenidos de los biopolímeros extruidos, estos se reportan en la sección correspondiente en los resultados, la Tabla 4 presenta los resultados de la prueba de solubilidad, esta se utilizó en primera instancia para la determinación del nivel de impurezas y compuestos ajenos al polímero, determinándose que el comportamiento de solubilidad de los 2 biopolímeros sintetizados (bambú y café) poseen comportamiento similar al PLA comercial, concordando con la literatura de solubilidad especializada (Abdullah et al., 2019)

La tabla 5 presenta las propiedades fisicomecánicas evaluadas para los 2 filamentos obtenidos, así como PLA comercial extruido en la misma maquinaria (con la finalidad de homogeneizar los diámetros), se reporta la temperatura de ablandamiento del filamento, el diámetro obtenido mediante la extrusora a alta temperatura, así como la tensión soportada por los filamentos, el análisis estadístico ANOVA de dos factores y múltiples muestras por grupo reportado en la Tabla 5, los valores F y F crítico, demuestran que no existe una diferencia estadística significativa entre los biopolímeros sintetizados y el polímero comercial.

Los filamentos extruidos fueron analizados morfológicamente empleando fotografías macroscópicas, estas se encuentran reportadas en la Figura 4, la figura 4a presenta el filamento de bambú extruido, apreciándose imperfecciones en su superficie, las pruebas de extrusión de este filamento permitieron observar que las deformaciones son producto de humedad residual en el material, la fotografía 4b corresponde al filamento comercial extruido en el extrusor a alta temperatura y presenta un filamento sin imperfecciones, las fotografías 4c y 4d corresponden a filamentos de bambú y café respectivamente, para el filamento de bambú se aprecian contaminación de fibras largas, parcialmente hidrolizadas y un filamento con mayor consistencia, mientras que para el filamento de café se observan imperfecciones más pequeñas pero de mayor presencia a lo largo del filamento, así como burbujas de aire integradas dentro



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

de la estructura del filamento, en todos los casos se utilizaron temperaturas de extrusión de: 200 °C en la cámara de precalentamiento así como en el extrusor, esto por recomendación del fabricante al extruir filamentos compuestos, La Figura 5 presenta fotografías macroscópicas de la prueba de tensión realizada a los filamentos extruidos, apreciándose el detalle de la ruptura.

Finalmente, la Figura 6 presenta fotografías de los filamentos obtenidos, pudiéndose apreciar variaciones morfológicas, en los filamentos obtenidos, esto causado por la alimentación en la tolva de carga de material así como la caída del material hasta el tornillo sin fin del extrusor, el filamento fue seccionado en tramos de 10 centímetros para evidenciar estas variaciones, debido a la optimización de procesos y normalización y regularización, los parámetros de extrusión deben optimizarse para obtener filamentos que cumplan con los requerimientos de normativas pertinentes.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

13 Conclusiones

Fue posible sintetizar biopolímeros a partir de biomasa lignocelulósica provenientes de aserrín de bambú y pulpa seca de café, empleando un método autocatalítico con compuestos inorgánicos

Fue posible utilizar una extrusora a alta temperatura para la obtención de filamentos basados en biopolímeros de bambú y café

14 Recomendaciones

Debido a la naturaleza de la pulpa de café contienen una gran cantidad de sustancias que son solubles en agua por lo que se pueden retirar al dejar remojando la pupa antes de la degradación lo que disminuye la cantidad de agua que se utiliza en el lavado de la celulosa disminuyendo el costo de las degradaciones y el tiempo en el lavado.

Al realizar la extrusión del ácido polilactico polimerizado a partir de fuentes de celulosa el contenido de humedad daña la extrusión del filamento provocando daños debido a las burbujas formadas por el agua que se evapora dentro del filamento llegando a expandirse y no logrado la formación del filamento por lo que el contenido de humedad es muy importante mantenerlo lo más bajo posible antes de la extrusión.

Al realizar mezclas con ácido polilactico reciclado y el polimerizado a partir de fuentes de celulosa existe una segregación debido a la forma y densidad de los materiales a pesar de ser de la misma naturaleza, por lo que se recomienda realizar una homogenización de los materiales antes colocarlos en la tolva del extrusor de plásticos.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Al ver los filamentos con un aumento se aprecian impurezas mayormente en el ácido polilactico proveniente del café debido a la mezcla de pulpa que está contaminada con granos de café y tierra por lo que se recomienda una reducción del diámetro de partícula de la pulpa y utilizar un tamizaje para quitar los diámetros finos dejando solo la pulpa.

Se recomienda utilizar antes de las degradaciones básicas reduciendo las impurezas de la muestra utilizando un medio mecánico para no tener diámetros grandes como grumos que dificultan la acción de las soluciones de hidróxido de sodio dejando pulpa sin degradar.

Para tener una mejor calidad en la celulosa se necesita realizar una cloración, para tener una mejor calidad en la celulosa proveniente del bambú se necesita una concentración mayor que la establecida en el método mejorando el tono de la celulosa.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

15 Referencias

- Abdullah, A. H., Fikriyyah, A., Putri, O. D., & Asri, P. (2019). Fabrication and Characterization Of Poly Lactic Acid (PLA)-Starch Based Bioplastic Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 553, 012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/553/1/012052>
- Bhatia, S. K., Otari, S. V., Jeon, J.-M., Gurav, R., Choi, Y.-K., Bhatia, R. K., Pugazhendhi, A., Kumar, V., Rajesh Banu, J., Yoon, J.-J., Choi, K. Y., & Yang, Y. H. (2021). Biowaste-to-bioplastic (polyhydroxyalkanoates): Conversion technologies, strategies, challenges, and perspective. *Bioresource Technology*, 326, 124733. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124733>
- de Albuquerque, T. L., Marques Júnior, J. E., de Queiroz, L. P., Ricardo, A. D. S., & Rocha, M. V. P. (2021). Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 933–951. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.07.074>
- De La Torre-Cantero, J., Saorín, J. L., Meier, C., Melián-Díaz, D., & Drago-Díaz, M. (2015). Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. *Arte, Individuo y Sociedad*, 27(3), 429–446. https://doi.org/10.5209/REV_ARIS.2015.V27.N3.45864
- Deng, W., Wang, P., Wang, B., Wang, Y., Yan, L., Li, Y., Zhang, Q., Cao, Z., & Wang, Y. (2018). Transformation of cellulose and related carbohydrates into lactic acid with bifunctional Al(III)–Sn(II) catalysts. *Green Chemistry*, 20(3), 735–744. <https://doi.org/10.1039/C7GC02975F>
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.10.014>



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

- Hoque, M., Rayhan, A., & Shaily, S. (2021). Natural Fiber-based Green Composites: Processing, Properties and Biomedical Applications. *Applied Science and Engineering Progress*, 14. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.09.005>
- Islam, M. (2012). Synthesis of Polylactic Acid for Biomedical, Food Packaging and Structural Applications: A Review. In V. Piemonte (Ed.), *Polylactic acid : synthesis, properties and applications* (pp. 219–233). Nova Science Publishers, Inc.
- Jimenez-Bonilla, P., Sibaja, M., & Vega-Baudrit, J. R. (2012). Síntesis y caracterización de poli(ácido L-lactico) por policondensación directa, obtenido del fermento de desechos agroindustriales de banano (*Musa acuminata* AAA Variedad Cavendish Cultivar Gran naine) en Costa Rica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(2), 52–59.
- Kalita, N. K., Sarmah, A., Bhasney, S. M., Kalamdhad, A., & Katiyar, V. (2021). Demonstrating an ideal compostable plastic using biodegradability kinetics of poly(lactic acid) (PLA) based green biocomposite films under aerobic composting conditions. *Environmental Challenges*, 3, 100030. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100030>
- Karim, F.-E.-, Islam, Md. R., Ahmed, R., Siddique, A. B., & Begum, H. A. (2023). Extraction and characterization of a newly developed cellulose enriched sustainable natural fiber from the epidermis of *Mikania micrantha*. *Heliyon*, 9(9), e19360. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19360>
- Kyrikou, I., & Briassoulis, D. (2007). Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(2), 125–150. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0053-8>
- Maharana, T., Mohanty, B., & Negi, Y. (2009). Melt–solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. *Progress in Polymer Science*, 34, 99-124. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.10.001>
- Mehmood, A., Raina, N., Phakeenuya, V., Wanganu, B., & Cheenkachorn, K. (2023). The current status and market trend of polylactic acid as biopolymer: Awareness and needs



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3049-3055.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.387>

Mehta, R., Kumar, V., Bhunia, H., & Upadhyay, S. N. (2006). Synthesis of Poly(Lactic Acid): A Review. *Journal of Macromolecular Science, Part C*, 45(4), 325–349.
<https://doi.org/10.1080/15321790500304148>

Meneses, J., Corrales, C. M., & Valencia, M. (2007). Síntesis y Caracterización de un Polímero Biodegradable a partir del Almidón de Yuca. *Revista EIA*, 8, 57–67.

Milena Savioli Lopes, Andre Jardini, & Rubens Maciel Filho. (2014). Synthesis and characterizations of poly (lactic acid) by ring-opening polymerization for biomedical applications. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 331-336.
<https://doi.org/10.3303/CET1438056>

Millican, J. M., & Agarwal, S. (2021). Plastic Pollution: A Material Problem? *Macromolecules*, 54(10), 4455–4469.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02814>

M R, S., Siengchin, S., & Dhakal, H. (2020). Green-composites: Ecofriendly and Sustainability. *Applied Science and Engineering Progress*, 13.
<https://doi.org/10.14416/j.asep.2020.06.001>

Naser, A. Z., Deiab, I., & Darras, B. M. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. *RSC Advances*, 11(28), 17151–17196. <https://doi.org/10.1039/D1RA02390J>

Oladele, I., Omotosho, T., Ogunwande, G., & Adebayo, F. (2021). A Review on the Philosophies for the Advancement of Polymer-based Composites: Past, Present and Future Perspective. *Applied Science and Engineering Progress*.
<https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.08.003>

Thermal properties of bamboo cellulose isolated from bamboo culms and shoots: BioResources. (s. f.). Recuperado 27 de noviembre de 2023, de



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/>

Segura, D., Noguez, R., & Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *Biotecnología*, 14.

Serna, L., Rodríguez, A., & Albán, F. (2011). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 16–26.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>

Södergard, A. (2000). Lactic acid based polymers for packaging materials for the food industry . *The Food Biopack Conference*.

Wang, Y., Deng, W., Wang, B., Zhang, Q., Wan, X., Tang, Z., Wang, Y., Zhu, C., Cao, Z., Wang, G., & Wan, H. (2013). Chemical synthesis of lactic acid from cellulose catalysed by lead(II) ions in water. *Nature Communications* 2013 4:1, 4(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3141>

Xia, Q., Chen, C., Yao, Y., Li, J., He, S., Zhou, Y., Li, T., Pan, X., Yao, Y., & Hu, L. (2021). A strong, biodegradable and recyclable lignocellulosic bioplastic. *Nature Sustainability* 2021 4:7, 4(7), 627–635. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00702-w>

Xu, H., Ye, X., Shi, X., Zhong, H., He, D., Jin, B., & Jin, F. (2022). ZnO as a simple and facile catalyst for acid-base coordination transformation of biomass-based monosaccharides into lactic acid. *Molecular Catalysis*, 522, 112241.
<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2022.112241>



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

16 Apéndice



Aserrín y celulosa de bambú proveniente de laminados



Muestra de pulpa de café, celulosa y ácido poliláctico y su extrusión como filamento



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Pesando pulpa de café para la degradación básica





Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Secado celulosa para determinar su rendimiento de extracción



Secado de celulosa proveniente de laminado de bambú



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Midiendo la temperatura en el proceso de degradación de pulpa de café



Midiendo la temperatura en el proceso de degradación de aserrín de bambú



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Aforando soluciones de hidróxido de sodio para las degradaciones



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Muestra de pulpa de café después antes de ser lavada de la primera degradación





Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Muestra de pulpa de café antes de ser sometida al primer banqueo con soluciones de cloro



Pesando el catalizador para que se dé la reacción de síntesis del ácido poliláctico



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Pruebas de solubilidad del polímero





Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Secado de las primeras pruebas de síntesis de ácido polilactico



Midiendo la presión reducida en los equipos de síntesis del ácido poliláctico



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Muestra de celulosa en la desecadora



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Determinando el contenido de humedad inicial en pulpa de café



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Determinando el contenido de humedad inicial de aserrín de bambú



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Discutiendo resultados de rendimientos de degradación



Equipo de extrusión de filamentos utilizado para la extrusión de ácido poliláctico



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023



Agregando material compuesto para extrusión de filamentos de asido poliláctico reciclado y asido poliláctico sintetizado a partir de aserrín de bambú





Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Agregando ácido poliláctico proveniente del aserrín de bambú proveniente de laminados



Revisando la extrusión de ácido poliláctico



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

17 Vinculación

Vinculación con la Universidad Galileo y el Instituto de Recursos Energéticos IRE con la directora: Inga. Lourdes Socarras Mérida y el coordinador: Lic. Cristian Fernando Guzmán Quaharre Vinculación con el Laboratorio de impresión 3D Innovation Support Office con el Ingeniero Luís Jiménez Vinculación con Fab Lab (Fabrication Laboratory) de la Universidad de San Carlos de Guatemala con el coordinador Ingeniero Jorge Augusto Balsells Orellana Informe final de proyecto de investigación. Año 2023 65 “La Usac investiga para el bienestar de las personas y el desarrollo sustentable” Colaboración con el Beneficio de café La Esperanza de la Antigua Guatemala con el Ingeniero Jonathan Pereira Colaboración con el Centro de Transformación e Investigación de Bambú en Villa Nueva Guatemala

18 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

En la filiación debe de anotarse la Universidad de San Carlos de Guatemala. Caso contrario no se concederá nuevos financiamientos de ninguna índole.

Presentación de ponencia en el VII Congreso Nacional de Química realizado en las instalaciones de MUSAC, zona 1 de la Ciudad de Guatemala.

19 Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) identificando su meta correspondiente:

A pesar de lo múltiples beneficios del plástico en la sociedad actual, es necesario incursionar en la producción de polímeros con menos impacto sobre el ambiente, idealmente aquellos que posean tiempo de degradación relativamente bajos y cuyos constituyentes y propiedades químicas permitan una producción local y un ciclo de reciclaje apropiado.

Los resultados contenidos en esta investigación benefician de manera directa al tratamiento de desechos de biomasa, añadiendo valor agregado a dichos desechos y permitiendo que crezca una economía y/o industria alrededor de la síntesis de biopolímeros; se provee conocimiento y técnicas poco extendidas en nuestro medio que influyen en nuevas tecnologías, como lo es la



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

impresión 3D, permitiendo que público en general, estudiantes e investigadores, puedan acceder a estos recursos que abarcan desde producción artesanal, hasta la docencia pues es posible incursionar en el diseño de equipo especializados.



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

20 Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente al 31 de diciembre de 2023)

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
Mauricio Valentino Rivera Tello	Investigador	20141714	Si	
José Carlos Marroquín	Auxiliar de investigación II	20230882	Si	

21 Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

<p>M.Sc. Erick Estrada</p> <p>Coordinador del proyecto de investigación</p>	
---	---



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Fecha: 27/11/2023

22 Aval de la Directora del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: Director del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Vo.Bo. Dra. María Eunice Enríquez Cotton. Directora de IIQB</p>	
<p>Fecha: 27/11/2023</p>	

23 Visado de la Dirección General de Investigación

<p>Vo.Bo. Inga. Liuba María Cabrera Ovalle de Villagrán Cabrera Coordinadora del Programa Universitario de</p>	 Firma
---	---



Informe final de proyecto de investigación. Año 2023

Investigación	
Fecha: 27/11/2023	

<p>Vo.Bo. Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Coordinador General de Programas Universitarios de Investigación</p>	 Firma <p>Ing. MARN Julio Rufino Salazar Pérez Coordinador General de Programas de Investigación, Digi-Usac</p>
Fecha: 27/11/2023	

/Digi2023