

Análisis teórico de la producción de ácido poliláctico a partir de biomasa residual disponible en el departamento de Santander.

Ana María Díaz Ariza y María Paula Villamizar Mesa

Trabajo de grado para optar al título de ingeniería química

Director

Cesar Augusto Guevara lastre

Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Codirector

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

Introducción	9
1.Objetivos.....	11
1.1.Objetivo General.....	11
1.2.Objetivos Específicos.....	11
2.Estado del arte.....	12
3.Marco Teórico.....	15
3.1. Ácido poliláctico.....	15
3.2.Métodos de síntesis del PLA.....	15
3.3.Ácido láctico	16
4 Metodología	18
5.Resultados	20
5.1.Selección de Materia prima	20
5.2.Capacidad de producción.....	24
5.3.Pretratamiento de Materia prima	25
5.4.Síntesis de ácido láctico	27
5.5.Producción estimada de ácido láctico.....	30
5.6.Síntesis de ácido poliláctico.....	30
5.7. Prepolimerización.	32
5.8.Síntesis de la lactida.....	34
5.9.Polimerización de PLA.....	37
5.10.Producción estimada de PLA.....	38

6.Análisis económico.....	40
6.1.Costos de equipos	40
6.2.Costos Operativos	43
6.3.Horizonte del proyecto.....	45
Conclusiones	47
Referencias.....	49
Anexos.....	49

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Ruta metodológica</i>	18
Figura 2. <i>Proceso de pretratamiento del SCB</i>	27
Figura 3. <i>Proceso de síntesis y purificación del PLA</i>	29
Figura 4. <i>Proceso de producción de PLA</i>	32
Figura 5. <i>Reacción de oligomerización del LA</i>	33
Figura 6. <i>Proceso de prepolimerización</i>	34
Figura 7. <i>Reacción de polimerización - despolimerización</i>	36
Figura 8. <i>Producción de lactida</i>	358
Figura 9. <i>Proceso de polimerización del PLA</i>	37

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Búsqueda de datos y resultados</i>	21
Tabla 2. <i>Comparación general de la producción de ácido láctico</i>	22
Tabla 3. <i>Selección de la biomasa</i>	23
Tabla 4. <i>Operación equipos usados en el proceso de obtención de LA</i>	30
Tabla 5. <i>Métodos en la síntesis de PLA</i>	31
Tabla 6. <i>Flujos obtenidos en la prepolimerización</i>	33
Tabla 7. <i>Especificaciones del proceso de prepolimerización</i>	34
Tabla 8. <i>Variables producción de lactida</i>	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. <i>Flujos producción de Lactida</i>	36
Tabla 10. <i>Variables en la ROP</i>	368
Tabla 11. <i>Flujos producción de PLA</i>	37
Tabla 12. <i>Operación equipos usados en el proceso de obtención de PLA</i>	388
Tabla 13. <i>Costos por equipo</i>	38
Tabla 14. <i>Costo directo, indirecto y total de la planta</i>	40
Tabla 15. <i>Costos Materias Primas</i>	41
Tabla 16. <i>Costos servicios requeridos</i>	43
Tabla 17. <i>Costos personal</i>	44
Tabla 18. <i>Flujos de caja en los primeros 5 años</i>	44
Tabla 19. <i>Flujos de caja en los últimos 5 años</i>	46
Tabla 20. <i>Criterios económicos</i>	45

Lista de Anexos.

ANEXOS.....	60
Anexo A (Pretratamiento materia prima)	60
A.1. Reactor hidrólisis alcalina R-101 – R-108.....	60
A.2. Filtro rotatorio al vacío F101- F104.....	61
A.3. Reactor hidrólisis enzimática R-109 – R-122.....	63
A.4 Purificación SCB tratada F-104 – F-115.....	65
ANEXO B (Síntesis de ácido láctico).....	66
B.1. Fermentación R201	69
B.2. Concentración D201.....	69
B.3. Obtención LA R-202.....	69
B.4. Torre de destilación reactiva R203.....	69
B.5. Torre de destilación reactiva R204.....	72
B.6. Ultrafiltración F201 – F205.....	69
B.7. Recuperación metanol D202	74
B.8. Reincorporación metanol M201	75
Anexo C (Producción de ácido poliláctico).....	75
C.1. Prepolimerización	776
C.2. Síntesis de lactida.....	77
C.3. Polimerización.....	79
Anexo D (Valores económicos).....	81

Resumen

Título: Análisis teórico de la producción de ácido poliláctico a partir de biomasa residual disponible en el departamento de Santander**

Autores: Villamizar Mesa Maria Paula, Díaz Ariza Ana Maria††

Palabras clave: Ácido láctico, ácido poliláctico, polimerización, bagazo de caña de azúcar.

Descripción: El ácido poliláctico es una alternativa biodegradable con creciente interés frente a polímeros fósiles debido a su menor impacto ambiental. Este trabajo presenta un estudio conceptual del proceso de producción de PLA a partir del bagazo de caña de azúcar disponible en Santander, Colombia. Se analiza la disponibilidad y el pretratamiento de la biomasa mediante hidrólisis enzimática y alcalina, como etapa clave para la obtención de azúcares fermentables. En el proceso de síntesis, se plantea la fermentación utilizando bacterias *B. coagulans* y la posterior purificación del producto mediante destilación reactiva. Finalmente, se estudia la conversión del monómero en PLA mediante el método ROP, bajo condiciones operativas específicas que garanticen una buena calidad del polímero. Además, se realizó un análisis económico preliminar que arrojó un VNA de -\$118.465.343 USD y una TIR del 1 %, lo que indica que el proyecto no alcanza la rentabilidad esperada bajo las condiciones planteadas. Los resultados obtenidos permiten identificar cuellos de botella técnicos, especialmente en el pretratamiento y purificación, al tiempo que evidencian oportunidades para optimizar el proceso e implementar mejoras que favorezcan la sostenibilidad. Este análisis aporta información clave para futuros estudios orientados al aprovechamiento de residuos y producción de biopolímeros en el contexto local.

** Trabajo de grado

†† Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Ingeniería química. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre- M. Sc. Ciencias y tecnologías Ambientales. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada- M. Sc. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Theoretical Analysis of Polylactic Acid Production from Residual Biomass Available in the Department of Santander^{‡‡}

Authors: Villamizar Mesa Maria Paula, Díaz Ariza Ana Maria^{§§}

Keywords: Lactic acid, polylactic acid, polymerization, sugarcane bagasse.

Description: Polylactic acid is a biodegradable alternative that has gained increasing interest as a replacement for fossil-based polymers due to its lower environmental impact. This work presents a conceptual study of the PLA production process using sugarcane bagasse available in Santander, Colombia. The availability and pretreatment of the biomass are analyzed, involving enzymatic and alkaline hydrolysis as key steps for the release of fermentable sugars. For the synthesis process, fermentation using *B. coagulans* is proposed, followed by product purification through reactive distillation. Finally, the conversion of the monomer into PLA is studied through ring-opening polymerization, under specific operating conditions to ensure good polymer quality. In addition, a preliminary economic analysis was conducted, resulting in an NPV of -\$118,465,343 USD and an IRR of 1 %, indicating that the project does not meet expected profitability under current conditions. The results allow for the identification of technical bottlenecks, particularly in the pretreatment and purification stages, while also highlighting opportunities to optimize the process and implement improvements that enhance sustainability. This analysis provides key insights for future studies focused on the valorization of agricultural residues and the production of biopolymers within the local context.

^{‡‡} Undergraduate thesis

^{§§} Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Advisor: Cesar Augusto Guevara Lastre – M.Sc. in Environmental Sciences and Technologies. Co-advisor: Omar Andrés Benavides Prada – M.Sc. in Chemical Engineering

Introducción

En los últimos años, la creciente preocupación por el medio ambiente ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles para reducir el impacto ambiental. Entre estas alternativas se encuentra el ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable que puede sustituir materiales como la madera, algunos metales, el vidrio, entre otros (Castro Gómez & Vera Calderon, 2012).

La relevancia de su estudio ha aumentado debido a su alto potencial para competir con los plásticos convencionales de origen petroquímico, destacándose en sectores clave como el embalaje industrial y la fabricación de empaques desechables (platos y bolsas). Además, ha demostrado aplicaciones prometedoras en el área médica, especialmente en dispositivos biocompatibles y bioabsorbibles, así como en la producción de piezas moldeadas, películas y fibras (Taib, 2022). Esto se debe a que su producción parte de recursos renovables, lo que contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero y lo posiciona como un candidato clave en la transición hacia una economía circular y una industria más sostenible. Así mismo, en la producción de PLA es fundamental considerar factores como la disponibilidad y calidad de la materia prima, las rutas tecnológicas disponibles para la síntesis de ácido láctico y su posterior polimerización, y los criterios de sostenibilidad y viabilidad económica asociados al proceso; por ende, un análisis conceptual detallado de estos aspectos permite comprender las posibilidades reales de implementación industrial, identificar cuellos de botella y proponer alternativas tecnológicamente viables y ambientalmente responsables (Vld-Eng, 2020).

En este orden de ideas, el presente trabajo tiene como propósito realizar un estudio conceptual del proceso de producción de PLA a partir de biomasa residual disponible en el departamento de Santander. A través de un análisis bibliográfico y técnico, se examinan las etapas

clave del proceso: pretratamiento de la materia prima, síntesis de ácido láctico, polimerización, y aspectos relacionados con la sostenibilidad y eficiencia del proceso. Además, se incorpora un análisis preliminar de costos con el fin de evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta. El documento busca aportar a la investigación continua en la producción de PLA, facilitando su expansión en la industria y promoviendo su impacto positivo en el medio ambiente. Además, de fomentar el aprovechamiento de recursos renovables y contribuir a la sostenibilidad mediante el desarrollo de alternativas a los plásticos convencionales.

1. Objetivos

1.1.Objetivo General

Elaborar un análisis teórico sobre la producción de ácido poliláctico a partir de biomasa residual disponible en el departamento de Santander.

1.2.Objetivos Específicos

- Definir una fuente de biomasa residual disponible en Santander, Colombia, para la producción de PLA.
- Proponer un diseño conceptual para el proceso de síntesis de PLA a partir de biomasa.
- Evaluar la viabilidad financiera de la planta a partir de un estudio de prefactibilidad

2. Estado del arte.

El desarrollo de procesos para la producción de PLA a partir de biomasa lignocelulósica ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años, especialmente ante el interés por valorizar residuos agroindustriales mediante rutas sostenibles. Una de las materias primas más estudiadas en este campo es el bagazo de caña de azúcar (SCB), debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, y a su disponibilidad en países productores como Colombia (Dallos, et al., 2024). Esta biomasa requiere de un pretratamiento efectivo que permita su hidrólisis en azúcares fermentables, paso crítico para su posterior conversión a ácido láctico mediante fermentación microbiana (Abdel-Rahman, 2013).

A nivel internacional, diversos autores han evaluado las condiciones óptimas para el pretratamiento de SCB utilizando métodos alcalinos, ácidos, enzimáticos y combinados, enfocándose en maximizar el rendimiento de azúcares y minimizar la formación de inhibidores de fermentación (Karp, 2015). Por su parte, Nawalde (2020) evalúa la incidencia de diferentes estrategias de pretratamientos en procesos con *B. coagulans*. Los mejores resultados en términos de rendimiento y concentración de LA se dan por medio de la hidrólisis alcalina, que rompe la estructura lignocelulósica del SCB, eliminando parcialmente la lignina y permitiendo el acceso a la celulosa. Este proceso funciona mejor a temperaturas entre 90 y 120 °C. Posteriormente, se añaden enzimas celulíticas en un medio acuoso con agitación, lo que permite la degradación de la celulosa en hexosas como la glucosa, y la hemicelulosa en pentosas como la xilosa y arabinosa, generando un medio rico en azúcares fermentables.

La fermentación de estos azúcares puede realizarse utilizando cepas de *Lactobacillus*, *B. coagulans* y otros microorganismos termotolerantes, capaces de operar en condiciones variables de pH y temperatura. Siendo así, Méndez (2017) estudia las condiciones operativas que favorecen la producción de ácido láctico por medio de simulaciones que permiten formular un diseño que optimiza el proceso de fermentación, llevando a cabo la inoculación y fermentación en un solo paso. Además, Gomez (2019) realizó una evaluación de los distintos métodos de separación usados para la purificación del ácido láctico, haciendo énfasis en la cromatografía de intercambio iónico y destilación reactiva de múltiples etapas.

Respecto a la síntesis de PLA, Riera (2022) realiza una revisión bibliográfica sobre los diferentes métodos de producción de PLA y sus respectivas aplicaciones, destacando que a nivel industrial el método polimerización por apertura de anillo permite obtener polímeros de alto peso molecular con mejores propiedades mecánicas y térmicas, aunque requiere etapas adicionales como la dimerización del LA para formar lactida, y el uso de catalizadores específicos. La información anterior se complementa con el estudio realizado por Fernández (2020) que aborda las condiciones de reacción necesarias en cada método de síntesis, destacando que métodos como la policondensación directa o en estado sólido requieren altas temperaturas, vacío y tiempo prolongado de operación, lo cual sumado a su desempeño en formación de PLA de alto peso molecular indica que son procesos que requieren de mejoras para alcanzar alta calidad a costos más bajos.

Estudios recientes también han incorporado análisis tecnoeconómicos para evaluar la viabilidad de plantas productoras de PLA a partir de biomasa lignocelulósica. Fernández (2014) y Bhatia, *et al* (2021) identificaron como principales desafíos los altos costos del proceso,

especialmente en las etapas de pretratamiento y purificación, así como la necesidad de reducir el consumo energético global. En el contexto latinoamericano, la CEPAL (2020). advierte que las limitaciones tecnológicas y los altos costos de inversión pueden dificultar la implementación industrial de estos procesos.

En Colombia, aunque existen antecedentes de investigación sobre la valorización de residuos agrícolas para la obtención de biocombustibles o compuestos químicos, la literatura relacionada con la producción de PLA a partir de bagazo de caña es escasa. Esta carencia representa una oportunidad para el desarrollo de estudios orientados a explorar su factibilidad técnica y económica, adaptados a las condiciones locales (Barona & Briceño, 2016). El presente trabajo se enmarca en esta línea, abordando las etapas del proceso y proponiendo un análisis conceptual que permita sentar las bases para futuras iniciativas de producción sostenible de bioplásticos en el país.

3. Marco Teórico

5.1.3.1. Ácido poliláctico

El PLA es un poliéster termoplástico, alifático biodegradable y de base biológica, derivado principalmente de recursos renovables como el ácido láctico. Este polímero se destaca por su alta resistencia y módulo elasticidad. El PLA puede presentarse en formas semicristalinas o amorfas, dependiendo de su estructura química, y es procesable de manera similar a los polímeros petroquímicos. Sus principales ventajas, comparándolo con otros biopolímeros, es su rápido procesamiento, biocompatibilidad, beneficios para el medio ambiente y bajo consumo energético (Serna L. R., 2003). El PLA se obtiene a partir de la fermentación microbiana de sustancias ricas en carbohidratos, como lo son algunos subproductos agrícolas, que dan paso a la producción de ácido láctico, precursor del PLA (Taib, 2022).

Por otra parte, el tamaño del mercado mundial de ácido poliláctico se valoró en 838,69 millones de dólares en 2023 y se espera que alcance alrededor de 3515,39 millones para 2033, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 15,40 % entre 2024 y 2033. Su demanda se ha impulsado por la preocupación ambiental y la transición hacia una economía circular (Bidwai, 2024). A pesar de su potencial, presenta algunos desafíos como sus altos costos de producción y limitaciones en algunas de sus propiedades: velocidad de cristalización lenta, fragilidad, baja resistencia a la fusión e hidrofobicidad (iSuoChem, 2022)

3.2. Métodos de síntesis del PLA

Dentro de los métodos de síntesis del PLA a partir de ácido láctico (LA) se encuentra la polimerización, la cual se puede llevar a cabo mediante diferentes procesos como la polimerización

enzimática, donde su aplicación está sujeta a parámetros limitados como la pureza de la lactida, condiciones de reacción como temperatura y tiempo, y el tipo y concentración de enzimas, influyendo en el peso molecular y el rendimiento del PLA, siendo respetuosa con el medio ambiente para hacer de este un proceso eficiente (Swetha, et al., 2023). En segundo lugar, se encuentra el método de polimerización directa, el cual es económico debido a que se realiza a presión reducida; sin embargo, produce PLA de bajo peso molecular debido a la difícil eliminación de agua. Otro de los métodos de polimerización es el de deshidratación azeotrópica, que origina PLA de alto peso molecular usando disolventes como tolueno o xileno y eliminando el agua por destilación. Finalmente, la técnica de polimerización por apertura de anillo (ROP) es la más usada debido a que forma PLA de alto peso molecular mediante el uso de catalizadores organometálicos (Taib, 2022).

3.3. Ácido láctico

El precursor del PLA es el ácido láctico (LA), ácido 2-hidroxiopropanoico, el cual es un hidroxiaácido muy usado en la industria alimentaria, química y farmacéutica. Existen dos isómeros: el D (-) láctico y L (+) láctico, ópticamente activos, y una forma racémica constituida por fracciones equimolares de ambos isómeros. La configuración L (+) es metabolizada por el organismo humano, y ambas formas isométricas pueden utilizadas para producir polímeros con diferentes propiedades dependiendo de la composición (Vélez, 2017).

El ácido láctico puede ser obtenido por vía química o biotecnológica. La síntesis química se basa en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico, dando lugar al lacto nitrilo, que puede ser hidrolizado a ácido láctico. La principal desventaja de la ruta química es la calidad del producto, ya que el ácido láctico producido es una mezcla de ambos isómeros, configuración ópticamente

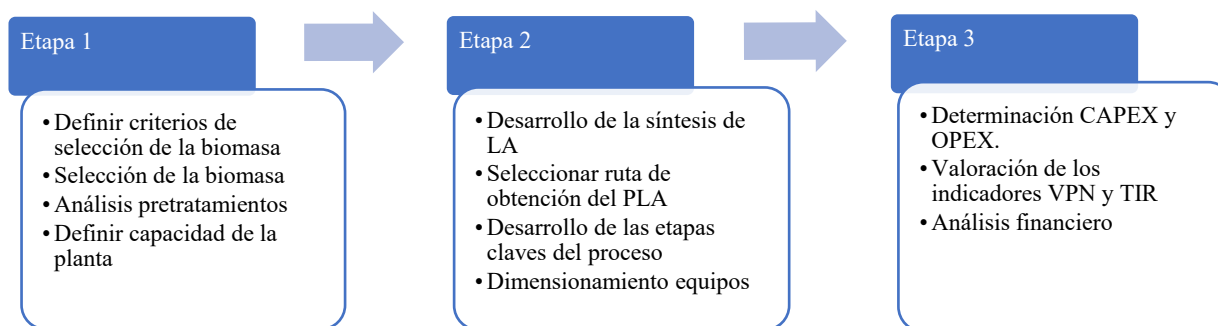
inactiva. Por tal motivo, el 90 % del ácido láctico es producido por la vía biotecnológica (Rodríguez, 2015).

La síntesis biotecnológica del LA se basa en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por hongos y bacterias. Aproximadamente, el 95 % del ácido láctico producido por esta vía se encuentra en la forma L (+) láctico, por lo que el PLA contiene una mayor proporción de este enantiómero. El proceso depende del tipo de microorganismo utilizado, la inmovilización o recirculación, la fuente de nitrógeno y carbono, el pH, la temperatura y el modo de fermentación (Rodríguez, 2015).

4. Metodología

La Figura 1 presenta la ruta metodológica que se siguió en el desarrollo de este trabajo, estructurada en tres etapas que responden directamente a los objetivos específicos de la investigación.

Figura 1.
Ruta metodológica



En la Etapa 1 se establecieron los criterios para la selección de la biomasa residual más adecuada para la producción de PLA, en el contexto del departamento de Santander. Este análisis incluyó la disponibilidad, capacidad, rendimiento, relevancia investigativa, costo y configuración. Una vez definida la materia prima, se consideraron posibles pretratamientos requeridos para su conversión en sustrato fermentable, así como una estimación preliminar de la capacidad de procesamiento, orientada a una futura implementación industrial.

La Etapa 2 se centró en el análisis de las rutas tecnológicas para la producción de PLA. En primer lugar, se estudió la síntesis del ácido láctico (LA) a partir de la biomasa seleccionada, revisando consideraciones generales del proceso y purificación. Posteriormente, se identificaron y compararon diferentes métodos para la polimerización del ácido láctico. Esta etapa concluyó con la integración conceptual de las etapas clave del proceso de producción de PLA. Por último, se

realizó el cálculo de flujos, el dimensionamiento teórico de los equipos y la determinación de los requerimientos energéticos en el proceso.

En la Etapa 3 se llevó a cabo un estudio de prefactibilidad que comprende la estimación de los costos fijos o de inversión (CAPEX) y los costos operativos anuales (OPEX), incluyendo insumos, servicios, mantenimiento y mano de obra. Con base en estos datos, se calcularon parámetros financieros como el valor presente neto y la tasa interna de retorno (TIR) según un horizonte de proyecto de 10 años, estos datos permitieron analizar la rentabilidad del proyecto y determinar si su implementación resulta económicamente viable.

5. Resultados

5.1. Selección de Materia prima

La selección del sustrato depende de su costo, disponibilidad, alto rendimiento y capacidad para ser fermentado con poco pretratamiento. El costo de la materia prima constituye del 40 a 70 % del costo total de producción (Ojo, 2023). A pequeña escala se usan azúcares refinados como la glucosa y sacarosa, y para mayores producciones se utilizan sustratos ricos en carbohidratos como materiales amiláceos, almidones, lignocelulosa y desechos orgánicos (García, 2010).

Las biomásas residuales más estudiadas en la producción de LA a nivel investigativo son el lactosuero, el bagazo de caña de azúcar en sus diversas presentaciones, los desechos alimenticios y la paja de trigo. El bagazo de caña (CSB) es el residuo del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña: el remanente de los tallos después de ser extraído el jugo azucarado que ésta contiene (Nalawade, 2020), y Santander cuenta con aproximadamente 40 mil hectáreas sembradas de caña panelera (ICA, 2018). En segundo lugar, el lactosuero es un residuo líquido que se obtiene en la fabricación del queso; en Santander la actividad pecuaria cuenta con un área destinada de 1,7 millones de hectáreas, con más de 58 mil unidades productoras y un valor cercano a los 868 mil litros (CCB, 2023). Otro de los sustratos es la paja de trigo, un carbohidrato del tipo lignocelulósico que se produce después de la cosecha de los granos (Campozano & Riera, 2022); sin embargo, la producción de trigo en todo Colombia ha sido afectada por diferentes coyunturas macroeconómicas que inciden directamente en su decrecimiento, donde el 99,7 % de la demanda nacional se debe importar (ANDI, 2021). Por último, los desperdicios alimenticios son una materia prima abundante y económica, compuesta principalmente por residuos de frutas, verduras,

productos panificados, lácteos y restos de alimentos procesados; a nivel departamental se desperdician 9,76 millones de toneladas de alimentos al año (FAO, 2019).

La Tabla 1 presenta la cantidad de información disponible en bases de datos como *Scopus* y *Web of Science* (WOS) sobre el proceso de producción de LA a partir de los sustratos mencionados. Con el fin de recopilar estos datos, se empleó una ecuación de búsqueda que incluyó exclusivamente artículos de revisión e investigación en el área de ingeniería química.

Tabla 1

Búsqueda de datos y resultados

Consulta de búsqueda (título, resumen o palabras clave)	Resultados Scopus	Resultados WOS
“Lactic acid production” AND “whey”	113	135
“Lactic acid production” AND “sugarcane bagasse” OR “sugar cane bagasse”	39	379
“Lactic acid production” AND “wheat straw”	40	28
“Lactic acid production” AND “food waste”	131	190

A partir de las búsquedas realizadas se documentaron investigaciones destacadas en la Tabla 2, donde se exponen las principales variables que engloban los procesos de producción: sustrato, microorganismo, método de cultivo, pretratamiento y rendimiento. La selección del microorganismo depende de su capacidad de fermentar el sustrato, tolerancia a inhibidores, eficiencia de conversión y condiciones de operación (Dallos, et al., 2024). En la tabla se distinguen afinidades entre sustratos y microorganismo, como el SCB con *B. coagulans* y el lactosuero con *Lb. Casei*.

Por otra parte, la literatura revisada muestra una prevalencia del modo de operación *Batch* debido a su simplicidad y bajo costo a escala investigativa; sin embargo, es propenso a la inhibición por sustrato y presenta bajas productividades. Por otra parte, el modo continuo se emplea en

algunas plantas industriales, ya que ofrece mayores productividades y un mejor aprovechamiento del sustrato; a pesar de ello, su control es más complejo por el riesgo de contaminación. En contraste, la fermentación *fed-batch* es superior a otros modos de operación y es el más utilizado a nivel industrial, ya que minimiza la inhibición por sustrato al mantener su concentración baja durante la fermentación; en este modo se inicia con una concentración moderada de sustrato y, a medida que el microorganismo lo consume y produce LA, se va agregando más, monitoreando y ajustando el pH porque el LA acidifica el medio (Rawoof, et al., 2021).

Tabla 2

Comparación general de la producción de ácido láctico

Sustrato	MO	Método de cultivo	Ácido Láctico			Pretratamiento	Ref.
			C (g/L)	R (g/g)	P (g/L*h)		
SCB	<i>Lb. delbruckii</i>	Batch	67,0	0,83	0,93	Vapor alcalino	(Adsul, 2007)
SCB	<i>B. sp</i>	Fed-Batch SHF	185	0,99	1,93	Acido-alcalino	(Peng, et al., 2014)
SCB	<i>B. coagulans</i>	Batch SScF	74,6	0,92	0,92	Vapor ácido	(VanderPol, 2016)
SCB	<i>B. coagulans</i>	Batch-SSF	71,8	0,9	2,99	Alcalino- ácido secuencial	(Nalawade, 2020)
SCB	<i>B. coagulans</i>	Batch-SSF	68,7	0,92	2,86	Alcalino - enzimático	(Nalawade, 2020)
SCB	<i>B. coagulans</i>	Batch-SSF	24,9	0,9	1,04	Acido - enzimático	(Nalawade, 2020)
SCB	<i>Lb. pentosus</i>	Batch	55,4	0,72	0,43	Acido	(Gonzales, 2020)
Lactosuero	<i>Lb. Casei</i>	Batch	96,0	0,9	2,1	Enzimático	(Büyükkileci, 2004)
Lactosuero	<i>Lb. Casei</i>	Batch	-	-	0,8-1,1	No informa	(García, 2013)
Lactosuero	<i>Lb. coryformis</i>	Continuo	45,9	0,92	9,2	No informa	(López, Alexandri,

Sustrato	MO	Método de cultivo	Ácido Láctico			Pretratamiento	Ref.
			C (g/L)	R (g/g)	P (g/L*h)		
Lactosuero	<i>Lb. Casei</i>	Batch	33,8	-	-	No informa	Schneider, & Venus, 2019)
Lactosuero	<i>Lb. rhamnosus</i>	Batch	27,5	-	-	Desproteínizado	(Panesar, 2010) (Lech, 2020)
Paja de trigo	<i>Lb. delbruckii</i>	Batch	36,7	-	-	Enzimático	(Serna & Rodríguez, 2005)
Desperdicios alimenticios	<i>Lb. Casei shirota</i>	Batch	94,0	0,94	2,61	Hidrólisis	(Kwan T.H., 2017)
Desperdicios alimenticios	<i>Escherichia coli</i>	Batch	22,6	0,73	-	Acido	(Santos, 2021)
Desperdicios alimenticios	<i>S. A620</i>	Batch SHF	39,2	3,38	0,33	Esterilizado	(Yang, et al., 2015)

Nota: MO, Microorganismo; C, concentración; R, rendimiento; P, productividad; *Lb*, lactobacillus; *B*, Bacillus; SSF, Fermentación en estado sólido; SScF, sacarificación y fermentación simultánea; SHF, Hidrólisis y fermentación separada.

Además de los modos de operación, existen distintos métodos para integrar procesos a la fermentación. El SHF permite optimizar cada etapa individualmente, el SScF mejora la conversión de azúcares en un solo paso, y el SSF reduce costos y evita la inhibición por acumulación de azúcares, siendo este último el que presenta mayor potencial para el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica en el futuro (Rawoof, et al., 2021).

Otro factor determinante en la selección de la materia prima es su contenido de lignina. Un alto porcentaje de lignina en el sustrato reduce la disponibilidad de azúcares fermentables, lo que disminuye la producción de ácido láctico y genera inhibidores del proceso. Para contrarrestar estos efectos, se emplean pretratamientos ácidos y térmicos, además de la selección de microorganismos resistentes como algunas cepas de *Lb*. Por ejemplo, el bagazo de caña de azúcar contiene un 25 %

de lignina (Jacome, 2023), la paja de trigo 8 a 13 % (FEDNA, 2023), y los residuos agrícolas entre 20 y 40 % (Torres et al, 2015).

La Tabla 3 presenta las cuatro biomásas potenciales para la producción de LA: SCB, lactosuero, paja de trigo y desperdicios alimenticios. La selección se basa en criterios técnicos y estratégicos abordados anteriormente: disponibilidad en el departamento de Santander, grado de complejidad de sus pretratamientos, facilidad de fermentación, relevancia bibliográfica según la Tabla 1 y rendimiento según la Tabla 2. Se omite el aspecto económico, ya que todas son biomásas residuales de muy bajo costo.

Tabla 3

Selección de la biomasa

Biomasa/ criterios	SCB	Lactosuero	Paja de trigo	Desperdicios alimenticios
Disponibilidad	Alta	Media-baja	Media	Alta
Pretratamiento	Medio	Bajo	Medio	Alto
Fermentación	Media	Alta	Baja	Alta
Rendimiento	Alto	Medio-alto	Medio	Medio
Bibliografía	Alta	Alta	Media	Alta

Considerando la información presentada, las materias primas que destacan son el SCB y el lactosuero. Se toma como criterios primordiales la disponibilidad y el rendimiento; por tanto, el SCB es la biomasa con mayor potencial de producción de LA en Santander, Colombia.

5.2.Capacidad de producción

A nivel nacional se tiene una producción de aproximadamente 12 millones de toneladas al año de caña de azúcar, en la cual Santander tiene una participación del 17 %, lo que equivale a 2,04 millones de toneladas por año (UPRA, 2023). Además, por cada tonelada de caña de azúcar se

producen alrededor de 264 kg de SCB de las cuales se desecha alrededor del 30 % debido a la degradación microbiológica, contaminación y deterioro (Culqui, 2023). Con base en lo anterior, es posible establecer que en Santander se producen 86.169,6 toneladas por año de CBS aprovechables. Sin embargo, para el dimensionamiento de la planta no se considerará la totalidad de este, debido a que en el entorno real existen diversos factores que puedan afectar la total disponibilidad permanente: limitaciones logísticas, variabilidad estacional de cosecha, fluctuaciones de producción, entre otros. Siendo así, se propone trabajar con el 20 % de la disponibilidad, con el fin de asegurar la sostenibilidad en el suministro, garantizar la capacidad operativa y permitir una futura expansión, fijando 86.169 toneladas por año de CBS como base para el dimensionamiento de la planta.

Por otra parte, considerando los periodos de parada de planta por mantenimiento, descansos del personal, operaciones de limpieza y ajustes en la producción, en el desarrollo del trabajo se asume una disponibilidad operativa equivalente a 330 días al año, lo que corresponde a 7.920 horas de operación anual (Fraile, 2024). Este valor se toma como base para la conversión de flujos anuales a unidades por hora, con el propósito de representar de manera más precisa las condiciones reales de operación de una planta a escala industrial.

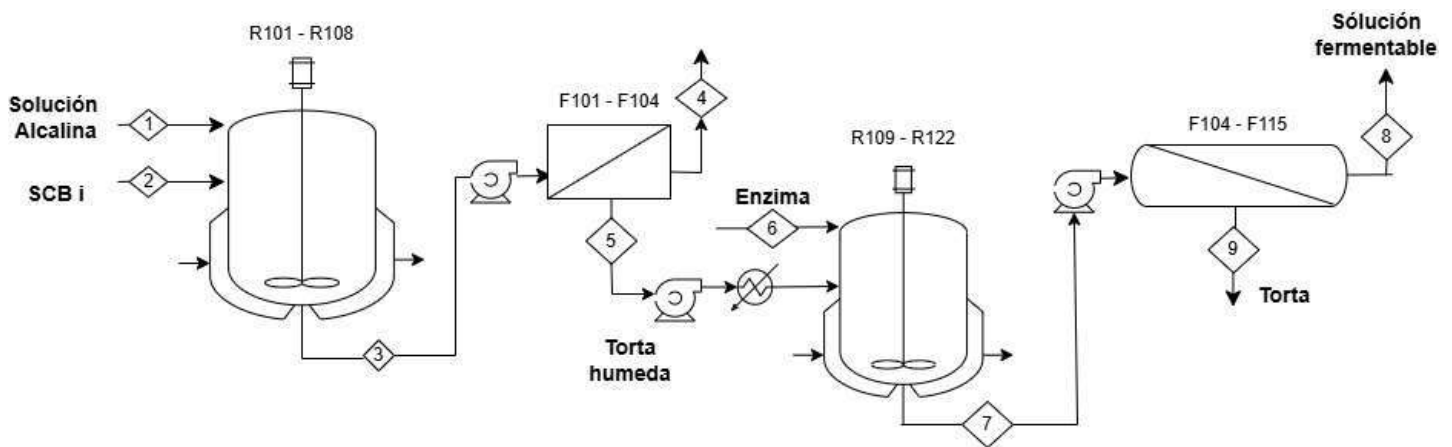
5.3.Pretratamiento de Materia prima

El SCB requiere de pretratamientos físicos y químicos, con el objetivo de eliminar la lignina, liberar los azúcares fermentables separando la celulosa y hemicelulosa, además, aumentar el área superficial accesible, despolimerizar parcialmente la hemicelulosa, y aumentar la porosidad de los materiales para ayudar en el posterior acceso de enzimas hidrolíticas (Gasca, 2019).

En primer lugar, se dan los pretratamientos físicos, donde se reduce el tamaño de la caña para aumentar la superficie de contacto y se extrae el jugo separando los azúcares solubles del bagazo (Vuan, 2018). Posteriormente, se da un tratamiento químico o fisicoquímico, el cual depende del microorganismo y de las consideraciones generales del proceso. Como se muestra en la Tabla 2, las bacterias *Lb. bruckii* requieren pretratamientos con vapor alcalino, una combinación de explosión con vapor y tratamiento con una base (NaOH), lo que permite la deslignificación parcial y la ruptura de la hemicelulosa, dejando una celulosa más accesible para la posterior hidrólisis enzimática.

Por otro lado, en las bacterias *Lb. Pentosus* y *Lb. Casei* se emplea un pretratamiento de hidrólisis ácida, que convierte la celulosa y la hemicelulosa en azúcares fermentables. Por último, en las bacterias *B. coagulans* los pretratamientos con mejores resultados en términos de rendimiento y concentración de LA se dan por medio de la hidrólisis alcalina combinada con un proceso de hidrólisis enzimática.

El modelo presentado en la Figura 2 se basa en el diseño de experimentos para la producción de LA a partir de SCB con pretratamiento de hidrólisis alcalina y enzimática propuesto por Nalawade (2020). En primer lugar, ingresa el SCB lavado, desmedulado, triturado y empapado a los 8 reactores de hidrólisis con hidróxido de sodio 2 M a 100 °C; luego de media hora, el líquido amarillo resultante se filtra y lava por medio de conjunto de 11 filtros rotatorios al vacío, posteriormente, la corriente pasa por 14 reactores enzimáticos ubicados en paralelo a 50 °C y 4.8 de pH, la enzima usada es *Cellic CTec2* cargada a 30 FPU/g de SCB, en este paso la celulosa y hemicelulosa expuestas se convierten en azúcares fermentables. Por último, se remueve materia orgánica no reaccionante y agua por medio de 11 módulos de ultrafiltración.

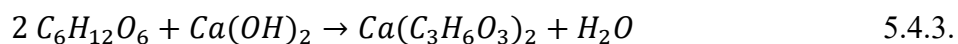
Figura 2*Proceso de pretratamiento al SCB*

Según Resano et al, (2022) el SCB tiene una composición química promedio de 41,86 % de celulosa, 26,85 % de hemicelulosa y 20,50 % de lignina, donde el restante es una mezcla de cenizas y extractivos (Azúcares, grasas, fenoles, entre otros). Se asume que esa será la composición de la corriente 1. Además, según Nalawde *et al*, (2020), cuya investigación presenta condiciones operativas y configuración de proceso similares a la propuesta, el 72 % de la celulosa se transforma en glucosa, produciendo 3.279,15 kg/h, y el 57,34 % de hemicelulosa se transforma en 1.675,06 kg/h de Xilosa. En cuanto a la lignina, esta se solubiliza parcialmente y retira después de la hidrólisis alcalina. Se asume una carga de sólidos del 20 %, por lo que la corriente 9 correspondiente a la solución fermentable posee 19.816 kg/h de agua.

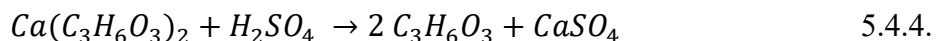
5.4.Síntesis de ácido láctico

Una vez se obtiene una solución fermentable rica en glucosa y xilosa inicia el proceso de síntesis de LA como se muestra en la Figura 3, esta configuración del proceso se basa en el diseño conceptual elaborado por Méndez, *et al* (2017) y el sistema de purificación de LA diseñado por

Gasca, (2019). En primer lugar, se inocula la solución con el M.O *B. coagulans* en el reactor tipo Batch, agitado, y cerrado, donde se lleva a cabo las reacciones 5.4.1 y 4.4.2, el proceso se realiza a 50 °C y ambiente anaerobio durante 36 horas. Además, se adicionan 10 g/L de levadura e hidróxido de calcio al 10 % p/p con el propósito de realizar la neutralización in situ del ácido láctico tal como se muestra en la ecuación 5.4.3. El medio resultante contiene principalmente una solución de lactato de calcio, junto con agua, células del M.O y residuos orgánicos. En este paso se lleva a cabo la conversión a LA (Gasca, 2019).



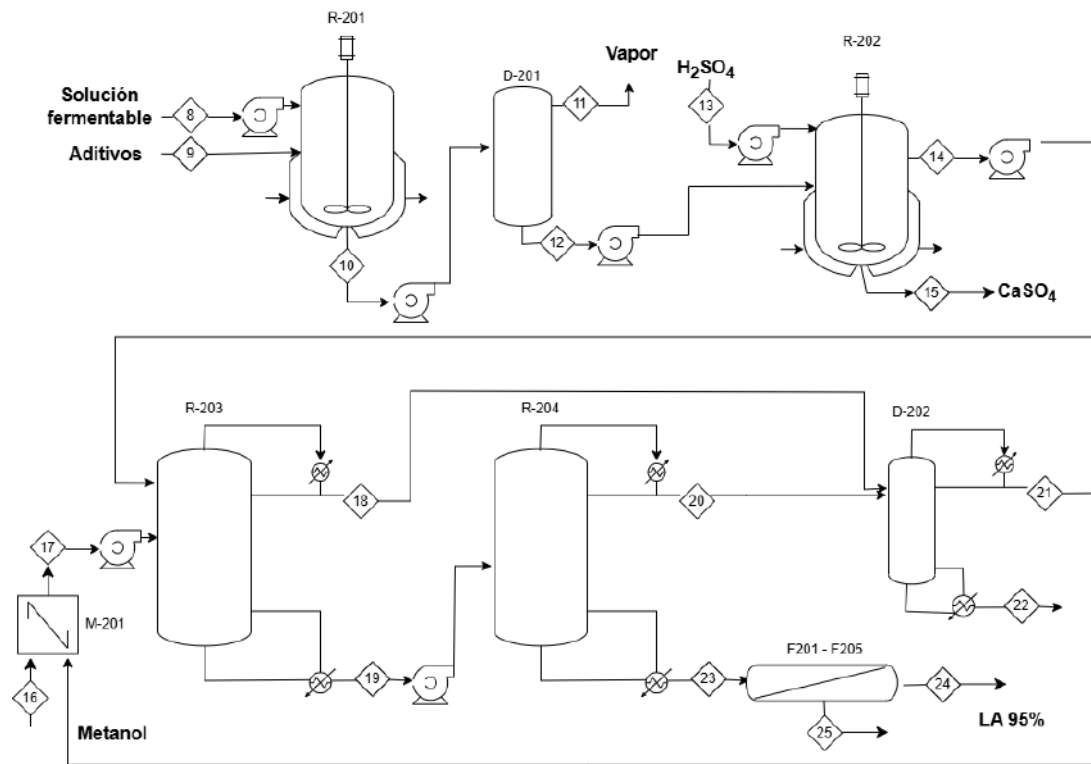
A continuación, se lleva a cabo la acidificación de la solución de lactato de calcio mediante la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en un reactor agitado a 80 °C, pH 2.0 y tiempo de reacción 1 hora, según la ecuación 5.4.4. Durante esta reacción, el ácido sulfúrico desplaza el ion calcio, permitiendo la liberación del ácido láctico en forma libre, y generando como subproducto sulfato de calcio (Yeso), el cual precipita como sólido. (Méndez, 2017) .



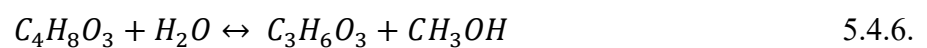
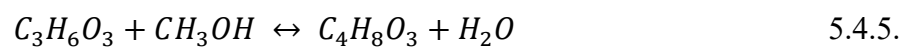
La recuperación del LA es compleja debido a su alta afinidad con el agua y su baja volatilidad. El proceso tradicional implica neutralización, filtración, decoloración, evaporación y acidificación. Sin embargo, debido a su alto consumo de energía y reactivos químicos, se han explorado alternativas más sostenibles como la destilación reactiva, procesos con membranas y extracción líquido-líquido (Komesu, 2017).

Figura 3

Proceso de síntesis y purificación del LA



El proceso de purificación se finaliza aplicando una columna de destilación reactiva para producir la esterificación según la Ecuación 5.4.5. La corriente que sale por la base de la columna se bombea a la siguiente columna reactiva donde se lleva a cabo la hidrólisis para obtener ácido láctico, según la Ecuación 5.4.6. la solución resultante rica en LA es llevada a un equipo de ultrafiltración compuesto por 4 módulos, en el permeado se obtiene la solución final de LA. Por último, se lleva la corriente rica en metanol a otra columna de destilación convencional para recuperar la totalidad del metanol del proceso y reincorporarlo.



5.5. Producción estimada de ácido láctico

Se consideró el valor de rendimiento propuesto por Nalawde et al (2020) en la Tabla 2 de 0,9 g/g; por lo tanto, se proyectó una producción potencial de 2.460,51 kg/h de LA al 95,95 %. En la Tabla 4 se resume la información (cálculos en Anexos A y B) sobre los equipos utilizados en el pretratamiento, síntesis de LA y recuperación del metanol, donde el volumen hace referencia al volumen encontrado junto con el sobredimensionamiento asumido, y los requerimientos energéticos corresponden a las necesidades específicas del equipo: calentamiento, agitación y/o bombeo.

Tabla 4

Operación equipos usados en el proceso de obtención de LA

Equipo	Nombre	Operación	Volumen [m ³]	Requerimiento energético [W]
Reactor Hidrólisis alcalina	R101 - R108	Pretratamiento MP	217,6	17.780,0
Filtro rotatorio al vacío	F101 - F104	Pretratamiento MP	2,7	166.880,0
Reactor Hidrólisis enzimática	R109 - R122	Pretratamiento MP	1.386,8	12.569,4
Ultrafiltración	F104 - F115	Pretratamiento MP	55,0	5.980,0
Fermentación	R201	Síntesis LA	991,6	3.889,0
Destilador Flash	D201	Síntesis LA	4,7	640.463,2
Reactor lactato a LA	R202	Síntesis LA	10,3	4.177,9
Destilación reactiva 1	R203	Síntesis LA	24,1	8.314.000,0
Destilación reactiva 2	R204	Síntesis LA	3,1	875.333,0
Ultrafiltración	F201 - F205	Síntesis LA	1,2	355,9
Torre destilación	D202	Recuperación metanol	8,1	571,9
Mixer 1	M201	Recuperación metanol	0,02	1,0

5.6. Síntesis de ácido poliláctico

La síntesis de PLA se da principalmente por medio de cuatro vías (Anexo D): policondensación directa con el acoplamiento de las cadenas, en estado sólido o en solución, deshidratación azeotrópica y polimerización por apertura de anillo (ROP) por medio de la

polimerización de la lactida. Con el propósito de seleccionar una vía de síntesis se presenta la Tabla 5, donde se realiza una comparación de las cuatro vías con respecto al peso molecular, pureza, costo y eficiencia. A partir de esta se deduce que la polimerización por apertura de anillo (ROP) presenta los mejores resultados.

Tabla 5

Métodos en la síntesis de PLA

Proceso	Peso molecular	Pureza	Condiciones de reacción	Costo	Eficiencia	Fuente
Policondensación directa	Bajo-Medio	Moderada	↑ Temperatura y vacío	Bajo	Limitada	(Fernández R. , 2020)
Policondensación en estado sólido	Medio-Alto	Alta	↑ Temperatura y tiempo prolongado	Medio	Mejorada	(Fernández R. , 2020)
Deshidratación azeotrópica	Alto	Moderada	Uso de solventes orgánicos	Medio-Alto	Alta	(Núñez, 2019)
ROP	Muy alto	Muy alta	Temperatura controlada-catalizadores metálicos	Alto	Muy alta	(Núñez, 2019)

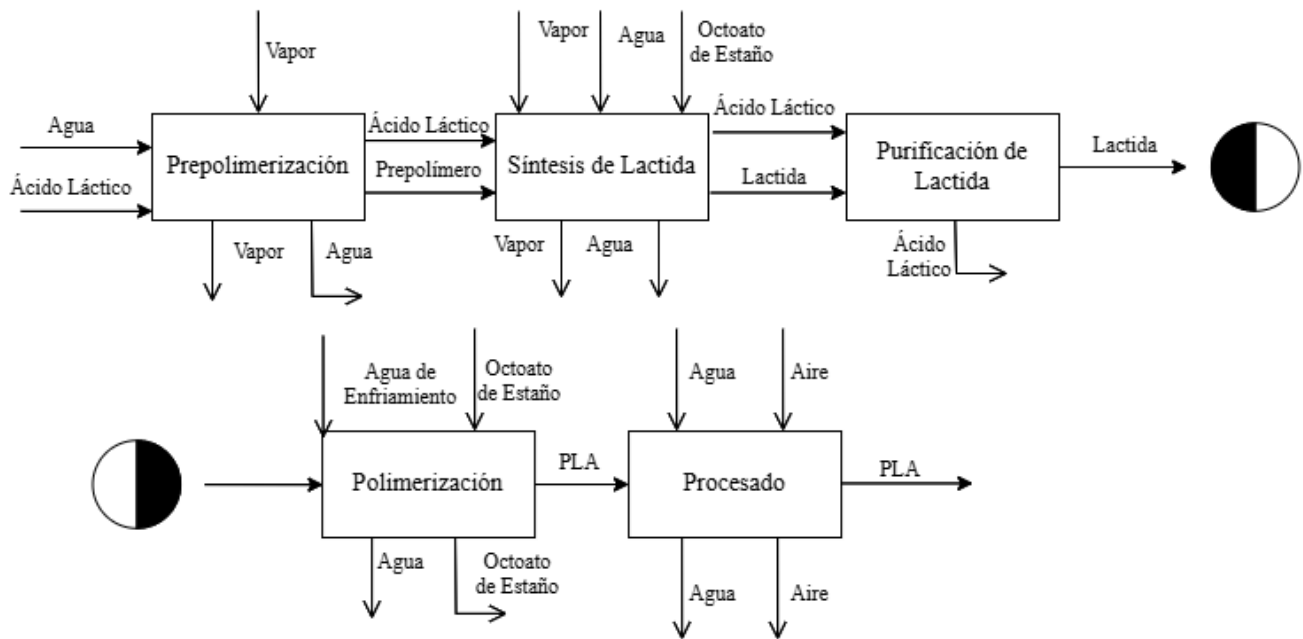
En consecuencia, se consideró la ruta de síntesis mostrada en la Figura 4, la cual abarca desde la entrada de la materia prima hasta la obtención del PLA. En este esquema también se incluyen los servicios requeridos, las materias primas y los productos involucrados. La ruta de síntesis cuenta con una etapa de prepolimerización, importante para obtener un polímero de bajo peso molecular. Inicialmente, se evapora el agua y luego se produce la lactida, a la cual se le retiran todas las impurezas y se remueve el LA restante para permitir la obtención de PLA con alto peso molecular y alto grado de pureza. Aunque existen otras técnicas, esta es la más usada en la industria debido a que no requiere el uso de solventes, lo que contribuye a una mayor pureza del producto

final. Además, su consumo energético es menor comparado con otras rutas de síntesis, ya que opera a temperaturas más bajas (Fernández R. , 2020).

Por otra parte, el proceso de producción descrito a continuación en las secciones de prepolimerización, síntesis de lactida y polimerización de PLA está basado principalmente en la patente WO1995009879A1 de Guber (1993) y las consideraciones operativas propuestas por Núñez, (2019).

Figura 4

Proceso de producción de PLA

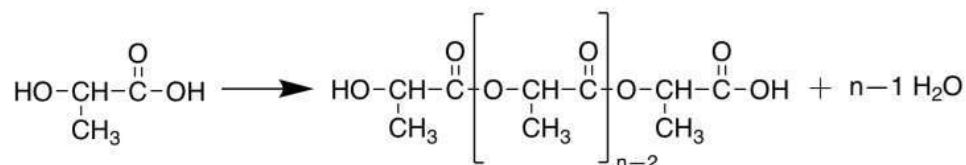


5.7. Prepolimerización.

La etapa de prepolimerización consiste en la policondensación del ácido láctico, tal como lo muestra la Figura 5 donde los monómeros se unen mediante enlaces éster para formar oligómeros de bajo peso molecular a la vez que se elimina el agua como vapor, facilitando la posterior conversión en lactida (Rueda-Durán *et al.*, 2022).

Figura 5

Reacción de oligomerización del LA



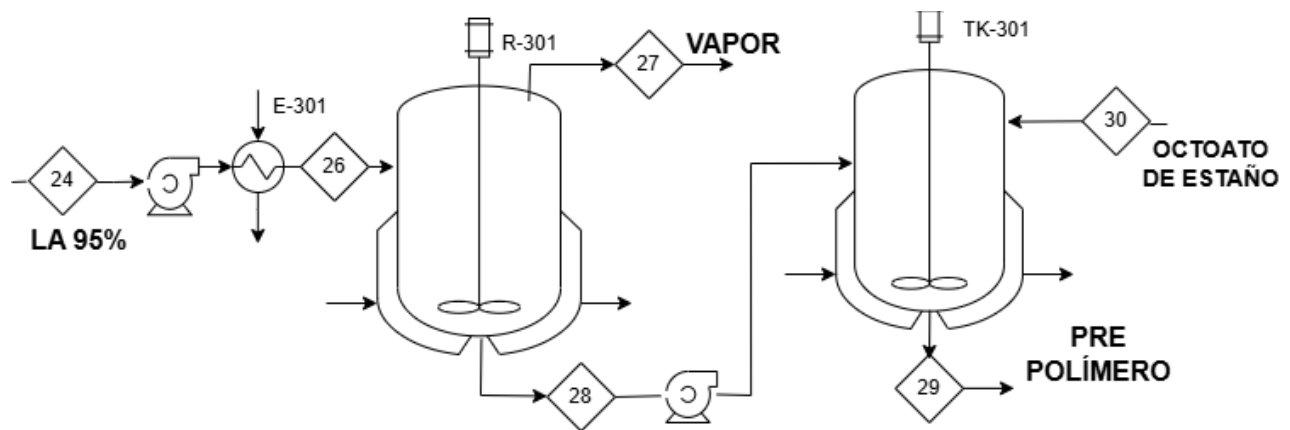
Tal como se ve en la Figura 6, el ácido láctico ingresa al 85 % para pasar por un intercambiador de calor que eleva su temperatura a 80 °C con presión de 50 mmHg. Luego, la mezcla se transfiere al reactor tipo Batch donde se agita y, con ayuda de una chaqueta, se incrementa progresivamente la temperatura hasta 180 °C. Este aumento gradual de permite minimizar las pérdidas de LA durante la eliminación de agua en forma de vapor. Una vez finalizada la reacción, se transfiere la solución con ayuda de una bomba a un tanque de espera en el que se conserva la temperatura y agita levemente para conservar el estado del pre-polímero. En la Tabla 6 se muestran los flujos obtenidos dentro del proceso.

Tabla 6

Flujos obtenidos en la prepolimerización

Corriente/Flujo [Kg/h]	24	26	27	28	29
LA	2.360,25	2.360,25	0,00	113,21	113,21
Agua	100,26	100,26	471,86	0,00	0,00
Pre-polímero	0,00	0,00	0,00	1.788,13	1.788,13
Octoato de estaño	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25
Total [Kg/h]	2.460,51	2.460,51	471,86	1.901,33	1.902,59

Figura 6
Proceso de prepolimerización.



Según lo expuesto por Vu, *et al* (2005), se asume que en el proceso de oligomerización se elimina casi la totalidad del agua, quedando solo 0,02 % en peso, y que se alcanzan oligómeros de grado 20. Por lo tanto, el peso molecular promedio del pre-polímero resultante será de 1.350 g/mol. A su vez, Castro, (2012) presenta la cinética en la reacción de la prepolimerización a 180°C, donde a partir de las 9 horas el porcentaje residual de LA se mantiene constante hasta 11 horas. Las condiciones a las que se realiza este proceso son las dadas en la Tabla 7.

Tabla 7

Especificaciones del proceso de prepolimerización

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	180	°C
Presión	50	mmHg
Conversión	97	%
Tiempo de reacción	9	horas

5.8.Síntesis de la lactida.

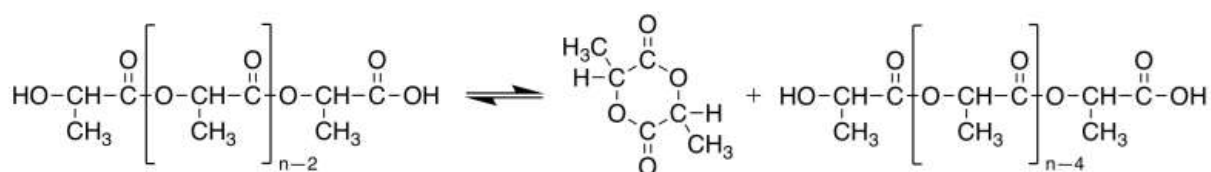
Una vez obtenido el pre-polímero, es necesario mezclarlo con un catalizador para continuar con el proceso de ROP. La selección del catalizador más adecuado se realizó a partir de una

comparación presentada en la Tabla C1 del Anexo C, en la que se evaluaron criterios clave como la conversión, la toxicidad, el costo y el alcance de aplicación. La conversión se consideró fundamental, ya que una mayor eficiencia favorece el rendimiento global del proceso. La toxicidad también fue un aspecto relevante, debido al objetivo de minimizar el impacto ambiental asociado al uso de sustancias peligrosas. Por otro lado, el costo del catalizador se analizó con el propósito de asegurar la viabilidad económica, competitividad del proceso en el mercado y el alcance de aplicación del producto final. A partir de la información presentada, se seleccionó el octoato de estaño (OE) como el catalizador más adecuado para el proceso.

Luego, la mezcla se debe transferir de forma continua al reactor de despolimerización. En este equipo, las reacciones de polimerización y despolimerización, descritas en la Figura 7, ocurren de manera simultánea. Durante este proceso la temperatura continúa incrementándose mientras que la presión se mantiene constante, lo que da como producto una corriente de lactida junto con ácido láctico (LA) que no reaccionó en la etapa anterior.

Figura 7

Reacción de polimerización - despolimerización

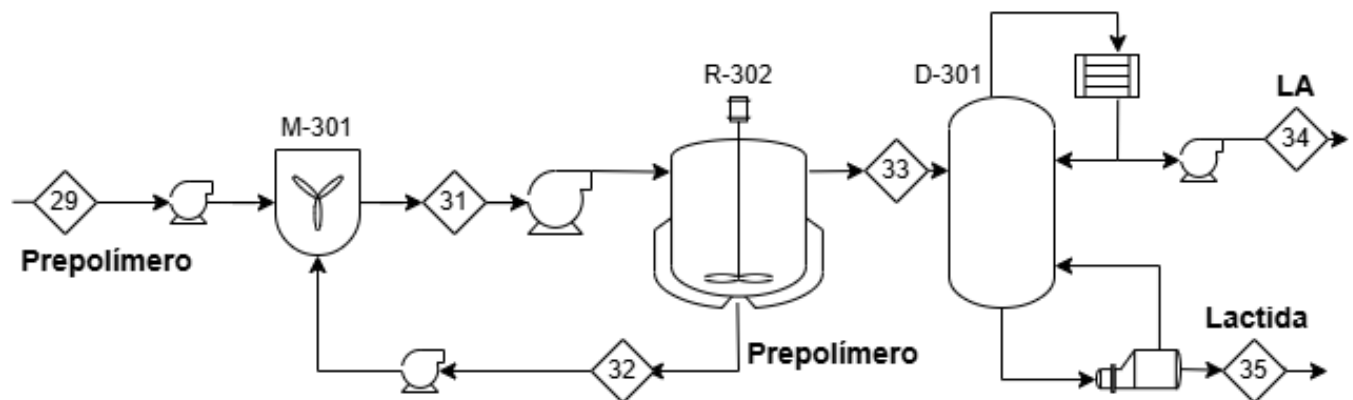


La producción de lactida consiste en la despolimerización térmica de los oligómeros en presencia del catalizador. En primer lugar, debe haber un mezclado entre pre-polímero sin reaccionar en reciclo, saliente del reactor R-302, con el pre-polímero que sale del R-301. La corriente que sale del reactor de lactida también lleva ácido láctico, tal como se puede ver en la

Figura 8. Con el fin de aumentar el rendimiento y la velocidad de reacción se debe llevar a cabo a altas temperaturas y presiones reducidas (Dalmau & Pardo, 2020).

Figura 8

Producción de lactida.



Considerando lo anterior, se establecieron las condiciones del proceso reportadas en la Tabla 8 (Núñez, 2019). El pre-polímero entra a ser mezclado con el catalizador, que se añade en una proporción del 0.07 % p/p, con una conversión de este del 90 %. Finalmente, en la Tabla 9 son reportados los flujos correspondientes al proceso.

Tabla 8

Variables producción de lactida

Variable	Valor
Temperatura	210 °C
Presión	50 mmHg
Conversión	90%

Tabla 9

Flujos producción de Lactida

Corriente/Flujo [Kg/h]	31	32	33
Octoato de estaño	1,25	0,00	1,25

Lactida	0,00	0,00	1.788,13
Pre-polímero	1.986,81	198,68	0,00
LA	113,21	0,00	113,21
Total [Kg/h]	2.101,27	198,68	1.902,59

5.9.Polimerización de PLA.

Tal como se muestra en la Figura 9, la lactida entra a un reactor de tanque agitado a temperaturas entre 130 y 200 °C, sin superar los 240 °C para evitar la racemización, en la que hay una pérdida estereoquímica que disminuye las propiedades del PLA (Campozano & Riera, 2022). En este paso la temperatura disminuye respecto a la etapa de síntesis de la lactida y la presión puede incrementar hasta a 1 atm. Considerando esto, se plantearon las variables de proceso reportadas en la Tabla 10, para obtener una conversión del 95 % de lactida en PLA, en presencia del catalizador que se añade en un 0,05 % en peso respecto a la cantidad de lactida que entra. Los flujos se reportan en la Tabla 11.

Figura 9

Proceso de polimerización del PLA

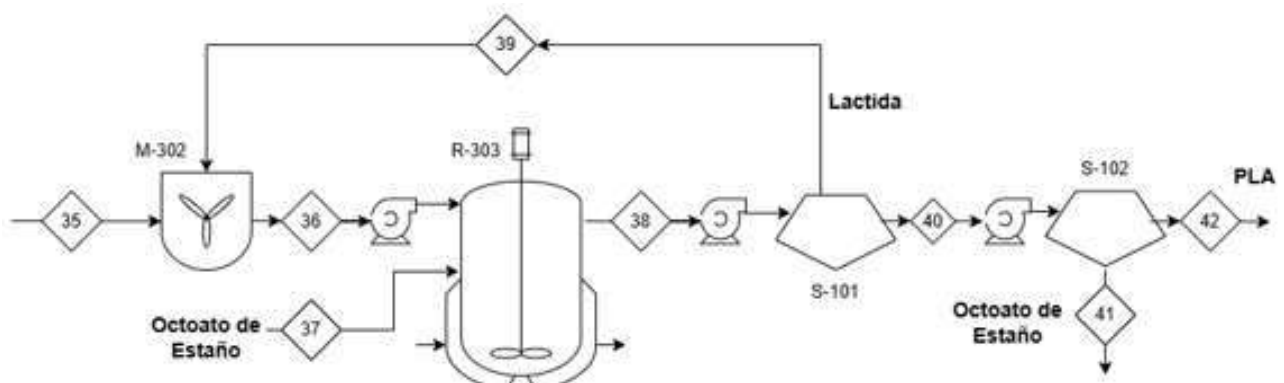


Tabla 10

Variables en la ROP

Variable	Valor
Temperatura	150°C
Presión	1 atm
Conversión	95%

Tabla 11

Flujos producción de PLA

Corriente/Flujo [kg/h]	35	36	37	38	39	40	42	41
Lactida	1.788,13	1.877,53	0,00	89,41	89,41	0,00	0,00	0,00
Octoato de estaño	1,25	1,25	0,94	2,19	0,00	2,19	0,00	2,19
PLA	0,00	0,00	0,00	1.783,66	0,00	1.783,66	1.783,66	0,00
Total	1.789,38	1.878,78	0,94	1.875,25	89,41	1.785,85	1.783,66	2,19

5.10. Producción estimada de PLA.

A partir del proceso propuesto de polimerización por apertura de anillo y los parámetros establecidos por (Núñez, 2019), se obtuvo un total de PLA de 1.783.66 kg/h con un peso molecular de aproximadamente 138.000 g/mol. En la Tabla 12 se presenta un resumen de los principales equipos usados, junto su dimensionamiento y requerimientos energéticos, dichos valores se obtienen a partir de los cálculos mostrados en el Anexo C, donde se tuvo en cuenta la función específica de cada equipo en el proceso.

Tabla 12

Operación equipos usados en el proceso de obtención de PLA

Equipo	Nombre	Operación	Volumen [m³]	Requerimiento energético [kW]
Intercambiador prepolimerización	E-301	Aumentar Temperatura	----	108,86

Equipo	Nombre	Operación	Volumen [m³]	Requerimiento energético [kW]
Reactor de prepolimerización	R-301	Reactor de prepolimerización	33,99	222,57
Tanque de almacenamiento	Tk-301	Tanque de almacenamiento	5,77	----
Mezclador síntesis lactida	M-301	Mezcla de pre-polímero sin reaccionar	3,19	----
Reactor síntesis de lactida	R-302	Reactor síntesis de lactida	26,24	136,57
Mezclador ROP PLA	M-302	Mezcla lactida sin reaccionar	2,85	----
Reactor de polimerización	R-303	Reactor de producción de PLA	24,13	251,63
Separador de lactida y PLA	S-301	separación del PLA con catalizador y la lactida	2,71	19.9
Separador de catalizador y PLA	S-302	separación OE y PLA	2,71	---

6. Análisis económico.

6.1. Costos de equipos

Para el cálculo de todos los equipos se aplicó el método desarrollado por Guthrie en 1969, teniendo en cuenta las ecuaciones D.1 a D.4 del Anexo D. Al ser un modelo tan antiguo, se hizo una corrección del costo a la actualidad usando el *Chemical engineering's plant cost index* (CEPCI), que para el año 2025 es de 800 (Jenkins, 2025). A partir de ello se obtuvieron los resultados de la Tabla 13.

Tabla 13

Costos por equipo

EQUIPO	Costo [USD]	Costo 2025 [USD]
R-101/R-108	\$ 35.356	\$ 237.689
F-101/F-104	\$ 42.642	\$ 175.189
R-109/R-122	\$ 674.557	\$ 4.534.836
F-105/F-115	\$ 142.741	\$ 959.607
R-201	\$ 209.597	\$ 1.409.053
D-201	\$ 7.241	\$ 48.677
R-202	\$ 11.856	\$ 79.704
R-203	\$ 23.689	\$ 159.251
R-204	\$ 24.101	\$ 162.020
F-201/F-205	\$ 26.059	\$ 175.189
D-202	\$ 11.940	\$ 80.271
M-201	\$ 590	\$ 3.968
E-301	\$ 691	\$ 4.646
R-301	\$ 24.664	\$ 165.809
TK-301	\$ 30.848	\$ 17.610
M-301	\$ 48.976	\$ 329.249
R-302	\$ 20.503	\$ 137.836
M-302	\$ 27.397	\$ 184.184
R-303	\$ 19.897	\$ 133.763
S-301	\$ 27.163	\$ 182.610
S-302	\$ 27.163	\$ 182.610

EQUIPO	Costo [USD]	Costo 2025 [USD]
Total		\$ 9.363.772

Una vez estimados los costos de los equipos principales, se procedió al cálculo del costo total de la planta utilizando el método de Chilton (Núñez, 2019), el cual aplica factores de ponderación promedio para estimar los costos asociados a las demás secciones del proyecto, reportados en la tabla 14.

Tabla 14

Costo directo, indirecto y total de la planta

Concepto	Factor	Costo [USD]
Equipos principales	1	\$ 9.363.771,00
Equipos instalados	1,4	\$ 13.109.279,40
Tuberías	0,1	\$ 936.377,10
Instrumentación	0,1	\$ 936.377,10
Ediciones y preparación de terreno	0,6	\$ 5.618.262,60
Auxiliares	0,25	\$ 2.340.942,75
Líneas exteriores	0,02	\$ 187.275,42
Costo directo total		\$ 32.492.285,37
Ingeniería y construcción (alta complejidad)	0,4	\$ 3.745.508,40
Contingencia y beneficios contratista	0,15	\$ 1.404.565,65
Factor del tamaño (grande)	0,02	\$ 187.275,42
Costo indirecto total		\$ 37.829.634,84
Total		\$ 70.321.920,21

A pesar de la abundante disponibilidad de bagazo de caña de azúcar (SCB) en Colombia y su potencial como materia prima para la producción de PLA, su implementación industrial aún enfrenta limitaciones técnicas y económicas. El análisis conceptual evidenció que el pretratamiento representa la etapa más crítica del proceso, con un costo estimado de equipos de \$5.907.321, y un costo total de \$44.363.981, correspondiente al 63 % del costo total de la planta.

Esto se debe a las condiciones severas requeridas y al dimensionamiento de equipos de gran escala. Este hallazgo coincide con la información reportada en la literatura (Agrawal, *et al*, 2023): a pesar de identificar grandes avances en las etapas iniciales y finales del proceso, su aplicación industrial sigue en investigación, ya que se deben superar retos como la costosa sacarificación, la modificación genética de cepas para tolerancia al pH, el cumplimiento de métricas industriales y la viabilidad económica del procesamiento posterior.

Por otra parte, La conversión de glucosa a LA está ampliamente consolidada industrialmente, con alta productividad y selectividad. En contraste, la fermentación de xilosa aún se encuentra en fase de desarrollo y depende del uso de cepas modificadas genéticamente, cuya eficiencia y estabilidad no han sido plenamente validadas a gran escala. Los mayores retos al producir LA se encuentran en minimizar el tiempo de fermentación y en optimizar el sistema de purificación posterior, donde se requieren diferentes pasos para obtener LA a elevadas concentraciones.

Finalmente, la síntesis por polimerización está completamente implementada a escala industrial por empresas como *NatureWorks* y *Total Corbion PLA*. La tecnología permite obtener polímeros de alta calidad y peso molecular, aunque requiere condiciones operacionales estrictas es un proceso con buenos rendimientos y financieramente viable con un CAPEX moderado de 10 millones de dólares, correspondiente al 14 % del CAPEX total.

En conjunto, el análisis confirma que, aunque la tecnología para la síntesis de PLA está madura, las etapas previas, especialmente la valorización del SCB y la fermentación de xilosa, representan los principales obstáculos técnicos y económicos para su implementación integral a escala industrial.

6.2. Costos Operativos

Dentro de los costos operativos se consideró el valor de las materias primas utilizadas durante el proceso. La principal materia prima, el bagazo de caña de azúcar (SCB), solo implicó costos asociados a su transporte al ser un residuo. El hidróxido de sodio mostró un costo mayor, teniendo un valor aproximado de 37 millones de USD/año, debido al alto volumen de consumo. Otras materias primas que tuvieron participación significativa incluyen la levadura, la enzima y el ácido sulfúrico, para un costo total de 49.6 millones de USD/año, reportado en la Tabla 15.

Tabla 15

Costos Materias Primas

Materia Prima	[USD /Kg]	Cantidad [kg/año]	Costo anual [USD/año]	Referencia
SCB	---	86.169.600,00	\$ 1.077.120	(Liz, s.f.)
Hidróxido de sodio	0,29	130.977.792,00	\$ 37.983.560	(Businessanalytiq, 2023)
Enzima	6,27	538.560,00	\$ 3.376.771	(Liu et al, 2015)
Levadura	2,84	1.854.315,63	\$ 5.266.256	(Huevo, M)
Hidróxido de calcio	0,16	3.923.731,87	\$ 627.797	(Mike, 2023)
H2SO4	0,1182	10.176.661,15	\$ 1.202.881	(Mike, 2025)
Metanol	0,39	138.961,23	\$ 54.195	(Mike, 2024)
Octoato de estaño	1449,72	6,57	\$ 9.525	(Fisherci, s.f.)

Por otro lado, se tuvieron en cuenta dentro de los costos operativos los servicios requeridos (Tabla 16), para lo cual se calculó el costo unitario de cada uno según los valores de mercado en el departamento. Para el consumo anual, se tuvo en cuenta el requerimiento específico de cada equipo y, diferenciando el proceso en tres secciones: pretratamiento, síntesis de LA y síntesis de LA, se concluye que la producción de LA es la etapa que más consume servicios industriales.

Tabla 16*Costos servicios requeridos*

Materia prima	Costo Unitario	Consumo Anual	Costo Anual [USD/año]
Electricidad	0,12 USD/kWh	159.087.476,92kW	\$ 19.090.497
Agua	0,82 USD/m3	22.412.308,98m3	\$ 18.378.093
Vapor Saturado	0,0000054 USD/Kg	\$633.311.243,10Kg	\$ 3.420

Finalmente, para términos de la operación se tiene en cuenta el personal de la planta, siguiendo la heurística propuesta por (Shafinas & Rosentrater, 2020). Los salarios se calcularon conforme a lo establecido por la legislación laboral, incluyendo prestaciones y otros beneficios. Se obtuvo un costo total de 649,260 USD, reportado en la Tabla 17.

Tabla 17*Costos personal*

Tipo de contrato	Cargo	Experiencia	Cant.	Salario Base	Costo trabajador	Costo total
Termino indefinido	Operario técnico	> 5 años	29	\$ 95	\$ 867	\$ 25.153
Termino indefinido	Ingeniero de área	> 5 años	3	\$ 1.238	\$ 2.057	\$ 6.171
Termino indefinido	Ingeniero coordinador	Posgrado	2	\$ 2.104	\$ 3.395	\$ 6.791
Termino indefinido	Personal administrativo I	> 2 años	6	\$ 495	\$ 761	\$ 4.567
Termino indefinido	Talento humano	> 2 años	1	\$ 495	\$ 761	\$ 761
Termino indefinido	Personal administrativo II	> 2 años	7	\$ 867	\$ 1.332	\$ 9.325
OPS	Personal de seguridad	> 1 años	3	\$ 446	\$ 446	\$ 1.3387
Total mensual						\$ 54.105
Total Anual						\$ 649.260

6.3. Horizonte del proyecto

Dentro de los ingresos se tuvo únicamente en cuenta la venta anual del PLA \$ 2800 USD/Kg, obteniendo así un ingreso en el primer año de \$ 39,554,339 USD. Una vez dado este valor se procede a hallar los flujos de caja para analizar la viabilidad del proyecto, la cual se reportó en la tabla 18 y 19, teniendo en cuenta un horizonte de 10 años. Para el año 7 se recupera la inversión hecha, donde también se empiezan a reportar ganancias. Los costos operativos iban aumentando año a año con la inflación estimada del 3 %, según (Banrep, 2025). Por otra parte, los ingresos del PLA fueron aumentando 1 % cada año, esperando que al año 2032 tenga un incremento del 27.2 %, según (Global growth insights, 2024).

Tabla 18

Flujos de caja en los primero 5 años.

Indicador	0	1	2	3	4	5
Capex	\$ 70.321.920					
Opex	\$ 87.719.366	\$ 90.350.947	\$ 93.061.476	\$ 95.853.320	\$ 98.728.920	\$ 101.690.787
Ventas	\$ 39.554.339	\$ 45.487.490	\$ 52.765.488	\$ 61.735.621	\$ 72.848.033	\$ 86.689.159
Total	-\$ 118.486.948	-\$ 44.863.458	-\$ 40.295.988	-\$ 34.117.699	-\$ 25.880.887	-\$ 15.001.628

Tabla 19

Flujos de caja en los últimos 5 años.

Indicador	6	7	8	9	10
Capex					\$ 84.386.304,25
Opex	\$ 104.741.510,96	\$ 107.883.756,28	\$ 111.120.268,97	\$ 114.453.877,04	\$ 117.887.493,35
Ventas	\$ 104.026.991,33	\$ 125.872.659,51	\$ 153.564.644,60	\$ 188.884.512,85	\$ 234.216.795,94
Total	-\$ 714.519,63	\$ 17.988.903,22	\$ 42.444.375,62	\$ 74.430.635,81	\$ 267.717.985,04

A partir de los flujos de caja libre estimados, se obtuvo un Valor Neto Actual (VNA) de 118.465.343 USD, calculado con una tasa de descuento del 10 %, valor considerado representativo

para este tipo de proyectos. Asimismo, se determinó una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 1 %, empleando para ambos cálculos las ecuaciones D.5 y D.6 presentadas en el Anexo D. Estos resultados, basados en los valores netos anuales de los flujos de caja, se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20*Crterios económicos*

Criterio	Valor
VNA	-\$118.465.343
TIR	1%
TMAR	10%

Conclusiones

El bagazo de caña de azúcar (SCB) se identificó como la biomasa residual más viable para la producción de PLA en Santander, Colombia, gracias a su alta disponibilidad, buen rendimiento en la producción de ácido láctico (alrededor de 0,9 g/g) y moderado contenido de lignina (25 %), lo que facilita el pretratamiento y favorece su integración en procesos continuos o semicontinuos.

Se desarrolló un diseño conceptual del proceso, estructurado en tres etapas principales: pretratamiento de la biomasa, fermentación y purificación del ácido láctico, y síntesis de PLA mediante ROP. El pretratamiento se identificó como la etapa más exigente en términos técnicos y de infraestructura, ya que, para manejar el volumen de operación propuesto bajo las condiciones derivadas de estudios a escala de laboratorio, se requeriría un total de 22 reactores para llevar a cabo las etapas de hidrólisis alcalina y enzimática. Por otra parte, la fermentación presentó menor complejidad operativa; sin embargo, su etapa de purificación resultó intensiva, debido a que la destilación reactiva se realiza en dos etapas y requiere condiciones estrictamente controladas en las columnas para alcanzar el grado de pureza planteado. Finalmente, la etapa de síntesis se configuró como un proceso compacto, pero con alta sensibilidad operativa, lo que exige un control riguroso para garantizar una conversión eficiente y una calidad adecuada del polímero final.

Dentro del análisis económico del proyecto se demostró una viabilidad financiera dentro del horizonte propuesto. Pese a que se tienen costos operacionales elevados, la eficiencia del proceso permite la rentabilidad del proyecto; sin embargo, los indicadores financieros muestran que no resulta atractivo para la inversión: se obtuvo un valor neto actual (VNA) de -\$118.465.343 USD y una tasa interna de retorno (TIR) del 1 %. Aunque esta TIR positiva indica que la inversión

podría recuperarse, su valor es insuficiente frente a la tasa mínima esperada, lo que implica que no se generarían beneficios significativos.

Referencias

- Abdel-Rahman, M. A. (2013). Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes. *Biotechnology Advances*, 31(6), 877–902. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.002>.
- Adsul, M. G. (2007). Lactic acid production from waste sugarcane bagasse derived cellulose. *Biotechnology letters*, 9(1), 58-62.
- Agrawal, D. &. (2023). *Recent progress on sugarcane-bagasse based lactic acid production: Technical advancements, potential and limitations*. *Industrial Crops and Products*, 193, 116132.
- Agrawal, D. &. (2023). *Recent progress on sugarcane-bagasse based lactic acid production: Technical advancements, potential and limitations*. *Industrial Crops and Products*, 193, 116132.
- Alexandre V. Grillo, &. B. (2023). Simulation of Poly-lactic Acid Production from Sugarcane Bagasse Constituents Extracted with Supercritical Water. *Chemical Engineering Transactions*, 99.
- ANDI. (13 de Octubre de 2021). *La industria molinera de trigo en Colombia esta siendo impactada por el incremento de los insumos*. Obtenido de <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17105-la-industria-molinera-de-trigo-en-colom>
- Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N., . . . Bikiaris, D. (2021). *Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications*. *Polymers*, 13, 1822. <https://doi.org/10.3390/polym13111822>.

- Banrep. (2025). *Nuestro Banco Central explicado*. Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/nuestro-banco-central/profundizacion-002?scroll=inflacion#:~:text=Por%20tal%20raz%C3%B3n%2C%20es%20importante%20para%20un,la%20Rep%C3%ABlica%20es%20del%203%20%25%20anual>.
- Barona & Briceño. (2016). *Planta piloto para producción de ácido poliláctico*, Informador Técnico, Suppl. Suplemento 1 II Simposio De Materiales Poliméricos, 80(2), 53-55. . <https://www.proquest.com/scholarly-journals/planta-piloto-para-producción-de->.
- Bhatia, S. K. (2021). Biowaste-to-biopolymer (polyhydroxyalkanoates and polylactic acid): Conversion technologies, strategies, challenges, and perspective. *Bioresource Technology*, 326, 124735. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124735>.
- Bidwai, S. (12 de 2 de 2024). *Polylactic Acid Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. Obtenido de <https://www.precedenceresearch.com/polylactic-acid-market>
- Businessanalytiq. (22 de Octubre de 2023). *Sodium hydroxide price index*. Obtenido de <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/sodium-hydroxide-price-index/>
- Büyükkileci, A. &. (2004). Batch production of L(+) lactic acid from whey by *Lactobacillus casei* (NRRL B-441). *Chemical Technology and biotechnology*.
- Campozano, I., & Riera, M. (24 de Julio de 2022). *Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones*. Obtenido de *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6908007>
- Campozano, I., & Riera, M. (2022). Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones. *Publicaciones en Ciencia y Tecnología*.

- Castro Gómez, Y., & Vera Calderon, M. (2012). *Diseño de reactores de prepolimeración y polimerización para la producción de ácido polilactico en una planta industrial*. Obtenido de Universidad de Cartagena: <https://hdl.handle.net/11227/113>
- Castro, & Escalante. (2013). *Effect of particle size and humidity on sugarcane*. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM). Universidad Industrial de Santander.
- Castro, J. &. (2012). *DISEÑO DE REACTORES DE PREPOLIMERIZACIÓN Y POLIMERIZACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO POLILACTICO EN UNA PLANTA INDUSTRIAL*. Universidad de Cartagena.
- CCB. (2023). Sector de lacteos en provincias de Santander. *Cámara de Comercio de Bucaramanga*, 9.
- CEPAL. (2020). Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual.
- Culqui, R. G. (2023). *Revalorización del bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) como residuo importante para la agroindustria*. 593 Digital Publisher CEIT, 8(3), 134-148.
- Dallos, A., Juříková, J., Paulíček, V., Gajdošík, M., Pavelková, V., & Andrýsková, V. (2024). *Isolation, selection and characterisation of microorganisms with potential to form unique consortium for wine production*. *Kvasny prumysl*, 70(1), 855-864.
- Dalmau, R., & Pardo, S. (28 de Junio de 2020). *Disseny d'una planta de producció de PLA*. Obtenido de Trabajo de fin de grado, Universitat Rovira i Virgili: https://repositori.urv.cat/estatic/TFG0011/en_TFG2929.html
- Dey, P. &. (2013). Modelling and simulation of continuous L (+) lactic acid production from sugarcane juice in membrane integrated hybrid-reactor system. *Biochemical engineering journal*, 79, 15-24.

- Di Lorenzo, M., & Androsch, R. (. (2018). *Industrial applications of poly(lactic acid)*. Springer International Publishing. Obtenido de Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid): <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64230-7>
- FAO. (2019). *Food and agriculture organization for the united nations. Alimentación: pasando de pérdidas a soluciones*.
- FEDNA. (2023). Paja de cereales (trigo y cebada). *Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal*.
- Fernández. (2014). Producción de ácido láctico a partir de Producción de ácido láctico a partir de. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES.
- Fernández, R. (12 de 07 de 2020). *Disseny d'una planta de PLA*. Obtenido de Universitat Rovira i Virgili (URV): <https://hdl.handle.net/20.500.11797/TFG2928>
- Fisherci. (s.f.). *2-Etilhexanoato de estaño(II), 96 %*, Thermo Scientific Chemicals - Reactivos bioquímicos, Lípidos y derivados lipídicos. Obtenido de 2025: <https://www.fishersci.es/shop/products/tin-ii-2-ethylhexanoate-95-thermo-scientific/11475637>
- Fraille, J. (2024). *Optimización heurística para la asignación de turnos de trabajo de agent*. Universidad de Valladolid, Escuela de ingenierias industriales.
- García. (2013). PRODUCCIÓN DE ÁCIDO LACTICO DE LACTOSUERO SUPLEMENTADO UTILIZANDO *Lactobacillus casei*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), 136-143.
- Garcia, e. a. (2010). PRODUCCIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO POR VÍA. *TEMAS AGRARIOS* , 9-26.

- Gasca, R. (2019). *Análisis tecno-económico de tecnologías alternativas de purificación en el proceso de producción de ácido láctico*. Tesis Maestría en ingeniería química. Universidad de Guanajuato.
- Global growth insights. (2024). *Lactic Acid and Poly Lactic Acid PLA Market Size, Report, 2032*.
Obtenido de https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/lactic-acid-and-poly-lactic-acid-pla-market-100820?utm_source=chatgpt.com
- Gomez, G. &. (2019). ÁCIDO LÁCTICO: UNA REVISIÓN SOBRE LOS MÉTODOS DE DETERMINACIÓN Y PURIFICACIÓN . *Biociencias* •Vol.14 • No. 2• Julio - Diciembre de 2019 • pp. 149-175 •Universidad Libre Barranquilla.
- Gonzales, A. (2020). Kinetics of lactic acid fermentation from sugarcane bagasse by. *Rev Mex Ing Quim* 19:377–386.
- Gruber, P. e. (1993). «*Continuous process for manufacture of lactide polymers with controlled optical purity*. WO1995009879A1.
- Herryman Munilla, M., & Blanco Carracedo, G. (2005). *Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias*. Obtenido de ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659007>
- Huevo, M. (s.f.). *Levadura x 500 gr Fleischmann*. Obtenido de Mundo Huevo: <https://mundohuevo.com/products/levadura-x-500-gr-fleischmann?srsId=AfmBOoqTmqzTCOgTFoHvWJKUQSy7G4XD81KZ0zpwMNfIvTqg9NYsOHbb>
- ICA. (2018). Productores agrícolas de Santander se fortalecen en el cultivo de la caña panelera. *Instituto Colombiano Agropecuario* .

- iSuoChem. (02 de 12 de 2022). *Material de envasado de alimentos degradable: las ventajas y desventajas del PLA*. Obtenido de Schem.net: https://es.schem.net/blog/degradable-food-packaging-material-the-advantages-and-disadvantages-of-pla_b57
- JACOB WHITE. (15 de Octubre de 2024). *Understanding Polylactic Acid (PLA) in Sustainable Packaging*. Obtenido de White JDC 2025 J: <https://www.jacobwhite.com/news/understanding-polylactic-acid-pla-sustainable-packaging>.
- Jacome, e. a. (2023). Revalorización del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como residuo importante para la agroindustria. *Digital Publisher*, 8(3), 134-148.
- Jenkins, S. (16 de Junio de 2025). *Chemical Engineering*. Obtenido de Chemical Engineering: https://www.chemengonline.com/2025-cepci-updates-april-prelim-and-march-final/?printmode=1&utm_source=chatgpt.com
- Karp, E. M. (2015). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of corn stover: Effects of chemical and physical parameters. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 38. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0211-1>.
- Kodali, B., & Pogaku, R. (2006). Pretreatment studies of rice bran for the effective production of cellulose. *Electron J. Environ. Agric. Food Chem*, 5:1253-1264.
- Komesu, e. a. (2017). Separation and purification technologies for lactic acid- a brief review. *BioResources*, 12 (3): 6885-6901.
- Kwan T.H., H. Y. (2017). Valorisation of food waste via fungal hydrolysis and lactic acid fermentation with *Lactobacillus casei* Shirota. *Bioresour*, 241:915–92.
- Lech, M. (2020). Optimisation of protein-free waste whey supplementation used for the industrial microbiological production of lactic acid. *Biochemical Engineering Journal*, 157, 107531.

- Liu, G., & al, e. (5 de Noviembre de 2015). *Cost evaluation of cellulase enzyme for industrial-scale cellulosic ethanol production based on rigorous Aspen Plus modeling*. Obtenido de Bioprocess And Biosystems Engineering, 39(1), 133-140: <https://doi.org/10.1007/s00449-015-1497-1>
- Liz, N. (s.f.). *COSTOS DE TRANSPORTE*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/440662134/COSTOS-DE-TRANSPORTE?utm>
- López, J., Alexandri, M., Schneider, R., & Venus, J. (2019). A review on the current developments in continuous lactic acid fermentations and case studies utilising inexpensive raw materials. *Process biochemistry*, 79, 1-10.
- Méndez, e. a. (2017). *Diseño conceptual de una planta de producción de ácido láctico a partir de residuos de la industria azucarera*. Jóvenes en la ciencia.
- Mike. (17 de Septiembre de 2023). *Calcium Hydroxide price index*. Obtenido de Businessanalytiq: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/calcium-hydroxide-price-index/>
- Mike. (17 de Septiembre de 2023). *Calcium Hydroxide price index*. Obtenido de Businessanalytiq: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/calcium-hydroxide-price-index/>
- Mike. (15 de Octubre de 2024). *Methanol price index*. Obtenido de Businessanalytiq: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/methanol-price-index/>
- Mike. (15 de Abril de 2025). *Sulfuric Acid price index*. Obtenido de Businessanalytiq: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/sulfuric-acid-price-index/>
- Molinos San Miguel. (2018). *Molinos San Miguel*. Obtenido de <https://molinosanmiguel.com/quienes-somos/>
- Nalawade, K. S. (2020). Assessment of multiple pretreatment strategies for 2G L-lactic acid production from sugarcane bagasse. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-14.

- NEWater. (2025). *Membranas de ultrafiltración: requisitos de calidad del agua*. obtenido de:
<https://www.newater.com/es/requisitos-de-calidad-del-agua-para-membranas-de-ultrafiltracion/#:~:text=Palabras%20finales-1.,reutilizaci%C3%B3n%20de%20aguas%20residuales%20industriales>.
- Núñez, M. (2019). *Planta de producción de ácido poliláctico (PLA) a partir de ácido láctico*. Universidad de Sevilla. Dpto. Ingeniería química y ambiental.
- Ojo, A. O. (2023). Lactic Acid: A Comprehensive Review of Production to Purification. *Processes*, 11(3), 68.
- Ontario. (2025). *Water and Energy Conservation Guidance Manual for Sewage Works*. Ontario Ministry of the Environment. Prepared by: XCG Consultants Ltd.
- Panesar, P. S. (2010). Production of L (+) lactic acid using *Lactobacillus casei* from whey. *Brazilian archives of Biology and Technology*, 53, 219-226.
- Peng, L., Xie, N., Guo, L., Wang, L., Yu, B., & Ma, Y. (2014). Efficient open fermentative production of polymer-grade L-lactate from sugarcane bagasse hydrolysate by thermotolerant *Bacillus* sp.
- Rawoof, S., Kumar, P., Vo, D., Devaraj, K., Mani, Y., Devaraj, T., & Subramanian, S. (2021). *Production of optically pure lactic acid by microbial fermentation: a review*. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 539-556.
- Resano, D., Guillen, O., Ubillús, F., & Barranzuela, J. (2022). *Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción*. *Inf. tecnol.* vol.33 no.2 La Serena .

- Riera, M. &. (2022). Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol 16. N° 1, enero-junio (2022), pp. 42-53.
- Rodríguez, S. y. (2015). Producción biotecnológica de ácido láctico: Estado del arte. *Ciencia y tecnología alimentaria* , 54-65.
- Rojas, A. M., Montaña, L. P., & Bastidas, M. J. (2015). Producción de ácido. *Rev. Colomb. Quim*, 44 (3), 5-10.
- Santos, e. a. (2021). Lactic acid production from food waste using the lactogenic *Escherichia coli* strain JU15: optimization of reducing sugar recovery. *JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*. Vol 97, p 668-675.
- Selinawamucii. (2023). Colombia Sugarcane Prices.
- Serna, L. &. (2007). Producción Económica de Ácido Láctico Utilizando Residuos de Cosecha y Jugos de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Agricultura Técnica*, 67(1):29-38.
- Serna, L. R. (2003). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, Vol 5-1.
- Serna, L., & Rodríguez, A. (2005). *CYTA-Journal of Food*. Obtenido de PRODUCCIÓN BIOTECNOLÓGICA DE ACIDO LÁCTICO: ESTADO DEL ARTE
BIOTECHNOLOGICAL PRODUCTION OF LACTIC ACID: STATE OF THE ART
PRODUCCIÓN BIOTECNOLÓGICA DE ÁCIDO LÁCTICO: ESTADO DO ARTE:
<https://doi.org/10.1080/11358120509487672>
- Shafinas, N., & Rosentrater, K. (16 de Enero de 2020). *Techno-Economic Evaluation of Food Waste Fermentation for Value-Added Products*. Obtenido de *Energies*:

- https://www.researchgate.net/publication/338647486_Techno-Economic_Evaluation_of_Food_Waste_Fermentation_for_Value-Added_Products
- Silva, A. (Febrero de 2020). *Design of a plant for polylactic acid polymer manufacture*. Obtenido de Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona : <https://hdl.handle.net/2445/204883>
- Swetha, T., Ananthi, V., Abhispa, B., Nallathambi, S., Kumar, P., Govarathanan, M., & Arun, A. (2023). *A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste - Its applications and degradation*. Retrieved from International Journal of Biological Macromolecules: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123703>.
- Taib, e. a. (2022, Febrero 15). *A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer*. Retrieved from Polym. Bull.: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04160-y>
- Torres et al. (2015). Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible. *Dialnet*.
- UPRA. (Febrero de 2023). *Unidad Planificación Rural Agropecuaria. Plan de Ordenamiento Productivo para la cadena Agroindustrial de la Panela*. Obtenido de UPRA: https://www.upra.gov.co/es-co/POP_Documentos/DT_A_Situacional_Cadena_Panela.pdf
- VanderPol, E. E. (2016). Production of l(+)-lactic acid from acid pretreated sugarcane bagasse using *Bacillus coagulans* DSM2314 in a simultaneous saccharification and fermentation strategy. *Biotechnol Biofuels*, 9, 248.
- Vélez, e. a. (2017). Fisiología, bioquímica y metabolismo del ácido. *Metro Ciencia*, 25 (2): 27-31.
- Vld-Eng. (20 de Julio de 2020). *Simulación de procesos industriales| Automatización VLD 2020*. Obtenido de VLD Engineering: <https://www.vld-eng.com/blog/simulacion-procesos-industriales/>

- Vu, D. (2005). *Oligomer distribution in concentrated lactic acid solutions*. Chemical engineering and materials science, Michigan State University 2527 Engineering Building, East Lansing (USA), 48824-1226.
- Vuan, V. (2018). *Tendencias de producción de ácido láctico a partir*. Obtenido de Universidad ORT Uruguay: <https://rad.ort.edu.uy/server/api/core/bitstreams/2c82ba04-3cca-4091-974d-b877460a43a1/content>
- Wee, Y. J. (2004). Utilization of sugar molasses for economical L (+)-lactic acid production by batch fermentation of *Enterococcus faecalis*. *Enzyme and Microbial Technology*, 35(6-7), 568-573.
- White, J. (15 de Octubre de 2024). *Understanding Polylactic Acid (PLA) in Sustainable Packaging*. Obtenido de White JDC 2025: <https://www.jacobwhite.com/news/understanding-polylactic-acid-pla-sustainable-packaging>.
- Yang, X., Zhu, M., Huang, X., Lin, C., Wang, J., & Li, S. (2015). Valorisation of mixed bakery waste in non-sterilized fermentation for l-lactic acid production by an evolved *Thermoanaerobacterium* sp. strain. *Bioresource technology*, 198, 47-54.
- Yankov, D. (4 de Marzo de 2022). *Fermentative Lactic Acid Production From Lignocellulosic Feedstocks: From Source to Purified Product*. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.823005>
- Zain, N. A. (2021). Optimization of L(+) Lactic Acid Production from Solid Pineapple Waste (SPW) by *Rhizopus oryzae* NRRL 395. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(1), 230–249.