

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**APROVECHAMIENTO DE FARINÁCEOS ECUATORIANOS PARA
LA ELABORACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS
AGROALIMENTARIOS**

**DESARROLLO DE ENVASES PARA LÁCTEOS A PARTIR DE
BAGAZO DE YUCA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL**

EDERSON SANTIAGO FREIRE ALMEIDA

ederson.freire@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PEDRO GUSTAVO MALDONADO ALVARADO. PhD

pedro.maldonado@epn.edu.ec

Quito, marzo 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Ederson Santiago Freire Almeida declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Ederson Santiago Freire Almeida

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ederson Santiago Freire Almeida, bajo mi supervisión.

Ing. Pedro Gustavo Maldonado Alvarado PhD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

EDERSON SANTIAGO FREIRE ALMEIDA

PEDRO GUSTAVO MALDONADO ALVARADO

DEDICATORIA

A mi familia, por el apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera universitaria, gracias por sostenerme siempre. Sin dejar de lado a Alex, Richard, Dayuma, Shirley y Juan Carlos, gracias amigos, esto también es suyo.

Desarrollo de envases para lácteos a partir de bagazo de yuca

Ederson Santiago Freire Almeida

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial

Resumen: En los últimos años, la conciencia ambiental ha crecido y los consumidores han optado por la adquisición de productos amigables con el medio ambiente, por ejemplo, el uso de empaques biodegradables de co-productos. Sin embargo, en muchos casos es difícil lograr termorresistencia para estos envases. El objetivo del presente trabajo es evaluar el uso del bagazo de yuca, para la producción de un envase para lácteos. En el presente trabajo, a partir de información bibliográfica, se evaluó alternativas tecnológicas para el desarrollo de envases para lácteos a partir del bagazo de yuca. Se pudo determinar que el uso de aditivos como Dupont Biomax Strong, no tiene efecto significativo en cuanto al incremento del punto de transición vítrea en materiales biodegradables como el ácido poliláctico, sin embargo, se evidenció que es viable la elaboración de un biopolímero a partir de un subproducto agroindustrial como es el bagazo de yuca, y la mejora de este mediante el incremento del peso molecular del ácido poliláctico utilizando un procedimiento de ROP y el empleo de un catalizador como es el octoato de estaño.

Palabras clave: Yuca, bagazo, ácido poliláctico, envase, lácteos

Development of packaging for dairy products from cassava bagasse

Abstract: In recent years, environmental awareness has grown, and consumers have opted for the purchase of environmentally friendly products, for example the use of biodegradable co-product packaging. However, in many cases it is difficult to achieve heat resistance for these packages. The objective of the present work is to evaluate the use of cassava bagasse to produce a packaging for dairy products. In the present work, based on bibliographic information, technological alternatives for the development of dairy containers from cassava bagasse were evaluated. It was determined that the use of additives such as Dupont Biomax Strong has no significant effect on the increase of the glass transition point in biodegradable materials such as polylactic acid; however, it was shown that it is feasible to produce a biopolymer from an agroindustrial by-product such as cassava bagasse, and to improve it by increasing the molecular weight of polylactic acid using a ROP procedure and the use of a catalyst such as tin octoate.

Keywords: Cassava, bagasse, polylactic acid, packaging, dairy.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el uso de plásticos provenientes de fuentes fósiles están generando grandes problemas ecológicos (Navia Porras & Villada Castillo, 2013). En el año 2018, solo en la Unión Europea se utilizaron más de 1,13 billones de envoltorios y envases plásticos para productos alimenticios, mientras que en la agricultura a nivel mundial se usan al año aproximadamente de 6,5 millones de toneladas de material plástico (Bölll Stiftung, 2019). Debido a la falta de biodegradabilidad de estos materiales y la ausencia de procesos de reciclaje, estos se acumulan en rellenos sanitarios. Así, se buscan alternativas para mitigar este problema ambiental, una de ellas es el uso de materiales poliméricos que sean biodegradables, en particular de co-productos de material vegetal (Rodríguez Sandoval & Arévalo, 2021).

La yuca (*Manihot esculenta*), tubérculo que crece en zonas con condiciones tropicales, posee gran adaptación y sembrarse

hasta los 1800 msnm, con temperaturas entre 20 y 30°C, además posee gran capacidad de crecer en suelos ácido de poca fertilidad (Aristizábal & Sánchez, 2007). Este tubérculo es un cultivo de mucha importancia por su gran contenido de almidón, que es utilizado para la producción de varios productos como bioquímicos, bioetanol, bioplásticos, etc. (Canales & Trujillo, 2021). El bagazo de yuca está conformado por 55% en peso de almidón, 13,5% en peso de celulosa, 13% en peso de humedad, 9,9% de fracciones solubles, 5,8% en peso de hemicelulosa y 2,8% de lignina (Chen et al., 2020).

Un plástico puede considerarse biodegradable si la degradación es producto de la acción de microorganismos como: hongos, bacterias o algas (Norma Técnica Ecuatoriana Especificación Para Plásticos Compostables, 2012). Los biopolímeros son más deseables que los polímeros tradicionales ya que están hechos de recursos renovables, son compostables, biodegradables y se consideran ecológicos (Kumar et al., 2021). Dentro de estos polímeros

biodegradables se encuentra el ácido poliláctico (PLA) (Labeaga, 2018). Las propiedades físicas y mecánicas del PLA son muy similares a las de los polímeros tradicionales de PET y PS. El PLA tiene ventajas en comparación con los polímeros de base petroquímica, como que el método utilizado para obtenerlos consume poca energía, es reciclable y compostable, y también mejora los vertederos agrícolas (Auras et al., 2006).

El PLA es un poliéster biodegradable que presenta características termoestables, esto lo hace ideal en la aplicación en la industria farmacéutica, médica y alimentaria. Este polímero puede elaborarse a partir de recursos renovables ricos en almidón como el trigo, maíz, remolacha, etc. (Cuervo & Echeverry, 2016).

La obtención del ácido poliláctico puede darse de dos maneras: mediante polimerización por condensación y polimerización por apertura de anillo. La polimerización por condensación produce generalmente PLA de bajo peso molecular, este proceso se conforma por 3 etapas: eliminación de agua producto de la oligomerización de los monómeros, reacción química entre los oligómeros y finalmente eliminación de agua que se produjo en la condensación de los oligómeros, además, el polímero debe enfriarse para favorecer su cristalización, en el caso de polimerización por apertura de anillo, se produce PLA de peso molecular alto, de igual manera este también posee tres etapas: policondensación, despolimerización y polimerización por apertura de anillo, cabe destacar que este método requiere de varias etapas de purificación (Labeaga, 2018). Para la obtención de ácido láctico, precursor del ácido poliláctico, es necesario un sustrato rico en carbohidratos. El uso de productos y coproductos agroindustriales puede ser usado para este propósito (Riera et al., 2018).

El ácido poliláctico es un material muy versátil que posee muchas aplicaciones, e.g., en la industria médica es utilizado junto con otros materiales para la elaboración de prótesis. En la industria textil, es empleado en la mejora de tejidos, en el sector agrícola para la elaboración de films con el fin de proteger los cultivos, para la elaboración envases y embalajes, es muy atractivo por sus características biodegradables, para la producción de botellas, bolsas, envases para vegetales y frutas, platos, vasos, cubiertos, etc. (Ferri, 2017).

El ácido láctico o también llamado ácido 2-hidroxi-propanoico se encuentra conformado por los grupos funcionales carboxilo y alcohol (García et al., 2010). Puede ser obtenido por vía biotecnológica con el uso de bacterias ácido lácticas (LAB) como: *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Oenococcus*, entre otras (Parra Huertas, 2010), y el uso de materia rica en carbohidratos como sustrato (García et al., 2010). Por vía química se puede producir gracias a una reacción entre ácido cianhídrico con acetaldehído (Tejada, 2015).

En la presente línea de estudio existen varios trabajos que se han realizado para la elaboración de envases biodegradables a partir de productos provenientes de la agroindustria como: bioplásticos a partir de almidón de maíz y arroz (Marichelvam et al., 2019), envases provenientes de subproductos

alimentarios con agentes antimicrobianos, antioxidantes, aditivos saborizantes, y compuestos que promueven la salud (Hamed et al., 2022), materiales biodegradables a base de cáscara de papa con celulosa bacteriana y curcumina la misma que tiene actividad antioxidante (Xie et al., 2020), entre otros. Respecto a estudios y bioempaques provenientes de la yuca se tienen antecedentes como: trabajos que evalúan la mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados a partir de harina de yuca (Paola Navia et al., 2020.), elaboración de envases alimentarios con propiedades contra la humedad con propiedades humectantes y mecánicas, mediante el uso de gomas y almidón de yuca (Phan The et al., 2008), además, películas biodegradables provenientes del aceite esencial de almidón de yuca con propiedades antibacterianas mejoradas (Marvzadeh et al., 2021), etc., no obstante la mayoría de estos estudios no tienen como objetivo la producción de un bioplástico con mejores características térmicas. Además, existen pocos trabajos de investigación en cuanto al desarrollo de envases alimenticios a partir de bagazo de yuca, por lo tanto, se tiene como objetivo el estudio de la producción de ácido poliláctico con el uso de este coproducto agroindustrial, y la mejora del mismo en cuanto al incremento de la temperatura de transición vítrea, mediante la aplicación de alguna tecnología que permitirá determinar la viabilidad del proceso para futuras investigaciones.

2. METODOLOGÍA

Para el presente trabajo se realizó la recopilación de información disponible del tema de interés, la misma que fue soporte para el análisis de factibilidad y efectividad del uso de bagazo de yuca como materia prima para la elaboración de un material biodegradable.

Uno de los estudios que se tomará como base será el proyecto PREDU 2016-015 “Aprovechamiento de farináceos ecuatorianos para la elaboración de nuevos productos agroalimentarios”, el mismo que se enfoca en el aprovechamiento de residuos de yuca para la producción de ácido láctico mediante una vía biotecnológica, usando una cepa de *Lactobacillus leichmanni* ATCC 7830 para la fermentación de hidrolizado de bagazo de yuca de las variedades INIAP 650 e INIAP 651 (Inguillay et al., 2021).

Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos con investigaciones previas sobre el uso de tecnologías para la mejora de las características térmicas del ácido poliláctico, polímero obtenido a partir de ácido láctico. Finalmente, con la información recabada se determina si es factible la implementación de un material biodegradable mejorado como un envase alimentario.

2.1 Materia Prima

2.1.1 Bagazo de yuca

El almidón de bagazo de yuca se obtiene a partir de las variedades INIAP 650 e INIAP 651, provenientes de la provincia de Manabí de la Estación Experimental Portoviejo del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador (INIAP) (Inguillay et al., 2021).

Según Vargas (2010), la separación de las cortezas de la yuca se realiza mediante la introducción de estas en un rallo de agujas para su molturación. El material que se muele se lava con el uso de un liencillo hasta liberarse el almidón, posteriormente, este se recolecta y se seca al sol sobre lonas plásticas, durante 24 horas a 29 °C (temperatura del sitio).

El almidón obtenido del bagazo de yuca es sometido a hidrólisis para facilitar la fermentación láctica mediante el microorganismo *Lactobacillus leichmannii* y así poder obtener el ácido láctico (Inguillay et al., 2021), precursor del ácido poliláctico.

2.1.2 Aditivo DuPont Biomax Strong 120

Es un copolímero de etileno que mejora la resistencia al impacto y la tenacidad del PLA amorfo y cristalino con la adición de 1-5 % en peso de aditivo. Las láminas fundidas que contienen Biomax Strong exhiben un mejor corte y recorte, pueden resistir la flexión repetida y exhiben una mayor elongación a la rotura. Biomax Strong también actúa como auxiliar de procesamiento al estabilizar la viscosidad del PLA contra la degradación térmica y reducir el torque. El aditivo reduce marginalmente la claridad y se puede dosificar directamente durante el procesamiento. Biomax Strong no es biodegradable, pero a bajos niveles de carga no debería afectar la compostabilidad de los artículos fabricados con él (Markarian, 2008).

2.2 Polimerización del ácido láctico para la obtención de ácido poliláctico.

El ácido poliláctico se obtiene mediante dos vías, policondensación y ruptura de anillo. El PLA producto de la ruta de policondensación presenta bajo peso molecular y propiedades mecánicas pobres, esto hace que su aplicación sea limitada y el PLA producto de la ruta de polimerización por apertura de anillo posee mayor peso molecular (Guzmán & Arana, 2016).

Para la síntesis de PLA de alto peso molecular es necesario sintetizar láctidas, generalmente se sintetiza por despolimerización del correspondiente ácido láctico obtenido por policondensación del ácido láctico selecto, como se muestra en la Figura 1 (Filachione & Costello, 2002).

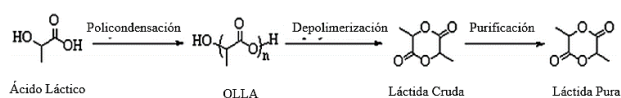


Figura 1. Ruta sintética a láctida a partir de ácido láctico.

Debido al equilibrio de la cadena anular entre láctida y OLLA, la despolimerización por descompresión genera láctida a través del mecanismo de retroceso que involucra los terminales -OH de OLLA como el sitio activo, como se muestra en la Figura 2 (Nishida et al., 2003). Esta reacción se cataliza mediante compuestos metálicos que involucran iones Sn, Zn, Al y Sb, etc. La láctida bruta se puede purificar mediante cristalización en estado fundido o recristalización ordinaria a partir de una solución (Masutani & Kimura, 2014).

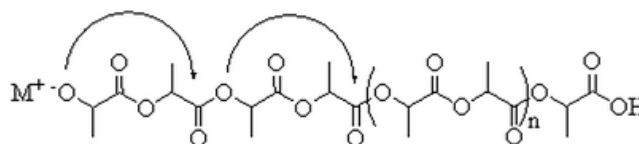


Figura 2. Mecanismo de formación de láctida.

A continuación, en la Figura 3 se muestra las dos rutas sintéticas principales para los polímeros PLA: la policondensación directa de ácido láctico y la polimerización por apertura de anillo (ROP) de láctida (Masutani & Kimura, 2014). La polimerización de L- y D-láctidas ópticamente puras generan PLLA y PDLA, respectivamente. Su cristalinidad y su temperatura de fusión disminuyen al disminuir la pureza óptica (OP) de las unidades de lactato (Urayama et al., 2003).

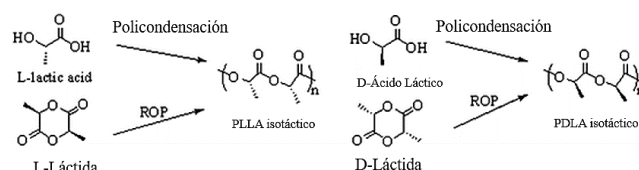


Figura 3. Polimerización de Láctidas.

2.32. Análisis Térmico del material

2.3.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica de caracterización de materiales. La muestra se escanea dinámicamente o se mantiene isotérmicamente en el instrumento, y el flujo de calor tanto de la muestra como de la referencia se monitorean en función del tiempo y la temperatura (Pignatello, 2013). El calorímetro mide el calor/energía absorbida o liberada por la muestra cuando se somete a la ruta de temperatura específica. A medida que tienen lugar las reacciones químicas y las transiciones físicas, existe una generación asociada (reacción exotérmica) o un consumo (reacción endotérmica) de calor. Este proceso crea un flujo de calor que sirve como señal medida por el instrumento DSC (Höhne et al., 2003). Mediante el uso de DSC se espera determinar la temperatura de transición vítrea del material, la misma que sirve para análisis respecto a la estabilidad térmica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Empleo de aditivo comercial para la mejora de las propiedades térmicas del PLA

En la actualidad, se utilizan varios métodos de modificación de PLA. Mezclar PLA con aditivos suele ser una forma práctica de mejorar las propiedades y reducir costes de este polímero (Domb & Jain, 2011).

El análisis y evaluación de uso de un aditivo comercial se basó en el estudio de Taib et al. (2012), en este artículo se realizaron tests de propiedades mecánicas y térmicas con la adición de un aditivo modificador (DuPont Biomax Strong), el mismo

que se dispone en diferentes cantidades en mezcla con el PLA como se mencionó anteriormente en el apartado de metodología.

Según el estudio de Taib et al. (2012), los materiales utilizados fueron PLA y un aditivo modificador. El PLA en una proporción de 4 % de D-láctida y 96 % de contenido de L-láctida, el polímero se adquirió de Natureworks en forma de gránulos. El modificador es un copolímero de acrilato de etileno, se obtuvo de DuPont con el nombre de grado Biomax Strong. Ambos materiales se pre-mezclaron en un recipiente de plástico. Se prepararon mezclas de PLA y aditivo en proporciones de peso variables (100/0; 99/1; 97/3; 95/5; 90/10; 80/20; 70/30; 60/40; 50/50) mezclando por fusión con un mezclador interno.

En cuanto a las propiedades térmicas se obtuvieron termogramas DSC de PLA y PLA/mezclas de modificadores. Los resultados a analizarse en el presente proyecto pertenecen a la proporción de aditivo en mezcla con el PLA y la temperatura de transición vítrea.

La temperatura de transición vítrea (T_g) es la temperatura en la cual existe una transición reversible de un estado vítreo, donde el material presenta características rígidas, a un estado viscoelástico el que se caracteriza por ser poco rígido (González Alonso, 2018). Al incrementar la temperatura sobre la T_g se consigue que el material en estado sólido tenga características intermedias entre estado sólido y líquido (Pölöskei et al., 2020).

En la tabla 3.1. se evidencian los resultados obtenidos en el estudio de Taib et al. (2012) en cuanto a la temperatura de transición vítrea y la proporción utilizada de PLA/aditivo.

Tabla 3.1. Resultados de temperatura de transición vítrea respecto a la proporción utilizada en la mezcla de PLA/aditivo.

Muestra	T_g (°C)
100/0	61.4
99/1	61.5
97/3	61.7
95/5	61.7
90/10	61.2
80/20	61.9
70/30	62.5
60/40	62.5
50/50	61.8

Como se observa en la tabla 3.1. el PLA en estado puro mostró una transición vítrea de 61,4 °C. El mayor incremento de T_g se evidencia con el aumento de 1,1 °C en proporciones de 70/30 y 60/40. La adición del aditivo modificador (DuPont Biomax Strong) incrementó la temperatura de transición vítrea a medida que este aumentaba en proporción, sin embargo, no generó un cambio notable en la temperatura de transición

vítrea del PLA, una de las posibles razones de este resultado sugiere que las mezclas de PLA y el aditivo son inmiscibles (Taib et al., 2012), a pesar de que Markarian, (2008), mencionara que el aditivo mejora las características térmicas del PLA y es posible su uso en envases de tipo alimentario.

Si bien el aditivo comercial DuPont Biomax Strong, no tuvo el efecto esperado en cuanto al incremento de la T_g , es necesario realizar un estudio de la aplicación de aditivos aplicables con PLA como Biostrength de Arkema, Paraloid BPM-500 de Rohm and Haas y Cesa-Extend de Clariant Masterbatches, aditivos que a pesar de ser de impacto pueden aportar con el incremento de la temperatura de transición vítrea del PLA (Taib et al., 2012).

3.2 Incidencia de la composición del polímero y peso molecular en las características térmicas del PLA

Una de las observaciones a analizarse es la incidencia de la composición de L-láctida, D-láctida y D, L-láctida en las características del material. Debido a la quiralidad de la unidad de lactilo, la láctida existe las tres formas ya mencionadas como se muestra en la Figura 4.

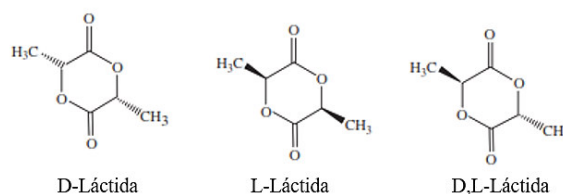


Figura 4. Formas diastereoisómeras de láctidas.

En el estudio de Ahmed & Varshney (2011), se realizó un análisis térmico de una serie de poliláctidas (PLA) basado en el peso molecular promedio en número (M_n) y la naturaleza del isómero (D, L y DL). J. Ahmed et al. (2009), indicó que la temperatura de transición vítrea (T_g) del PLA aumenta en función del peso molecular y de manera independiente del tipo de isómero como se puede apreciar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Efecto del tipo de isómero y su peso molecular en la T_g del PLA.

Isómero	$M_n * 10^3$	T_g (°C)
L	4.7	45.6
DL	4.3	44.7
L	7.0	67.9
DL	7.3	44.1
D	13.8	65.7
L	14.0	66.8
D	16.5	69.1
L	16.8	58.6

De manera aparente, una de las soluciones para el incremento de la temperatura de transición vítrea es el incremento del M_n del polímero, sin embargo, para obtener un polímero de alto peso molecular se requiere de una polimerización por ruptura

de anillo, así, para este procedimiento se requieren de catalizadores como metales pesados (zinc, óxidos de zinc, compuestos clorados de zinc) estos llegarían a contaminar el envase y no sería apto para alimentos (Cheng et al., 2009).

3.2.1 Uso de catalizadores para el método ROP

Según Maharana et al. (2009), frente a las limitaciones que existen frente al uso de metales pesados para obtener ácido poliláctico de peso molecular alto se han recurrido a alternativas como el empleo de catalizadores de calidad alimentaria como compuestos de estaño y organoestaño como octanoato estannoso, compuestos que no resultan tóxicos para el ser humano. Además, se ha comprobado el uso de compuestos orgánicos compatibles hasta en el campo de la medicina, entre ellos están 4-(dimetilamino) (DMAP), 4 pirrolidino-piridinas (PPY), carbenos N-heterocíclicos (NHCs), Derivados de guanidina y amidina, como N-metil-1,5,7-tri-azabicyclododeceno (MTBD) y diazabicycloundeceno (DBU), etc., compuestos que se aprecian en la figura 5. (Masutani & Kimura, 2014).

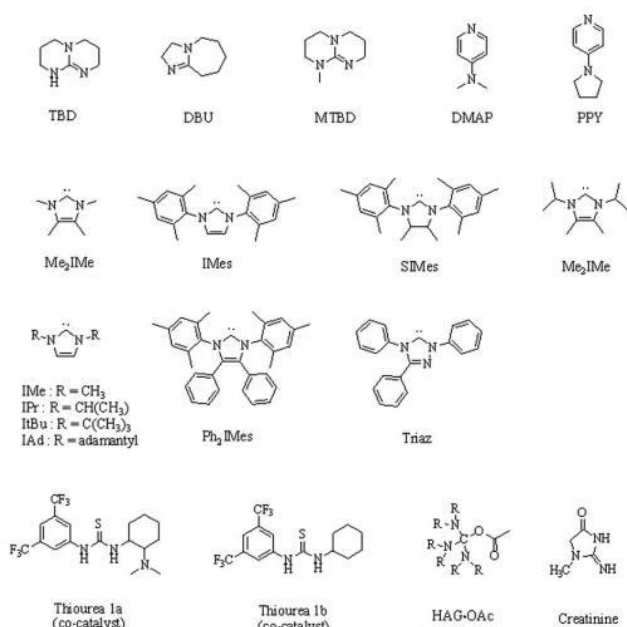


Figura 5. Compuestos orgánicos catalizadores.

En el caso del uso del estaño como catalizador tiene muchas ventajas sobre los otros sistemas porque es altamente soluble en disolventes orgánicos y láctida fundida en estado a granel y muy estable durante el almacenamiento. También muestra una excelente actividad catalítica para dar PLLA de alto peso molecular (Gupta & Kumar, 2007). La característica más importante es que este catalizador es biológicamente seguro y está aprobado por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU.) para su uso en aplicaciones médicas y alimentarias (US Food and Drug Administration)

En la polimerización de láctida ordinaria catalizada por Sn(Oct)₂, se agrega un compuesto de hidroxilo (alcohol) como iniciador real. El iniciador de alcohol primero reacciona con Sn(Oct)₂ para generar un enlace de alcóxido de estaño mediante el intercambio de ligandos. En la siguiente etapa, uno de los átomos de oxígeno del carbonilo exocíclico de la lactida

se coordina temporalmente con el átomo de estaño del catalizador que tiene la forma de alcóxido. Esta coordinación mejora la nucleofilicidad de la parte alcóxido del iniciador, así como la electrofilicidad del grupo láctido carbonilo. En el siguiente paso, el enlace acil-oxígeno (entre el grupo carbonilo y el oxígeno endocíclico) de la láctida se rompe, haciendo que la cadena de la láctida se abra para insertarse en el enlace estaño-oxígeno (alcóxido) del catalizador. La siguiente propagación es inducida por un mecanismo idéntico y continúa a medida que se insertan moléculas de lactida adicionales en el enlace estaño-oxígeno (Masutani & Kimura, 2014).

En la Figura 6 es posible evidenciar ROP de láctida con octoato de estaño.

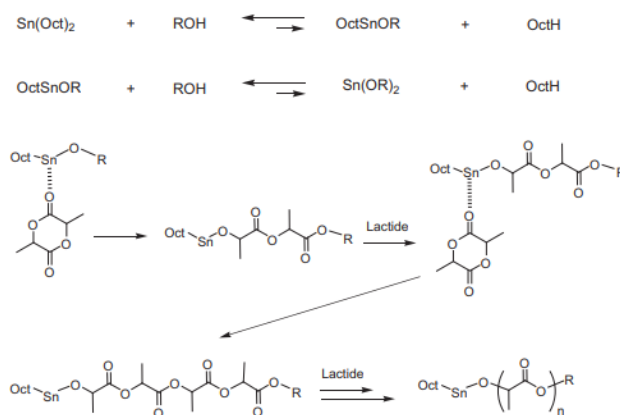


Figura 6. ROP de láctida con octoato de estaño.

Los pesos moleculares medios en peso de los polímeros PLLA obtenidos mediante este método alcanzan entre 500-700 kDa (Masutani & Kimura, 2014).

Es evidente que recurrir a una metodología ROP con los catalizadores correctos ya mencionados, es la mejor opción frente a la adición de aditivos o también frente a la policondensación, ya que con este método el peso molecular promedio corresponde solamente a 100 kDa, valor inferior al alcanzado si se realizara mediante ROP.

Con el incremento de la temperatura de transición vítrea del PLA es posible el envasado y almacenamiento de productos calientes ya que se alcanzan temperaturas superiores a 60 °C, uno de ellos es el dulce de leche, lácteo que debe ser envasado a una temperatura no menor a 70 °C, así mismo, es posible el envasado de yogur y leche provenientes de un tratamiento calórico de pasteurización (FAO, 2003).

De esta manera, con la información recolectada y analizada se puede evidenciar la viabilidad de la posibilidad de producir un empaque biodegradable a partir del uso de coproductos agroindustriales como es el bagazo de yuca. Con los resultados obtenidos del estudio de Inguillay et al. (2021) sobre la producción de ácido láctico con las condiciones adecuadas, la polimerización del mismo mediante una tecnología de ROP y con los catalizadores correctos es posible que el incremento del peso molecular del PLA que en consecuencia logra el aumento de la Tg, no obstante, la adición de aditivos comerciales presentes en el mercado no es

suficiente para alcanzar temperaturas mayores o iguales a 70 °C.

CONCLUSIONES

El aditivo comercial DuPont Biomax Strong no favoreció de manera considerable con el incremento de la Tg del PLA ya que estos resultaron ser inmiscibles, y se debe buscar otra alternativa frente al uso de un aditivo comercial.

El incremento del peso molecular del PLA mediante un procedimiento de ROP favorece el aumento de la Tg del PLA.

El catalizador Sn(Oct)₂ es la mejor opción para una metodología de tipo ROP para polimerizar ácido láctico y ser empleado como empaque alimentario al no ser tóxico, además, es posible el uso de catalizadores orgánicos que pueden ser empleados para la polimerización del LA.

La información recolectada respecto a la obtención de ácido poliláctico, la mejora del mismo y con el estudio previo de producción de ácido láctico es posible concluir que es viable la elaboración de un bioplástico mejorado para el envasado y almacenamiento de alimentos calientes que superen los 60°C como son los productos lácteos.

REFERENCIAS

- Ahmed, J., & Varshney, S. K. (2011). Poly lactides-chemistry, properties and green packaging technology: A review. *International Journal of Food Properties*, 14(1), 37–58. <https://doi.org/10.1080/10942910903125284>
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *FAO*, 163, 134. <https://doi.org/9253056770-9789253056774>
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2006). Sorption of ethyl acetate and d-limonene in poly(lactide) polymers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4), 648–656. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2391>
- Bölll Stiftung, H. (2019). El ATLAS DEL PLÁSTICO. In *Atlas*. <https://co.boell.org/sites/default/files/2021-02/Plastic Atlas 2019 cambio.pdf>
- Canales, N., & Trujillo, M. (2021). La red de valor de la yuca y su potencial en la bioeconomía de Colombia. *Instituto de Ambiente de Estocolmo*, 1–30. <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/05/workingpaperyucabioeconomia-canales-trujillo-mayo21.pdf>
- Chen, H., Chen, B., Su, Z., Wang, K., Wang, B., Wang, Y., Si, Z., Wu, Y., Cai, D., & Qin, P. (2020). Efficient lactic acid production from cassava bagasse by mixed culture of *Bacillus coagulans* and *Lactobacillus rhamnosus* using stepwise pH controlled simultaneous saccharification and co-fermentation. *Industrial Crops and Products*, 146(15), 112175. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112175>
- Cheng, Y., Deng, S., Chen, P., & Ruan, R. (2009). Polylactic acid (PLA) synthesis and modifications: A review. *Frontiers of Chemistry in China*, 4(3), 259–264. <https://doi.org/10.1007/s11458-009-0092-x>
- Cuervo, L. V., & Echeverry, J. C. (2016). *EVALUACIÓN DE LA SÍNTESIS DE ÁCIDO POLILÁCTICO PROVENIENTE DEL SUERO DE QUESERÍA A NIVEL LABORATORIO*. Fundación Universidad de América.
- Domb, A. J. (Abraham J. ., & Jain, J. P. (2011). *Biodegradable polymers in clinical use and clinical development*. 734.
- Ferri, J. (2017). *Desarrollo de formulaciones derivadas de ácido poliláctico (PLA), mediante plastificación e incorporación de aditivos de origen natural*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- Filachione, E. M., & Costello, E. J. (2002). Lactic Esters by Reaction of Ammonium Lactate with Alcohols. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(9), 2189–2191. <https://doi.org/10.1021/IE50513A057>
- García, C., Arrázola, G., & Durango, A. (2010). Producción de Ácido Láctico por vía Tecnológica. *Temas Agrarios*, 15(2), 9–26. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4149619.pdf>
- González Alonso, L. (2018). *Estudio Experimental De La Transición Vítrea Y De La Dinámica Macromolecular En Dispersiones Sólidas Amorfas Del Antibiótico Cloranfenicol En Ácido Poliláctico*.
- Gupta, A. P., & Kumar, V. (2007). New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – Polylactide: A critique. *European Polymer Journal*, 43(10), 4053–4074. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYJM.2007.06.045>
- Guzmán, A. D., & Arana, L. O. (2016). Síntesis y caracterización del ácido poliláctico (PLA) mediante policondensación asistida por radiación microondas a partir de ácido L-láctico comercial. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(1), 37–44.
- Hamed, I., Jakobsen, A. N., & Lerfall, J. (2022). Sustainable edible packaging systems based on active compounds from food processing byproducts: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 198–226. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12870>
- Höhne, G. W. H., Hemminger, W. F., & Flammersheim, H.-J. (2003). *Differential Scanning Calorimetry*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06710-9>
- Inguillay, S., Jadán, F., & Maldonado-Alvarado, P. (2021). Fermentation study of Cassava bagasse starch hydrolyzed's using INIAP 650 and INIAP 651 varieties and a strain of *Lactobacillus leichmannii* for the lactic acid production. *Revista Bionatura*, 6(2), 1803–1811. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.02.21>
- Kumar, S., Leitão, F., Gaspar, P. D., & Silva, P. D. (2021). Experimental Tests of the Thermal Behaviour of New Sustainable Bio-Packaging Food Boxes. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(1), 215–223.
- Labeaga, A. (2018). *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA.
- Maharana, T., Mohanty, B., & Negi, Y. S. (2009). Melt-solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(1), 99–124. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.10.001>
- Marichelvam, M. K., Jawaid, M., & Asim, M. (2019). Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials. *Fibers 2019, Vol. 7, Page 32, 7(4), 32*. <https://doi.org/10.3390/FIB7040032>
- Markarian, J. (2008). Biopolymers present new market opportunities for additives in packaging. *Plastics, Additives and Compounding*, 10(3), 22–25. [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(08\)70091-6](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(08)70091-6)
- Marvizadeh, M. M., Tajik, A., Moosavian, V., Oladzadabbasabadi, N., & Nafchi, A. M. (2021). Fabrication of Cassava Starch/Mentha piperita Essential Oil Biodegradable Film with Enhanced Antibacterial Properties. *Journal of Chemical Health Risks*, 11(1), 23–29. <https://doi.org/10.22034/JCHR.2020.1900584.1135>
- Masutani, K., & Kimura, Y. (2014). PLA Synthesis. From the Monomer to the Polymer. In *Poly(lactic acid) Science and Technology: Processing, Properties, Additives and Applications* (pp. 1–36). <https://doi.org/10.1039/9781782624806-00001>
- Navia Porras, D., & Villada Castillo, H. (2013). Impacto de la investigación en empaques biodegradables en ciencia, tecnología e innovación. *Ingresar a La Revista*, 11(2), 173–182.
- Nishida, H., Mori, T., Hoshihara, S., Fan, Y., Shirai, Y., & Endo, T. (2003). Effect of tin on poly(l-lactic acid) pyrolysis. *Polymer Degradation and*

Stability, 81(3), 515–523. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00152-6)
Norma Técnica Ecuatoriana Especificación Para Plásticos Compostables, Instituto Ecuatoriano de Normalización (2012). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2643.pdf>

Paola Navia, D. P., Samuel Villada, H. C., & Adolfo Ayala, A. A. (n.d.). EVALUACIÓN MECÁNICA DE BIOPLASTICOS SEMIRRÍGIDOS ELABORADOS CON HARINA DE YUCA MECHANICAL EVALUATION OF SEMIRRIGID BIOPLASTICS MADE WITH CASSAVA FLOUR AVALIAÇÃO MECÂNICA DE BIOPLÁSTICOS SEMI-RÍGIDA PROCESSADOS COM FARINHA DE MANDIOCA Artículos de la Revista. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial Edición Especial*, 2, 77–84.

Parra Huertas, R. (2010). Review. bacterias acido lacticas: papel funcional en los alimentos. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 8(1), 93–105.

Phan The, D., Debeaufort, F., Luu, D., & Voilley, A. (2008). Moisture barrier, wetting and mechanical properties of shellac/agar or shellac/cassava starch bilayer bio-membrane for food applications. *Journal of Membrane Science*, 325(1), 277–283. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.07.052>

Pignatello, R. (2013). Drug-Biomembrane Interaction Studies The Application of Calorimetric Techniques. In *Drug–biomembrane interaction studies: The application of calorimetric techniques*. Woodhead Publishing Limited. <http://dx.doi.org/10.1533/9781908818348.97>

Pölöskei, K., Csézi, G., Hajba, S., & Tábi, T. (2020). Investigation of the thermoformability of various D-Lactide content poly(lactic acid) films by ball burst test. *Polymer Engineering and Science*, 60(6), 1266–1277. <https://doi.org/10.1002/PEN.25378>

Riera, M., Maldonado, S., & Palma, R. (2018). Agro-Industrial Residues Generated in Ecuador for the elaboration of bioplastics. *Ingeniería Industrial*, 17(3), 227–246.

Rodríguez Sandoval, P., & Arévalo, M. I. (2021). Los materiales biodegradables, una alternativa a la contaminación de los polímeros sintéticos. *Revista de La Escuela de Ingenierías y Tecnologías Unimonserate*, 1, 29–37. <https://doi.org/10.29151/reit.n1a3>

Taib, R. M., Ghaleb, Z. A., & Mohd Ishak, Z. A. (2012). Thermal, mechanical, and morphological properties of polylactic acid toughened with an impact modifier. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(5), 2715–2725. <https://doi.org/10.1002/app.34884>

Tejada, R. (2015). Obtención de Ácido Láctico por fermentación del almidón de Ñame. *Ingeniería Alimentaria.*, 100. <https://core.ac.uk/download/pdf/77278264.pdf>

Urayama, H., Moon, S. Il, & Kimura, Y. (2003). Microstructure and Thermal Properties of Polylactides with Different L- and D-Unit Sequences: Importance of the Helical Nature of the L-Sequenced Segments. *Macromolecular Materials and Engineering*, 288(2), 137–143. <https://doi.org/10.1002/MAME.200390006>

US Food and Drug Administration. (n.d.). *CFR - Code of Federal Regulations Title 21*. Retrieved February 24, 2022, from <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm>

Vargas, P. (2010). Obtención de almidón fermentado a partir de yuca (Manihot esculenta crantz) variedad valencia , factibilidad de uso en productos de panadería. *Tecnología En Marcha*, 23, 15–23.

Xie, Y., Niu, X., Yang, J., Fan, R., Shi, J., Ullah, N., Feng, X., & Chen, L. (2020). Active biodegradable films based on the whole potato peel incorporated with bacterial cellulose and curcumin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 480–491. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.291>