

Valorización de biomasas residuales presentes en el departamento de Santander para la
producción de ácido láctico

Jhon Jairo Alexander Jaimes Hernández

Director

César Augusto Guevara Lastre

Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Codirector

Omar Andrés Benavides Prada

Magíster en Ingeniería Química

Universidad industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería química

Bucaramanga

2025

Tabla de contenidos

Introducción	8
1. Objetivos.....	10
2. Marco conceptual.....	11
2.1. Generalidades del ácido láctico	11
2.2. Producción del ácido láctico	11
2.3. Biomosas lignocelulósicas	13
2.4. Pretratamientos de las biomosas lignocelulósicas	14
2.5. Biomosas empleadas en este estudio	16
2.5.1. Residuos de cacao	16
2.5.2. Residuos de café.....	17
2.5.3. Bagazo de caña panelera	17
2.5.4. Residuos de palma africana.....	17
3. Estado del arte	19
4. Metodología.....	21
4.1. Fase 1	21
4.2. Fase 2	22
4.3. Fase 3	23
5. Resultados y discusión.....	24
5.1. Proceso de selección	24
5.2. Extracción de datos	25
5.3. Selección de estudios	25

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS	3
5.4. Características de los estudios incluidos	27
5.4.1. Distribución temporal de publicaciones	27
5.4.2. Distribución geográfica	27
5.4.3. Tipos de biomasa lignocelulósica	28
5.5. Métodos de pretratamiento	29
5.6. Residuos agroindustriales en Santander	30
5.7. Pretratamientos para las biomásas lignocelulósicas	34
5.8. Producción de ácido láctico a partir de diferentes residuos	37
6. Conclusiones	41
Referencias	43

Lista de figuras

Figura 1. Estructura de la red lignocelulósica.....	13
Figura 2. Proceso metodológico empleado en esta investigación.....	21
Figura 3. Diagrama de flujo método PRISMA.....	26
Figura 4. Diagrama del proceso seleccionado.....	41

Lista de tablas

Tabla 1. Pretratamientos a las biomásas lignocelulósicas.....	15
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión empleados en la revisión sistemática.....	23
Tabla 3. Ecuación y resultados obtenidos por cada motor de búsqueda.....	24
Tabla 4. Distribución temporal de publicaciones.....	27
Tabla 5. Mayor contribución de países a la investigación en este campo.....	28
Tabla 6. Distribución de tipos de biomásas más estudiadas	29
Tabla 7. Métodos de pretratamiento aplicados en los estudios.....	30
Tabla 8. Subproductos de diferentes residuos lignocelulósicos y su potencial de aprovechamiento.....	31
Tabla 9. Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes residuos.....	33
Tabla 10. Pretratamientos para la producción de AL a partir de biomásas	35
Tabla 11. Estudios de la producción de AL a partir de residuos lignocelulósico.....	38

Resumen

Título: Valorización de biomasas residuales presentes en el departamento de Santander para la producción de ácido láctico*

Autor: Jhon Jairo Jaimes Hernández**, César Augusto Guevara Lastre*, Omar Andrés Benavides Prada**

Palabras clave: Valorización de residuos, biomasas lignocelulósicas, pretratamientos

Descripción:

Este estudio se fundamenta en una revisión bibliográfica sobre el potencial de los residuos lignocelulósicos para la producción de ácido láctico, con un enfoque específico en el departamento de Santander, Colombia. Para ello, se analizaron diversas biomasas en función de su disponibilidad en la región y su composición estructural, determinada por los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina. Asimismo, se evaluaron diferentes estrategias de pretratamiento—incluyendo métodos físicos, químicos y biológicos—destinadas a la disrupción de la matriz lignocelulósica y la conversión de los polisacáridos en azúcares fermentables. Entre estos enfoques, los métodos químicos basados en el uso de ácidos y bases demostraron ser los más eficientes, al lograr mayores rendimientos en la producción de ácido láctico. Estos hallazgos proporcionan una base teórica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en procesos biotecnológicos sostenibles y de alto valor agregado.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería. Escuela de ingeniería química. Director: César Augusto Guevara Lastre. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada.

Abstract

Title: Valorization of residual biomass present in Santander department to produce lactic acid*

Author: Jhon Jairo Jaimes Hernández**, César Augusto Guevara Lastre**, Omar Andrés Benavides Prada**

Key words: Residues valorization, lignocellulosic biomasses, pretreatments

Description:

This study is based on a literature review on the potential of lignocellulosic waste for lactic acid production, with a specific focus on the department of Santander, Colombia. To this end, various biomasses were analyzed based on their availability in the region and their structural composition, determined by cellulose, hemicellulose, and lignin contents. Different pretreatment strategies—including physical, chemical, and biological methods—aimed at disrupting the lignocellulosic matrix and converting polysaccharides into fermentable sugars were also evaluated. Among these approaches, chemical methods based on the use of acids and bases proved to be the most efficient, achieving higher yields in lactic acid production. These findings provide a theoretical basis for the use of agroindustrial waste in sustainable, high-value-added biotechnological processes.

*Bachelor thesis

**Facultad de Ingeniería. Escuela de ingeniería química. Director: César Augusto Guevara Lastre. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada.

Introducción

La creciente demanda global de recursos renovables y la urgente necesidad de mitigar el impacto ambiental de la producción industrial, especialmente en el contexto de la contaminación por plásticos, impulsan la búsqueda de alternativas sostenibles a los combustibles fósiles y a los productos derivados del petróleo. En este escenario, la biomasa lignocelulósica, abundante y renovable, emerge como una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles y bioproductos, entre los que destaca el ácido láctico (Manandhar & Shah, 2023). Este compuesto químico, precursor del ácido poliláctico (PLA), un bioplástico biodegradable y biocompatible, representa una oportunidad clave para el desarrollo de una bioeconomía circular y la reducción de la dependencia de los plásticos convencionales.

Por otra parte, el departamento de Santander, Colombia, posee una rica diversidad de recursos lignocelulósicos, provenientes de la agricultura, la silvicultura y los residuos agroindustriales (Soto-Paz et al., 2022). Este potencial, sin embargo, permanece en gran medida inexplorado, representando una oportunidad desaprovechada para el desarrollo regional sostenible y la gestión de residuos. La transformación de estos recursos en productos de valor agregado, como el ácido láctico y posteriormente PLA, podría impulsar la economía local, generar empleo, contribuir a la gestión eficiente de los residuos y ofrecer una alternativa a los plásticos contaminantes (Adnane et al., 2024, Arpit Singh et al., 2022).

A pesar del potencial descrito, la producción de ácido láctico a partir de biomasa lignocelulósica enfrenta importantes desafíos. La compleja estructura de la lignocelulosa, compuesta por lignina, celulosa y hemicelulosa, dificulta la liberación de los azúcares fermentables necesarios para la producción del ácido. Esto requiere la implementación de

pretratamientos eficientes y rentables que permitan la despolimerización de la biomasa y la obtención de azúcares monoméricos. Además, la selección del microorganismo fermentativo adecuado, la optimización de las condiciones de fermentación, la purificación del ácido láctico y la posterior polimerización a PLA, son aspectos cruciales que influyen en la eficiencia, la viabilidad económica y la escalabilidad del proceso.

En este orden de ideas, este trabajo de investigación se justifica por la necesidad de explorar y desarrollar alternativas sostenibles para la producción de ácido láctico en el departamento de Santander, específicamente utilizando biomasa lignocelulósica local. Esta estrategia ofrece una oportunidad para: i) diversificar la economía regional, impulsando nuevas cadenas de valor basadas en recursos renovables; ii) reducir la dependencia de recursos fósiles, contribuyendo a la seguridad energética y la mitigación del cambio climático; iii) minimizar el impacto ambiental de la producción de plásticos, ofreciendo una alternativa biodegradable y biocompatible; iv) gestionar eficientemente los residuos agroindustriales, transformando un problema ambiental en una oportunidad económica; v) generar conocimiento científico y tecnológico, fortaleciendo la capacidad investigativa en la región y formando capital humano especializado. Por lo tanto, se aborda la siguiente problemática: ¿cómo mejorar la producción de ácido láctico a partir de biomasa lignocelulósica disponible en Santander, considerando la eficiencia de los pretratamientos, la selección del microorganismo fermentativo, las condiciones de fermentación y las etapas de purificación, para lograr un proceso sostenible, económicamente viable y escalable para la posterior producción de PLA como alternativa a los plásticos convencionales?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Valorizar los residuos agrícolas más relevantes del departamento de Santander, Colombia, para la producción de ácido láctico

1.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre las biomásas disponibles en el departamento de Santander, considerando su composición química y disponibilidad.
- Seleccionar las biomásas más prometedoras para la producción de ácido láctico, basándose en criterios técnicos.
- Seleccionar la etapa de pretratamiento más adecuada con base en lo reportado en la literatura.

2. Marco conceptual

2.1. Generalidades del ácido láctico

El ácido láctico (AL), cuya fórmula química es $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-COOH}$, también conocido como ácido 2-hidroxi-propanoico, es un compuesto orgánico muy versátil que ha captado un creciente interés tanto en la investigación científica como en diversas aplicaciones industriales: alimentos, cosmética y farmacéutica (Mathew et al., 2018). Este ácido carboxílico, que existe naturalmente en muchos procesos biológicos, se ha convertido en un componente fundamental en múltiples sectores debido a sus propiedades únicas como son: efectos bactericidas, regulador de pH, estabilidad química, biodegradabilidad y capacidad quelante. Su relevancia se extiende desde la industria alimentaria, donde actúa como conservante y agente saborizante, hasta el sector biomédico, donde es utilizado en la fabricación de materiales biocompatibles (Kim et al., 2022).

2.2. Producción del ácido láctico

La fermentación microbiana se ha consolidado como el proceso biotecnológico predominante en la industria moderna, distinguiéndose por dos ventajas fundamentales: su sostenibilidad ambiental y su capacidad para generar productos altamente específicos. Este proceso bioquímico se fundamenta en la transformación metabólica de diversos carbohidratos por parte de microorganismos especializados, entre los cuales destaca el género *Lactobacillus*. Estos microorganismos utilizan diferentes rutas metabólicas para convertir sustratos azucarados en productos de valor industrial, generando menos residuos y requiriendo menor energía en comparación con los procesos químicos tradicionales (Gezae et al., 2024).

Por otra parte, la síntesis química convencional del ácido láctico presenta desafíos técnicos y biológicos significativos, siendo uno de los más relevantes la generación simultánea de sus dos formas enantioméricas: el ácido L (+) láctico y el ácido D (-) láctico. En este contexto, el uso de biomásas lignocelulósicas (como residuos agrícolas, forestales y agroindustriales) se ha posicionado como una alternativa prometedora para la producción sostenible de ácido láctico, debido a su abundancia, bajo costo y naturaleza renovable. Esta tendencia no solo responde a la necesidad de reducir la huella de carbono y minimizar el impacto ambiental, sino que también busca desarrollar procesos de producción más eficientes y económicamente viables a largo plazo.

Según Manandhar y Shah (2020), actualmente el 90 % de la producción global de ácido láctico se realiza mediante fermentación microbiana. Este dato subraya la rapidez con la que la industria ha adoptado esta tecnología, desplazando en gran medida los métodos de síntesis química tradicionales. En este contexto, el uso eficiente de estos materiales lignocelulósicos presenta desafíos significativos, principalmente relacionados con su pretratamiento como: la compleja estructura de la lignocelulosa, que dificulta el acceso a sus componentes valiosos, la recalcitrancia de la lignina, lo que impide el acceso de las enzimas a la celulosa y hemicelulosa. Además, la necesidad de métodos efectivos para separar celulosa, hemicelulosa y lignina, el alto consumo energético de muchos procesos de pretratamiento, la formación de inhibidores durante ciertos pretratamientos que pueden afectar procesos posteriores, la viabilidad económica de las tecnologías de pretratamiento a escala industrial, el balance entre la efectividad del pretratamiento, y su impacto ambiental. Yankov (2022) enfatiza la importancia crítica de seleccionar un método de pretratamiento adecuado para transformar estas biomásas complejas en monosacáridos fermentables.

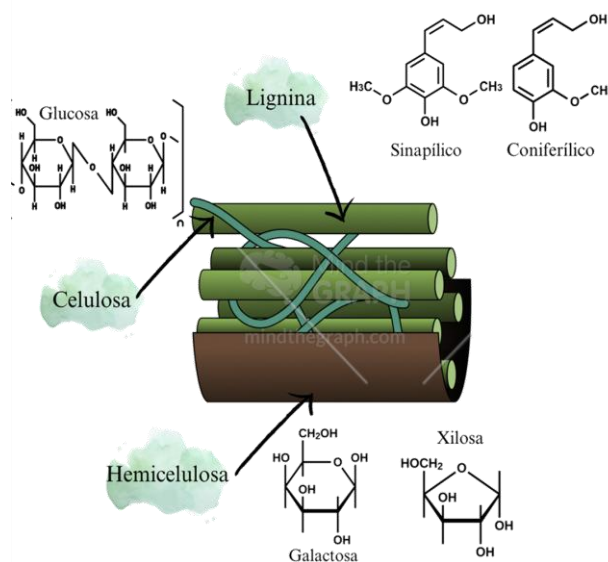
El mercado global del ácido láctico ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por su versatilidad y sus múltiples aplicaciones en diversas industrias. La demanda mundial de este compuesto alcanzó las 1.220 kilotoneladas, marcando un hito importante en su trayectoria comercial (Tsaruk et al., 2025).

2.3. Biomosas lignocelulósicas

La estructura de las biomosas lignocelulósicas está constituida, principalmente, por tres compuestos fundamentales: celulosa, hemicelulosa y lignina, como se presenta en la Figura 1. La celulosa y hemicelulosa, componentes cruciales para la fermentación, se encuentran entrelazadas con la lignina en una matriz compleja que resiste la degradación microbiana directa. Esta característica estructural hace imperativo el desarrollo de estrategias de pretratamiento efectivas (Shan et al., 2023).

Figura 1.

Estructura de la red lignocelulósica



Los pretratamientos involucran el fraccionamiento de los tres componentes mencionados, buscando transformar los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa)

en sus unidades monoméricas básicas, principalmente glucosa, xilosa y otros azúcares fermentables. Esta conversión es esencial, puesto que los microorganismos productores de AL solo pueden metabolizar eficientemente azúcares simples y accesibles (Norrrahim et al., 2021). La efectividad del pretratamiento determina en gran medida el rendimiento final del proceso, ya que una mayor liberación y disponibilidad de azúcares fermentables se traduce directamente en una producción más eficiente de AL durante fermentación microbiana.

2.4. Pretratamientos de las biomásas lignocelulósicas

La estructura lignocelulósica actúa como una barrera física que limita significativamente el acceso de las enzimas hidrolíticas a las cadenas de celulosa y hemicelulosa, comprometiendo así la efectividad del proceso de hidrólisis. En este contexto, los métodos de pretratamiento se pueden categorizar en tres grandes grupos: i) pretratamientos químicos, que incluyen procesos que utilizan ácidos, bases, solventes orgánicos o líquidos iónicos para desestabilizar los enlaces estructurales; ii) pretratamientos físicos, que abarcan métodos mecánicos, térmicos y de irradiación que alteran la estructura física del material; iii) pretratamientos biológicos, que emplean microorganismos o enzimas específicas para degradar selectivamente componentes de la estructura lignocelulósica (Zhao et al., 2022).

Cada una de las metodologías es evaluada en función de su eficacia para transformar diferentes tipos de biomasa lignocelulósica en sustratos apropiados para la subsecuente fermentación y producción de ácido láctico (Li et al., 2021). La selección del método más adecuado dependerá de factores como el tipo de biomasa, la eficiencia de conversión requerida, los costos operativos y el impacto ambiental del proceso. La Tabla 1 presenta una

visualización esquemática de las principales estrategias de pretratamiento aplicadas a biomasas lignocelulósicas.

Tabla 1.

Pretratamientos a las biomasas lignocelulósicas

<i>Categoría</i>	<i>Tipo de Pretratamiento</i>	<i>Principio Teórico</i>	<i>Efecto Principal en la Estructura</i>	<i>Mecanismo de Acción</i>
<i>Físicos</i>	Molienda/Trituración	Reducción de tamaño y cristalinidad	Incremento de área superficial	Ruptura mecánica de enlaces y reducción de grado de polimerización
	Irradiación	Degradación por radiación	Alteración estructural interna	Generación de radicales libres que atacan enlaces C-O-C y C-C
<i>Químicos</i>	Ácido	Hidrólisis catalizada por H ⁺	Solubilización de hemicelulosa	Ruptura de enlaces glicosídicos y éster
	Alcalino	Saponificación	Deslignificación	Ruptura de enlaces éster entre lignina y carbohidratos
	Oxidativo	Oxidación	Deslignificación y despolimerización	Ataque a grupos funcionales por radicales con alto potencial de oxidación
	Solventes orgánicos	Solvatación	Deslignificación y solubilización parcial	Fraccionamiento por solubilidad diferencial
<i>Fisicoquímicos</i>	Explosión con vapor	Auto hidrólisis	Separación de fibras y solubilización parcial	Hidrólisis de grupos acetilo y formación de ácido acético in situ
	AFEX	Hinchamiento y disrupción	Despolimerización parcial de lignina y hemicelulosa	Ruptura de enlaces de hidrógeno y alteración estructural
	CO ₂ supercrítico	Penetración mejorada	Aumento de accesibilidad	Formación de ácido carbónico que cataliza la hidrólisis

<i>Categoría</i>	<i>Tipo de Pretratamiento</i>	<i>Principio Teórico</i>	<i>Efecto Principal en la Estructura</i>	<i>Mecanismo de Acción</i>
<i>Biológicos</i>	Fúngico	Biodegradación	Deslignificación selectiva	Secreción de enzimas ligninolíticas (lacasas, peroxidases)
	Enzimático	Hidrólisis específica	Degradación selectiva de componentes diana	Reconocimiento específico del sustrato y catálisis enzimática
<i>Avanzados</i>	Líquidos iónicos	Disolución selectiva	Reconstrucción de estructura cristalina	Ruptura de enlaces de hidrógeno por aniones y cationes del líquido iónico
	Plasma	Activación superficial	Modificación química superficial	Generación de especies reactivas que modifican la superficie
	Cavitación ultrasónica	Fenómeno de cavitación	Disrupción celular y despolimerización	Formación, crecimiento y colapso de microburbujas que generan condiciones extremas localizadas

2.5. Biomásas empleadas en este estudio

En el contexto de la valorización de residuos agroindustriales, este estudio se centra en las biomásas residuales que se destacan por su volumen de generación en Santander: residuo de café, residuo de cacao, bagazo de caña panelera y residuo de palma (Acevedo, 2020). La selección de estas biomásas responde a un análisis basado en la disponibilidad regional y su potencial contribución al desarrollo de una bioeconomía local sostenible.

2.5.1. Residuos de cacao

Santander sobresale como la principal región productora de cacao en Colombia, representando aproximadamente el 38 % de la producción nacional. Según datos de

Fedecacao (2023), el departamento produce anualmente alrededor de 24,000 toneladas de cacao (Ramos et al., 2023).

2.5.2. Residuos de café

Santander se ubica entre los seis mayores productores nacionales de café, con una producción anual aproximada de 45,000 toneladas. El procesamiento del café presenta un bajo aprovechamiento: solo aproximadamente el 5 % del peso del fruto fresco se utiliza en el producto final (Federación Nacional de Cafeteros Santander, 2020).

2.5.3. Bagazo de caña panelera

Colombia es el segundo mayor productor de panela a nivel mundial, después de la India, con una producción que representa el 7 % de la producción mundial. En Santander, se cultivan aproximadamente 15,000 hectáreas, generando cerca de 120,000 toneladas de panela anualmente (Suárez, 2015).

2.5.4. Residuos de palma africana

La producción de aceite de palma africana es una de las actividades agrícolas de gran relevancia en el departamento de Santander. Esta industria genera diversos tipos de residuos que representan tanto un desafío como una oportunidad (Valverde et al., 2018). Entre los principales residuos se encuentran:

- Racimos de fruta vacíos (RFV): constituyen aproximadamente el 22% del peso del racimo de fruta fresca. En Santander se generan cerca de 180,000 toneladas anuales.
Fibra del mesocarpio: representa el 12-15% del peso del racimo.
- Cuesco (cáscara de la nuez): constituye aproximadamente el 5-7% del peso del racimo.

- Efluentes líquidos (POME): por cada tonelada de aceite crudo producido, se generan aproximadamente 3 toneladas de estos efluentes.

3. Estado del arte

Una investigación desarrollada por Marzo *et al.* (2021) exploró el potencial de la pulpa de remolacha azucarera, un subproducto abundante pero subutilizado de la industria azucarera, como materia prima para la producción de AL. El trabajo destaca por su enfoque sistemático en la evaluación de tres estrategias distintas de pretratamiento, cada una diseñada para desestabilizar la compleja estructura de la biomasa y facilitar el acceso a sus componentes fermentables. Los investigadores implementaron tres aproximaciones metodológicas distintivas: i) pretratamiento biológico: empleando una fermentación en estado sólido mediada por *Aspergillus awamori*, un microorganismo reconocido por su capacidad de producir enzimas degradadoras de material lignocelulósico; ii) pretratamiento oxidativo: utilizando peróxido de hidrógeno en condiciones alcalinas, aprovechando el poder oxidante del reactivo para desestabilizar enlaces estructurales; iii) pretratamiento termoquímico: combinando ácido sulfúrico al 1 % con tratamiento térmico en autoclave, lo que permite una degradación controlada de la estructura. El objetivo principal de estas estrategias fue solubilizar selectivamente los componentes de pectina y hemicelulosa, facilitando así el acceso enzimático posterior a la celulosa. El pretratamiento termoquímico con H₂SO₄ demostró ser superior, generando un hidrolizado con la mayor concentración de glucosa, el sustrato esencial para la subsecuente producción de AL.

En un estudio llevado a cabo por Wysocki *et al.* (2024) se empleó la borra de café, una fuente inexplorada de ingredientes valiosos que pueden transformarse en productos de alto valor como aceite, antioxidantes, ácido láctico y lignina. La investigación desarrolló un proceso biotecnológico optimizado para producir ácido láctico utilizando la cepa *Lactocaseibacillus rhamnosus* aislada del ambiente natural. Mediante refinamientos

sistemáticos en hidrólisis ácida, neutralización y fermentación, se logró aumentar la concentración de ácido láctico de 4,60 a 48,6 g/l después de 72 horas de cultivo. El estudio destaca además avances significativos en eficiencia económica y sostenibilidad al eliminar la costosa etapa de hidrólisis enzimática, y sustituir el extracto de levadura por subproductos agroalimentarios económicos, estableciendo así un modelo circular de biorrefinería que maximiza el aprovechamiento de materias primas mientras minimiza recursos adicionales y generación de residuos.

Por otro lado, Doménech et al., 2023 informaron sobre la producción de ácido láctico a partir de residuos municipales forestales y de jardinería procesados mediante explosión de vapor (EV) e hidrólisis enzimática. Se estudiaron como sustratos para la fermentación de ácido láctico, mediante una estrategia integrada, el hidrolizado de fracción líquida (HFL) obtenido tras la filtración de la suspensión sometida a explosión de vapor (previamente detoxificada) y el hidrolizado enzimático resultante de la fracción sólida insoluble en agua (hidrolizado derivado de FSI, HFSI). El proceso de fermentación del HFSI utilizando *Bacillus coagulans* y *Lactobacillus rhamnosus* mostró rendimientos de conversión de azúcares similares de aproximadamente 0,9 g g⁻¹ (basado en la glucosa consumida). Por el contrario, el uso de HFL detoxificado (HFL-d) inhibió completamente el crecimiento de *B. coagulans*, lo que hizo necesaria una dilución previa con el HFSI para iniciar la fermentación cuando se utilizó este microorganismo. La mejor estrategia integrada, que empleó corrientes de HFL-d y HFSI con *B. coagulans* como cepa fermentativa, presentó una relación HFL-d de 1:3, produciendo 0,93 g de ácido láctico por g de azúcares consumidos y alcanzando una concentración de ácido láctico de aproximadamente 50 g L⁻¹.

4. Metodología

Figura 2.

Proceso metodológico empleado en esta investigación

Etapa 1

- Elección de plataformas educativas y motores de búsqueda.
- Formulación de palabras clave.
- Planteamiento de ecuaciones de búsqueda.

Etapa 2

- Exclusión de documentos duplicados.
- Formulación de criterios de inclusión y exclusión.
- Selección de biomásas para la producción de ácido láctico.

Etapa 3

- Análisis bibliométrico y bibliográficos.
- Selección del pretratamiento más adecuado.
- Conclusiones.

4.1. Fase 1

Este estudio sistemático se implementó en conformidad con las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), estructura que comprende 27 ítems (detallados en el Apéndice A) organizados en siete fases metodológicas: formulación de la pregunta de investigación, búsqueda bibliográfica, selección de estudios, extracción de datos, evaluación del riesgo de sesgo, análisis de datos y presentación de resultados preliminares. Este marco metodológico garantiza la transparencia en la

recopilación, análisis y presentación de la evidencia científica. El propósito fundamental de la presente investigación consiste en sintetizar y exponer con precisión los avances tecnológicos en el ámbito estudiado (Page et al., 2021).

Para la ejecución de la revisión bibliográfica se empleó inicialmente una estrategia de búsqueda sistemática en los repositorios académicos y científicos disponibles a través del sistema bibliotecario virtual de la Universidad Industrial de Santander. Este proceso comprendió la exploración de los recursos electrónicos suscritos por la institución, incluyendo publicaciones periódicas, obras monográficas, trabajos de grado y documentación especializada. Complementariamente, se extendió la investigación documental a bases de datos y plataformas de búsqueda de acceso abierto y gratuito, entre las que destacan Scopus, Scielo, ScienceDirect y Springer.

4.2. Fase 2

La selección de las biomásas evaluadas en este proyecto se fundamentó en dos criterios principales:

i) Disponibilidad y accesibilidad dentro del departamento de Santander: es esencial considerar aquellas biomásas que se encuentren presentes en cantidades significativas y sean fácilmente accesibles. Esto facilita aspectos clave como la logística de recolección, transporte y abastecimiento continuo, fundamental para asegurar la sostenibilidad a largo plazo.

ii) Potencialidad para poder desarrollar precursores para la producción de ácido láctico por la ruta fermentativa: se enfoca en aquellas que presenten características fisicoquímicas y composicionales adecuadas para ser utilizadas como materia prima en los procesos de fermentación láctica.

Así mismo, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión que se presentan detalladamente en la Tabla 2.

Tabla 2.

Criterios de inclusión y exclusión empleados en la revisión sistemática

<i>Criterios de inclusión</i>	<i>Criterios de exclusión</i>
Estudios experimentales sobre producción de ácido láctico a partir de biomasa lignocelulósica	Estudios centrados exclusivamente en la producción de otros ácidos orgánicos
Artículos de investigación originales y revisiones	Trabajos que utilizan sustratos no lignocelulósicos (almidón, sacarosa)
Publicaciones que detallan métodos de pretratamiento, hidrólisis y/o fermentación	Artículos de opinión o editoriales

4.3. Fase 3

Por último, se identificaron y evaluaron las etapas de pretratamiento más efectivas y apropiadas para cada una de las biomásas seleccionadas. El estudio se contempló un análisis de diferentes métodos de pretratamiento, considerando aspectos como:

- La composición específica de cada biomasa.
- Las características estructurales del material lignocelulósico.
- La eficiencia de conversión a azúcares fermentables

5. Resultados y discusión

Se realizó una búsqueda sistemática en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed y ScienceDirect; la Tabla 3 muestra las combinaciones de palabras clave.

Tabla 3.

Ecuación y resultados obtenidos por cada motor de búsqueda

<i>Ecuación de Búsqueda</i>	<i>Enfoque/Clasificación</i>	<i>Cantidad de Documentos Encontrados</i>
<i>"lactic acid" AND "lignocellulosic biomass"</i>	Producción de ácido láctico a partir de biomasa lignocelulósica general	347
<i>"lactic acid" AND ("agricultural waste" OR "forestry residue" OR "agro-industrial waste")</i>	Utilización de residuos agrícolas, forestales y agroindustriales	412
<i>"lactic acid fermentation" AND ("cellulose" OR "hemicellulose")</i>	Fermentación de componentes específicos de la biomasa lignocelulósica	285
<i>"lactic acid bacteria" AND "lignocellulosic hydrolysate"</i>	Bacterias productoras de ácido láctico en hidrolizados lignocelulósicos	193
<i>Total</i>		1237

5.1. Proceso de selección

El proceso de selección siguió las directrices PRISMA y se estructuró en cuatro etapas consecutivas: inicialmente, se procedió a la identificación sistemática de registros en las diversas bases de datos consultadas, seguido por una eliminación de documentos duplicados para evitar redundancias en el análisis; posteriormente, se realizó un cribado de títulos y resúmenes que permitió descartar aquellos estudios que no cumplían con los criterios preliminares de inclusión establecidos; y, finalmente, se efectuó una evaluación de

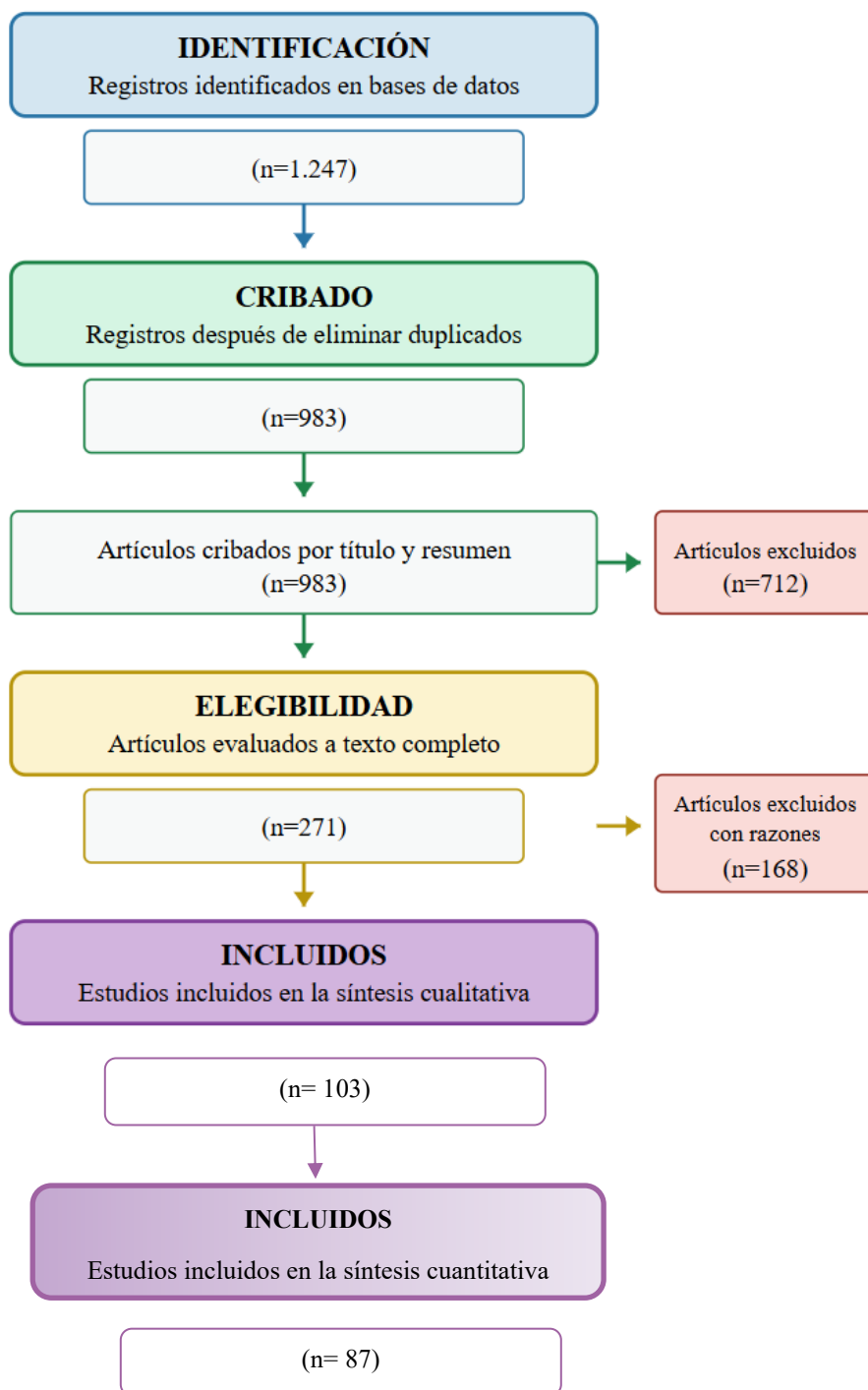
elegibilidad de los textos completos seleccionados, lo que garantizó que solo los documentos con mayor relevancia y rigor metodológico fueran incorporados a la investigación.

5.2. Extracción de datos

De cada estudio analizado se extrajeron los siguientes datos: tipo específico de biomasa lignocelulósica utilizada como sustrato principal, detallando sus características y origen; método de pretratamiento aplicado a dicha biomasa, incluyendo parámetros operacionales y rendimientos obtenidos; y la estrategia de hidrólisis implementada, ya fuera enzimática, ácida o mediante un enfoque combinado, documentando en cada caso los reactivos empleados, condiciones de proceso y eficiencia de conversión alcanzada. Esto permitió establecer comparaciones entre los diferentes estudios y sintetizar el conocimiento acumulado sobre los procesos de transformación de biomasa lignocelulósica.

5.3. Selección de estudios

El diagrama PRISMA se presenta en la Figura 3, ilustrando el proceso de selección bibliográfica implementado y evidenciando un enfoque metodológico sistemático y transparente. En la fase inicial de identificación se recopilieron 1247 registros de diversas bases de datos, que posteriormente se redujeron a 983 tras eliminar duplicados en la etapa de cribado. Un análisis de títulos y resúmenes resultó en la exclusión de 712 artículos, quedando 271 trabajos para evaluación a texto completo. De estos, 168 fueron excluidos con justificaciones específicas, resultando en 103 estudios para la síntesis cualitativa. Finalmente, 87 de estos estudios fueron incluidos en el análisis cuantitativo.

Figura 3.*Diagrama de flujo método PRISMA*

5.4. Características de los estudios incluidos

5.4.1. Distribución temporal de publicaciones

La distribución anual de publicaciones muestra un incremento constante en el interés investigativo sobre el tema (Tabla 4), lo que sugiere una maduración progresiva del campo de investigación.

Tabla 4.

Distribución temporal de publicaciones

<i>Año</i>	<i>Número de publicaciones</i>
2020	17
2021	22
2022	24
2023	27
2024*	13

*Datos hasta octubre de 2024

5.4.2. Distribución geográfica

China emerge como el líder en este campo de investigación, representando más de una cuarta parte (27,2 %) del total de publicaciones analizadas como se ilustra en la Tabla 5. Este predominio refleja la creciente inversión del país asiático en investigación científica y desarrollo tecnológico, así como posiblemente un interés estratégico en la temática estudiada. La posición de China como líder en publicaciones puede atribuirse a varios factores, incluyendo políticas nacionales de ciencia y tecnología, disponibilidad de financiamiento y posiblemente la relevancia del tema para sus prioridades industriales o ambientales (Liu, Y.-J et al., 2023).

Tabla 5.*Mayor contribución de países a la investigación en este campo*

<i>País</i>	<i>Número de publicaciones</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<i>China</i>	28	27,2
<i>India</i>	13	12,6
<i>EE.UU.</i>	11	10,7
<i>Brasil</i>	9	8,7
<i>España</i>	7	6,8
<i>Otros</i>	35	34,0

5.4.3. Tipos de biomasa lignocelulósica

El predominio de los residuos agrícolas, que representan el 41,7% de los estudios analizados, como se ilustra en la Tabla 6, refleja una tendencia consolidada hacia el aprovechamiento de estos materiales como sustratos para la producción de bioproductos.

Tabla 6. *Distribución de tipos de biomasa más estudiadas*

<i>Tipo de biomasa</i>	<i>Número de estudios</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<i>Residuos agrícolas</i>	43	41,7
<i>Residuos forestales</i>	19	18,4
<i>Residuos agroindustriales</i>	22	21,4
<i>Cultivos energéticos</i>	12	11,7
<i>Residuos municipales</i>	7	6,8

Lo reportado concuerda con lo reportado por Nguyen *et al.*, 2023, quienes señalan que los residuos agrícolas constituyen la fracción más abundante de biomasa disponible a nivel mundial, estimada en, aproximadamente, 5 billones de toneladas anuales, de las cuales solo un 20 % es actualmente aprovechado. La preferencia por residuos agrícolas puede

explicarse por múltiples factores: i) disponibilidad estacional predecible y distribución geográfica amplia; ii) composición lignocelulósica rica en polisacáridos fermentables; iii) bajo costo de adquisición y menor competencia con cadenas alimentarias; iv) caracterización composicional bien documentada que facilita el diseño de procesos de transformación (Sekhar Paul et al., 2024).

5.5. Métodos de pretratamiento

La elección del método de pretratamiento constituye una decisión crítica en la valorización de biomasa lignocelulósica, determinando en gran medida la eficiencia global del proceso, los rendimientos obtenibles y la viabilidad económica de la producción de ácido láctico. Los datos presentados en la Tabla 7 ofrecen una panorámica sobre las tendencias metodológicas predominantes en la investigación actual, permitiendo identificar patrones, evaluar preferencias tecnológicas y detectar oportunidades emergentes.

Tabla 7.

Métodos de pretratamiento aplicados en los estudios

<i>Método de pretratamiento</i>	<i>Número de estudios</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
<i>Pretratamiento alcalino</i>	27	26,2
<i>Pretratamiento ácido</i>	21	20,4
<i>Explosión de vapor</i>	16	15,5
<i>Líquidos iónicos</i>	13	12,6
<i>Métodos físicos (molienda)</i>	11	10,7
<i>Disolventes eutécticos (DES)</i>	8	7,8
<i>Pretratamiento biológico</i>	4	3,9
<i>Otros</i>	3	2,9

El análisis revela un claro predominio de métodos de pretratamiento convencionales. En conjunto, los pretratamientos alcalinos (26,2 %) y ácido diluido (20,4 %) representan casi la mitad de los estudios analizados. Esta prevalencia puede atribuirse a múltiples factores: i) base de conocimiento consolidada, pues estos métodos cuentan con décadas de investigación y optimización; ii) escalabilidad demostrada, ya que existen implementaciones industriales que confirman su viabilidad técnica; iii) mecanismos de acción bien caracterizados, debido a que los efectos sobre diferentes fracciones de biomasa están ampliamente documentados; iv) equipamiento relativamente simple.

El pretratamiento alcalino destaca por su efectividad para solubilizar lignina mientras preserva gran parte de los polisacáridos, particularmente importante en materiales herbáceos como los residuos agrícolas identificados en análisis previos (paja de trigo, rastrojo de maíz, etc.). Su capacidad para reducir el grado de polimerización de la celulosa y disminuir la cristalinidad facilita significativamente la posterior hidrólisis enzimática. Respecto al pretratamiento con ácido, se destaca por su eficacia para hidrolizar la fracción hemicelulósica, liberando azúcares fermentables pentosas y mejorando la accesibilidad a la celulosa. Su prevalencia refleja también consideraciones económicas, ya que utiliza reactivos ampliamente disponibles y de bajo costo.

5.6. Residuos agroindustriales en Santander

La Tabla 8 presenta información valiosa sobre los residuos de cuatro cultivos importantes (cacao, café, caña panelera y palma africana), mostrando tanto el porcentaje que representan del fruto como su potencial de aprovechamiento.

Tabla 8.*Subproductos de diferentes residuos lignocelulósicos y su potencial de aprovechamiento*

<i>Residuo</i>	<i>Porcentaje del fruto (%)</i>	<i>Potencial de aprovechamiento</i>
<i>Residuos de Cacao</i>		
<i>Cacota (cáscara)</i>	70-75	Compuestos bioactivos, pectinas, fertilizantes, sustratos para fermentación
<i>Mucílago</i>	8-10	Alto contenido de azúcares fermentables
<i>Placenta</i>	2-3	Compuestos bioactivos
<i>Cascarilla</i>	12 del grano seco	Sustrato para procesos de fermentación
<i>Residuos de Café</i>		
<i>Pulpa</i>	40-45	Biocombustibles, compostaje, antioxidantes
<i>Mucílago</i>	15-20	Compuestos bioactivos
<i>Cisco (pergamino)</i>	6 del fruto seco	Combustible, compostaje
<i>Pasillas</i>	10-15 de la producción	Extracción de compuestos de interés
<i>Tallos</i>	20 ton/ha cada 5-7 años	Biocombustibles
<i>Bagazo</i>	30	Bioenergía, papel, xilosa, materiales compuestos
<i>Cachaza</i>	2-3	Fertilizantes
<i>Bagacillo</i>	3 del bagazo	Materiales compuestos
<i>Residuos de Palma Africana</i>		
<i>Racimos de fruta vacíos</i>	22	Biocombustibles, compuestos orgánicos
<i>Fibra del mesocarpio</i>	12-15	Materiales, sustrato para cultivos
<i>Cuesco</i>	5-7	Carbón activado, combustible
<i>Efluentes líquidos (POME)</i>	3 ton/ton de aceite	Biogás, fertilizantes

La cacota o cáscara de cacao constituye un porcentaje mayoritario (70-75 %) del fruto total, lo que refleja la ineficiencia actual del proceso desde una perspectiva de aprovechamiento integral. Este residuo, generado en grandes cantidades en las regiones cacaoteras, contiene compuestos bioactivos y fibras que permanecen subutilizados. De manera similar, en la industria cafetera, la pulpa (40-45 %) y el mucílago (15-20 %) representan fracciones considerables del fruto y contienen compuestos antioxidantes, principalmente ácidos clorogénicos, que pueden ser extraídos para aplicaciones en las industrias alimentaria y cosmética.

La generación masiva de subproductos no es exclusiva de los sectores cacaotero y cafetero. En la industria panelera, el bagazo constituye aproximadamente el 30 % de la caña procesada. Si bien este residuo es actualmente utilizado parcialmente como combustible en los hornos de los trapiches, existe un excedente significativo que podría ser direccionado hacia la producción de materiales compuestos, papel o para la obtención de xilosa como precursor de xilitol, generando mayor valor agregado que la simple combustión directa.

Completando este panorama, la agroindustria de la palma africana presenta un perfil similar de abundantes residuos valorizables. Los racimos de fruta vacíos (22 %), la fibra del mesocarpio (12-15 %) y el cuesco (5-7 %) constituyen residuos lignocelulósicos con alto potencial para la producción de biocombustibles mediante procesos termoquímicos o bioquímicos. El cuesco, debido a su dureza y composición, resulta particularmente adecuado para la producción de carbón activado de alto valor.

Cada uno de estos residuos lignocelulósicos posee variación en los porcentajes de los tres biopolímeros principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La Tabla 9 muestra los porcentajes típicos de estos componentes para algunos de los principales residuos generados

en el departamento de Santander. Es importante tener en cuenta que estos valores pueden variar dependiendo de factores como la variedad, las condiciones de cultivo, el grado de maduración y el proceso de recolección y manipulación de los residuos. Incluso un mismo tipo de residuo proveniente de diferentes zonas geográficas puede exhibir ligeras fluctuaciones en su composición (Cazier et al., 2024).

Tabla 9.

Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes residuos

<i>Residuo</i>	<i>Celulosa (%)</i>	<i>Hemicelulosa (%)</i>	<i>Lignina (%)</i>
<i>Bagazo de caña panelera</i>	36,72	33,53	16,02
<i>Raquis de palma</i>	29,85	29,79	13,11
<i>Borra de café</i>	18,29	31,15	14,95
<i>Pergamino de café</i>	48,70	22,82	29,29

Tomado de Aguilar Ballesteros, M.P y Jaimes Bermúdez, Y.N. Revisión prospectiva del aprovechamiento de fracciones lignocelulósicas residuales en la obtención de biomateriales. Universidad Industrial de Santander

En primer lugar, el pergamino de café destaca por su elevado contenido de celulosa (48,70 %), significativamente superior al resto de residuos analizados. Este alto porcentaje lo posiciona como una fuente potencialmente valiosa para la obtención de glucosa mediante hidrólisis, aplicable en procesos fermentativos o para la producción de bioetanol. Le sigue el bagazo de caña panelera, con un contenido de celulosa del 36,72 %, mientras que el raquis de palma presenta un valor intermedio (29,85 %). La borra de café muestra el contenido más bajo de celulosa (18,29 %), lo que sugiere que su aprovechamiento óptimo podría orientarse hacia rutas diferentes a la obtención de azúcares C₆.

En cuanto a la hemicelulosa, el bagazo de caña panelera presenta el mayor contenido (33,53%), seguido muy de cerca por la borra de café (31,15 %) y el raquis de palma (29,79

%). El pergamino de café, a pesar de su alta concentración de celulosa, contiene el menor porcentaje de hemicelulosa (22,82 %). Esta distribución resulta relevante para procesos orientados a la obtención de azúcares C₅ (principalmente xilosa), que pueden ser utilizados para la producción de xilitol, furfural o como sustratos para fermentaciones específicas.

El pergamino de café se distingue también por su elevado contenido de lignina (29,29 %), casi el doble que el presente en el bagazo de caña panelera (16,02 %), y significativamente mayor que en el raquis de palma (13,11%) y la borra de café (14,95 %). Esta alta concentración de lignina en el pergamino representa un desafío para los procesos de pretratamiento e hidrólisis, ya que la lignina actúa como barrera física que dificulta el acceso a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa).

Un aspecto clave a considerar en la producción de ácido láctico es que las bacterias empleadas en este proceso metabólico prefieren utilizar la glucosa como sustrato, en comparación con otros azúcares como pentosas y otras hexosas. Teniendo esto en cuenta, las biomásas más favorables para su pretratamiento y posterior conversión a ácido láctico son las que exhiban alto contenido de celulosa y bajo contenido de lignina, como el bagazo de caña y el raquis de palma. Esto se debe a que la celulosa es el polímero que contiene principalmente glucosa en su estructura, mientras que la lignina es un compuesto recalcitrante que dificulta el acceso a los azúcares fermentables (Wang & Gao, 2023).

5.7. Pretratamientos para las biomásas lignocelulósicas

La Tabla 10 sintetiza los principales métodos de pretratamiento implementados para la desestructuración de matrices lignocelulósicas, con énfasis en la despolimerización de componentes estructurales (celulosa y hemicelulosa) para la subsecuente liberación de monómeros fermentables. La eficiencia hidrolítica de estos protocolos exhibe variabilidad

significativa en función de parámetros críticos como la composición de la biomasa, condiciones operacionales y variables de proceso específicas.

Tabla 10.

Pretratamientos para la producción de AL a partir de biomásas

<i>Pretratamientos</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Referencias</i>
<i>Hidrólisis enzimática</i>	El proceso emplea enzimas celulíticas, principalmente celulasas, que catalizan la hidrólisis de los enlaces β -1,4-glicosídicos presentes en la celulosa, liberando moléculas de glucosa. Estas enzimas son producidas por microorganismos, particularmente por hongos como <i>Trichoderma reesei</i> y <i>Aspergillus niger</i> . Condiciones típicas: Concentración de enzimas: 10-30 FPU/g de sustrato, Temperatura: 45-55 °C, pH: 4.5-5.5, Tiempo: 24-72 h.	(Jia et al., 2021)
<i>Termo presión (explosión de vapor)</i>	El pretratamiento por explosión de vapor consiste en someter la biomasa a condiciones de alta presión (10-20 bar) y temperatura (160-240 °C) durante un periodo determinado, seguido de una descompresión súbita. Este proceso provoca la desintegración de las paredes celulares y la descomposición de la estructura lignocelulósica, lo que incrementa la accesibilidad de la celulosa y hemicelulosa para su posterior degradación enzimática. Condiciones típicas: Presión: 10-20 bar, Temperatura: 160-240 °C, Tiempo: 2-10 min.	(Woźniak et al., 2025)
<i>Hidrólisis ácida</i>	El proceso implica la utilización de ácidos, como el ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), tanto en forma concentrada como diluida, para degradar la celulosa y hemicelulosa en	(Jain & Mahalingam, 2024)

	<p>azúcares simples, principalmente pentosas.</p> <p>Condiciones típicas: Concentración de H_2SO_4: 0.5-10%, Temperatura: 100-160 °C (diluida) o 30-50 °C (concentrada), Tiempo: 10-60 min.</p>	
<i>Hidrólisis alcalina</i>	<p>El fundamento del proceso de hidrólisis alcalina es muy parecido a la hidrólisis ácida, solo que, en este caso particular, se emplean bases para degradar a los biopolímeros principales como la celulosa y hemicelulosa en pentosas. Condiciones típicas: Concentración de NaOH/KOH: 0.5-5%, Temperatura: 25-120 °C, Tiempo: 1-48 h.</p>	(Oriez et al., 2020)
<i>Radiación microondas</i>	<p>Este método, considerado una alternativa verde, se basa en la exposición de la biomasa a radiación por microondas. Durante el proceso, la estructura lignocelulósica se degrada mediante colisiones moleculares generadas por la polarización dieléctrica del material. Condiciones típicas: Potencia: 300-900 W, Temperatura: 100-200 °C, Tiempo: 5-30 min.</p>	(Fia & Amorim, 2023)

Los indicadores tecno-económicos asociados a estas metodologías presentan diferencias sustanciales. Los pretratamientos alcalinos demuestran viabilidad económica favorable debido a sus moderados requerimientos energéticos y operacionales, mientras que tecnologías emergentes, como la aplicación de líquidos iónicos como solventes deslignificantes, presentan limitaciones financieras para su escalamiento industrial a pesar de sus elevados rendimientos de sacarificación. Basado en el análisis comparativo de los parámetros de eficiencia, implementabilidad y sostenibilidad económica, el pretratamiento

hidrotérmico emerge como la opción más viable para aplicaciones industriales (Woźniak et al., 2025).

Los diversos métodos de pretratamiento presentan ventajas y limitaciones específicas que influyen en su aplicabilidad industrial. La hidrólisis ácida destaca por su elevada eficiencia en la conversión de biomasa lignocelulósica a azúcares fermentables, alcanzando rendimientos superiores al 90 % en condiciones optimizadas. Sin embargo, este método presenta desafíos significativos: los ácidos utilizados son altamente corrosivos, lo que requiere equipamiento especial y medidas de seguridad rigurosas; genera subproductos inhibitorios como furfural e hidroximetilfurfural, que pueden afectar negativamente los procesos fermentativos posteriores; y necesita una etapa adicional de neutralización, incrementando los costos operativos y generando residuos salinos (Pendse et al., 2023).

En contraste, los pretratamientos biológicos, que emplean microorganismos o enzimas específicas, ofrecen una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Estos métodos operan en condiciones suaves de temperatura y presión, no requieren reactivos químicos agresivos y producen mínimos subproductos tóxicos. No obstante, su principal limitación radica en las bajas tasas de conversión, con rendimientos típicamente inferiores al 50 %, además de requerir tiempos de proceso prolongados, que pueden extenderse desde días hasta semanas. Esta menor eficiencia, comparada con los métodos químicos, es un obstáculo significativo para su implementación a escala industrial (Llamas et al., 2023).

5.8. Producción de ácido láctico a partir de diferentes residuos

La Tabla 11 presenta una recopilación de algunas investigaciones enfocadas en la producción de ácido láctico a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica. Esta tabla sintetiza los parámetros clave del proceso, incluyendo la materia prima utilizada, los métodos

de pretratamiento aplicados, el perfil y concentración de azúcares fermentables obtenidos, y los rendimientos finales de ácido láctico. Los estudios seleccionados ilustran la diversidad de condiciones operativas y su impacto en la eficiencia global del proceso de conversión.

Tabla 11.

Estudios de la producción de AL a partir de residuos lignocelulósicos

Residuo	Pretratamiento	Azúcares obtenidos	Ácido láctico	Referencia
<i>Pulpa de café</i>	Se empleó 0.18 mol L ⁻¹ de H ₂ SO ₄ y un tratamiento enzimático adicional	72.8 %–89.1 % (glucosa, xilosa, sacarosa y arabinosa)	Se pueden obtener entre 55,5 y 67,6 kg de ácido láctico puro a partir de 1000 kg de pulpa de café empleando <i>B. coagulans</i>	(Pleissner et al., 2016)
<i>Posos de café</i>	35 g/L de KOH a 121 °C durante 60 min y se utilizó Viscozyme L al 2 % en el proceso de sacarificación	Se estimó un contenido total de azúcares fermentables del 80,28 %	La mayor productividad de ácido láctico (0,59 g/L/h) se alcanzó con el medio de café 1x, mientras que la concentración más alta de ácido láctico (107,28 g/L) se logró cuando <i>L. rhamnosus</i> ATCC 10863 se cultivó en medio de café 6x	(Ja-Ryong Koo et al., 2019)
<i>Bagazo de caña</i>	El pretratamiento consistió en un método químico-térmico que combina la acción del hidróxido de sodio (NaOH) con un proceso de autoclave a 121 °C durante 30 minutos bajo condiciones de presión controlada.	El tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) demostró una alta eficacia en la deslignificación de la biomasa, logrando una reducción del 85,9 ± 1,3 % del contenido inicial de lignina. Esta significativa degradación de la barrera lignocelulósica mejoró la	La sacarificación y co-fermentación simultánea del bagazo de caña pretratado, utilizando <i>Lactobacillus plantarum</i> TSKKU P-8 como único microorganismo fermentador, alcanzó una producción de ácido láctico de 104.8 g/L. Este proceso	(Haokok et al., 2023)

<i>Residuo</i>	<i>Pretratamiento</i>	<i>Azúcares obtenidos</i>	<i>Ácido láctico</i>	<i>Referencia</i>
		accesibilidad enzimática, resultando en una eficiencia de hidrólisis de celulosa superior al 80%	resultó en un rendimiento de 0.65 g de ácido láctico por gramo de sustrato y una productividad volumétrica de 0.97 g/L·h.	
<i>Residuo</i>	<i>Pretratamiento</i>	<i>Azúcares obtenidos</i>	<i>Ácido láctico</i>	<i>Referencia</i>
<i>Bagazo de caña</i>	Se empleó la explosión de vapor empleando 100 g de bagazo de caña. El bagazo fue sometido a un pretratamiento de explosión de vapor utilizando vapor saturado proveniente de una caldera. El proceso se realizó bajo presiones controladas de 15, 20, 25, 30 y 35 atmósferas, manteniendo cada condición durante 5 minutos. Posteriormente, se efectuó una despresurización súbita del reactor.	Se observó una reducción máxima de lignina Klason del 19.8% cuando se aplicó una presión de vapor de 20 atmósferas durante el pretratamiento. Las condiciones óptimas para la liberación de glucosa se alcanzaron al aplicar una presión de vapor de 25 atmósferas durante 5 minutos, obteniendo una concentración de 364 mg de glucosa por gramo de bagazo seco pretratado. Este resultado representa un rendimiento del 73.7% respecto al contenido teórico de glucosa en el bagazo sin tratar.	La producción de ácido D-láctico por <i>Lactobacillus delbrueckii</i> NBRC 3534 fue significativamente mayor cuando se utilizó como fuente de carbono el bagazo pretratado mediante explosión de vapor y posteriormente lavado con agua, en comparación con el sustrato sin lavar	(Sassari et al., 2012)

Respecto a la pulpa de café, se logra una alta eficiencia en la obtención de azúcares fermentables (72,8 % - 89,1 %) mediante un pretratamiento ácido con H₂SO₄ y una etapa enzimática. La hidrólisis de la biomasa permite la liberación de monosacáridos esenciales

para la fermentación, facilitando la producción de entre 55,5 y 67,6 kg de ácido láctico por tonelada de pulpa de café empleando *Bacillus coagulans*.

En la relación con los pozos de café (residuo sólido lignocelulósico), el pretratamiento con KOH a 121 °C y la acción enzimática con Viscozyme L resulta en un 80,28 % de azúcares fermentables, una concentración elevada que favorece la conversión a ácido láctico. La productividad de 0,59 g/L/h y la concentración final de 107,28 g/L de ácido láctico demuestran que este sustrato es altamente viable para la fermentación con *Lactobacillus rhamnosus*.

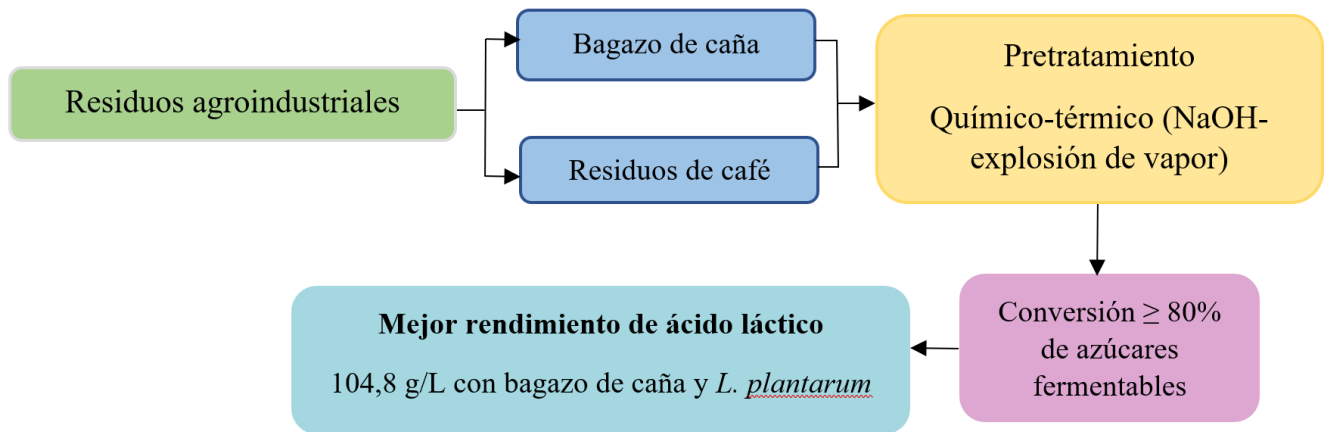
Por otra parte, el uso de bagazo de caña empleando el método químico-térmico con NaOH logra una remoción del 85,9 % de lignina, aumentando la accesibilidad enzimática de la celulosa y alcanzando una eficiencia de hidrólisis superior al 80 %. La co-fermentación con *Lactobacillus plantarum* permite obtener una concentración de ácido láctico de 104,8 g/L con un rendimiento de 0,65 g/g de sustrato. Al aplicar presiones de hasta 35 atm y una despresurización rápida, se logra liberar 364 mg de glucosa por gramo de bagazo pretratado. Este método, combinado con un lavado posterior, permite que *Lactobacillus delbrueckii* genere mayores cantidades de ácido D-láctico en comparación con el sustrato sin lavar.

Con base en lo anterior, los residuos de café y bagazo de caña muestran una conversión significativa de sus componentes lignocelulósicos en azúcares fermentables, con valores cercanos o superiores al 80 %. La mayor concentración de ácido láctico se obtiene a partir del bagazo de caña tratado con *Lactobacillus plantarum* (104,8 g/L), lo que sugiere que este residuo es una fuente prometedora. Así mismo, si bien la explosión de vapor es menos agresiva ambientalmente, el método químico-térmico con NaOH resulta en una mayor conversión de lignocelulosa, favoreciendo la producción de ácido láctico (Figura 4).

Lactobacillus plantarum y *Lactobacillus delbrueckii* son efectivos en la fermentación de bagazo, mientras que *Lactobacillus rhamnosus* logra las mejores concentraciones en los residuos de café.

Figura 4.

Diagrama del proceso seleccionado



6. Conclusiones

La valorización de residuos lignocelulósicos representa una estrategia sostenible y eficiente para la producción de compuestos de alto valor agregado, como el ácido láctico. La revisión bibliográfica realizada sobre las biomásas disponibles en el departamento de Santander ha permitido identificar fuentes potenciales con composiciones químicas favorables y disponibilidad significativa, destacándose el bagazo de caña y los residuos de café como materias primas particularmente prometedoras.

Para los dos residuos seleccionados se reportan contenidos considerables de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que, mediante diferentes métodos de pretratamiento

como la explosión de vapor y el tratamiento químico-térmico con NaOH, pueden transformarse en azúcares fermentables con eficiencias superiores al 80 %. La caracterización detallada de estas biomásas santandereanas ha permitido establecer correlaciones entre su composición estructural y sus rendimientos potenciales en procesos de bioconversión.

Por último, a través de procesos de fermentación optimizados con bacterias ácido-lácticas como *Lactobacillus plantarum*, *L. delbrueckii* y *L. rhamnosus*, es posible convertir las biomásas seleccionadas en una fuente viable de ácido láctico, promoviendo así un enfoque de economía circular. Esto no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental generado por los desechos agroindustriales abundantes en la región, sino que también impulsa el desarrollo de bioprocesos más sostenibles y competitivos para la industria química y biotecnológica local, permitiendo aprovechar materiales que, actualmente, representan un problema de gestión de residuos.

Referencias

- Acevedo, A. G. (s/f). *Un cacao santandereano con aroma de innovación*. Edu.co. Recuperado el 9 de octubre de 2024, de <https://unab.edu.co/cienciaabierta/un-cacao-santandereano-con-aroma-de-innovacion/>
- Adnane, I., Taoumi, H., Elouahabi, K., Lahrech, K., & Oulmekki, A. (2024). Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology. *Heliyon*, *10*(5), e26440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26440>
- Arpit Singh, T., Sharma, M., Sharma, M., Dutt Sharma, G., Kumar Passari, A., & Bhasin, S. (2022). Valorization of agro-industrial residues for production of commercial biorefinery products. *Fuel*, *322*, 124284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124284>
- Basak, B., Kumar, R., Bharadwaj, A. S., Kim, T. H., Kim, J. R., Jang, M., Oh, S., Roh, H., & Jeon, B. (2023). Advances in physicochemical pretreatment strategies for lignocellulose biomass and their effectiveness in bioconversion for biofuel production. *Bioresource Technology*, *369*, 128413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128413>
- Café de Santander. (2020, mayo 22). Federación Nacional de Cafeteros Santander. <https://santander.federaciondecafeteros.org/cafe-de-santander/>
- Cazier, E. A., Pham, T., Cossus, L., Abla, M., Ilc, T., & Lawrence, P. (2024). Exploring industrial lignocellulosic waste: Sources, types, and potential as high-value molecules. *Waste Management*, *188*, 11-38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.029>

- Doménech, P., Álvarez, C., Moreno, A. D., Manzanares, P., & Ballesteros, I. (2023). Lactic Acid Production from Lignocellulosic Residues: A Case Study Toward Process Integration. *Advanced Sustainable Systems*, 7(9), 2300105. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300105>
- Esquivel-Hernández, D. A., García-Pérez, J. S., López-Pacheco, I. Y., Iqbal, H. M., & Parra-Saldívar, R. (2022). Resource recovery of lignocellulosic biomass waste into lactic acid - Trends to sustain cleaner production. *Journal of Environmental Management*, 301, 113925. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113925>
- Fia, A., & Amorim, J. (2023). Microwave pretreatment of biomass for conversion of lignocellulosic materials into renewable biofuels. *Journal of the Energy Institute*, 106, 101146. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.11.006>
- Gezae Daful, A., Loridon, M., & R. Chandraratne, M. (2024). Lactic acid production from lignocellulosic biomass. En *From Biomass to Biobased Products*. IntechOpen.
- Haokok, C., Lunprom, S., Reungsang, A., & Salakkam, A. (2023). Efficient production of lactic acid from cellulose and xylan in sugarcane bagasse by newly isolated *Lactiplantibacillus plantarum* and *Levilactobacillus brevis* through simultaneous saccharification and co-fermentation process. *Heliyon*, 9(7), e17935. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17935>
- Jain, S., & Mahalingam, H. (2024). Pretreatment of lignocellulosic biomass waste mixtures using a low-cost ionic liquid. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 5, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2024.100052>

- Jia, Y., Yang, C., Shen, B., Ling, Z., Huang, C., Li, X., Lai, C., & Yong, Q. (2021). Comparative study on enzymatic digestibility of acid-pretreated poplar and larch based on a comprehensive analysis of the lignin-derived recalcitrance. *Bioresource Technology*, 319, 124225. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124225>
- Kassim, M. A., Meng, T. K., Kamaludin, R., Hussain, A. H., & Bukhari, N. A. (2022). Bioprocessing of sustainable renewable biomass for bioethanol production. *Value-Chain of Biofuels*, 195-234. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00004-X>
- Kim, J., Kim, Y., Lebaka, V. R., & Wee, Y. (2022). Lactic Acid for Green Chemical Industry: Recent Advances in and Future Prospects for Production Technology, Recovery, and Applications. *Fermentation*, 8(11), 609. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110609>
- Li, Y., Bhagwat, S. S., Cortés-Peña, Y. R., Ki, D., Rao, C. V., Jin, Y.-S., & Guest, J. S. (2021). Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(3), 1341–1351. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08055>
- Llamas, M., Greses, S., Magdalena, J. A., González-Fernández, C., & Tomás-Pejó, E. (2023). Microbial co-cultures for biochemicals production from lignocellulosic biomass: A review. *Bioresource Technology*, 386, 129499. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129499>
- Marzo, C., Díaz, A. B., Caro, I., & Blandino, A. (2021). Effect of several pretreatments on the lactic acid production from exhausted sugar beet pulp. *Foods* (Basel, Switzerland), 10(10), 2414. <https://doi.org/10.3390/foods10102414>

- Manandhar, A., & Shah, A. (2020). Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid Production Utilizing Corn Grain as Feedstock. *Processes*, 8(2), 199. <https://doi.org/10.3390/pr8020199>
- Manandhar, A., & Shah, A. (2023). Techno-Economic Analysis of the Production of Lactic Acid from Lignocellulosic Biomass. *Fermentation*, 9(7), 641. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070641>
- Mathew, A. K., Abraham, A., Mallapureddy, K. K., & Sukumaran, R. K. (2018). Lignocellulosic Biorefinery Wastes, or Resources? *Waste Biorefinery*, 267-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00009-4>
- Nalawade, K., Saikia, P., Behera, S., Konde, K., & Patil, S. (2023). Assessment of multiple pretreatment strategies for 2G L-lactic acid production from sugarcane bagasse. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 647–660. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01163-5>
- Norrrahim M. N. F., Ilyas R. A., Nurazzi N. M., Rani M. S. A., Atikah M. S. N., a Shazleen S. S. (2021). Chemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for the Production of Bioproducts: An Overview. *Appl. Sci. Eng. Prog.* 14 (4), 588–605. 10.14416/j.asep.2021.07.004
- Liu, Y.-J., Zhang, Y., Chi, F., Chen, C., Wan, W., Feng, Y., Song, X., & Cui, Q. (2023). Integrated lactic acid production from lignocellulosic agricultural wastes under thermal conditions. *Journal of Environmental Management*, 342(118281), 118281. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118281>

- Oriez, V., Peydecastaing, J., & Pontalier, P. (2020). Lignocellulosic Biomass Mild Alkaline Fractionation and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. *Clean Technologies*, 2(1), 91-115. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2010007>
- Pendse, D. S., Deshmukh, M., & Pande, A. (2023). Different pre-treatments and kinetic models for bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review. *Heliyon*, 9(6), e16604. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16604>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Ramos, L. H., Santisteban Soto, D. V., Lante, A., Favaro, L., Casella, S., & Basaglia, M. (2023). Exploitation of Cocoa Pod Residues for the Production of Antioxidants, Polyhydroxyalkanoates, and Ethanol. *Fermentation*, 9(9), 843. <https://doi.org/10.3390/fermentation9090843>
- Rodrigues, C., Vandenberghe, L., Woiciechowski, A., De Oliveira, J., Letti, L., & Soccol, C. (2017). Production and Application of Lactic Acid. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 543-556. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00024-5>

- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of The Total Environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sasaki, C., Okumura, R., Asakawa, A., Asada, C., & Nakamura, Y. (2012). Production of D-lactic acid from sugarcane bagasse using steam-explosion. *Journal of physics. Conference series*, 352, 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012054>
- Sai Bharadwaj, A., Dev, S., Zhuang, J., Wang, Y., Yoo, C. G., Jeon, B., Aggarwal, S., Park, S. H., & Kim, T. H. (2023). Review of chemical pretreatment of lignocellulosic biomass using low-liquid and low-chemical catalysts for effective bioconversion. *Bioresource Technology*, 368, 128339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128339>
- Shan, W., Yan, Y., Li, Y., Hu, W., & Chen, J. (2023). Microbial tolerance engineering for boosting lactic acid production from lignocellulose. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02334-y>
- Sekhar Paul, C., Stefanovic, L., Robledo-Mahón, T., Mercl, F., Száková, J., & Tlustoš, P. (2024). Agricultural waste-based lactic acid production by the fungus *Rhizopus oryzae*: a tool for sustainable polylactic acid production for agricultural use - a review. *Plant, soil and environment*. <https://doi.org/10.17221/416/2024-pse>
- Singhvi, M., Zendo, T., & Sonomoto, K. (2018). Free lactic acid production under acidic conditions by lactic acid bacteria strains: challenges and future prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(14), 5911–5924. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9092-4>

Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, E. R., Angarita-Rangel, M. A., Rodríguez-Flórez, L. V.,

Castellanos-Suarez, L. J., Nabarlatz, D., & Sanchez-Torres, V. (2022). Optimization of lignocellulolytic bacterial inoculum and substrate mix for lignocellulose degradation and product quality on co-composting of green waste with food waste. *Bioresource Technology*, 359, 127452.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127452>

Suárez Collazos, L.J. Pirólisis del bagazo de caña panelera para la producción de combustibles líquidos. Universidad de los Andes.

Tsaruk, A., Filip, K., Sibirny, A., & Ruchala, J. (2025). Native and Recombinant Yeast Producers of Lactic Acid: Characteristics and Perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(5), 2007. <https://doi.org/10.3390/ijms26052007>

Ummalyma, S. B., Supriya, R. D., Sindhu, R., Binod, P., Nair, R. B., Pandey, A., & Gnansounou, E. (2019). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass— Current trends and future perspectives. *Second and Third Generation of Feedstocks*, 197-212. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00007-0>

Wang, Y., & Gao, M. (2023). Efficient Biorefinery Based on Designed Lignocellulosic Substrate for Lactic Acid Production. *Fermentation*, 9(8), 744. <https://doi.org/10.3390/fermentation9080744>

Woźniak, A., Kuligowski, K., Świerczek, L., & Cenian, A. (2025). Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production. *Sustainability*, 17(1), 287. <https://doi.org/10.3390/su17010287>

Wysocki, Ł., Adamczuk, P., Bardadyn, P., Gabor, A., Jelonek, K., Kudelska, M., Kukuć, M., Piasek, A., Pietras, M., Słomka, M., Trojan, Z., Tybulczuk, W., Sobiepanek, A., Żylińska-Urban, J., & Cieśla, J. (2024). Development of lactic acid production from coffee grounds hydrolysate by fermentation with *Lactocaseibacillus rhamnosus*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 51. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuae032>

Yankov, D. (2022). Fermentative lactic acid production from lignocellulosic feedstocks: From source to purified product. *Frontiers in Chemistry*, 10, 823005. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.823005>

Zhao L., Sun Z.-F., Zhang C.-C., Nan J., Ren N.-Q., Lee D.-J., et al. (2022). Advances in Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Bioenergy Production: Challenges and Perspectives. *Bioresour. Technol.* 343, 126123. 10.1016/j.biortech.2021.126123

Apéndice A

<i>Sección</i>	<i>Ítem</i>	<i>Punto de la lista de verificación</i>
<i>Título</i>	1	Identificar el informe como una revisión sistemática, metaanálisis o ambos
<i>Resumen</i>	2	Proporcionar un resumen estructurado que incluya: antecedentes, objetivos, fuentes de datos, criterios de elegibilidad, participantes e intervenciones, evaluación y síntesis de los estudios, resultados, limitaciones, conclusiones e implicaciones, número de registro
<i>Introducción</i>		
<i>Justificación</i>	3	Describir la justificación de la revisión en el contexto de lo que ya se conoce
<i>Objetivos</i>	4	Plantear de forma explícita las preguntas que se desea contestar en relación con los participantes, las intervenciones, las comparaciones, los resultados y el diseño de los estudios (PICOS)
<i>Métodos</i>		
<i>Protocolo y registro</i>	5	Indicar si existe un protocolo de revisión y dónde se puede encontrar
<i>Criterios de elegibilidad</i>	6	Especificar las características de los estudios y los criterios de elegibilidad
<i>Fuentes de información</i>	7	Describir todas las fuentes de información y fecha de la última búsqueda
<i>Búsqueda</i>	8	Presentar la estrategia completa de búsqueda electrónica en, al menos, una base de datos
<i>Selección de estudios</i>	9	Especificar el proceso de selección de los estudios
<i>Proceso de extracción de datos</i>	10	Describir los métodos para la extracción de datos y cualquier proceso para obtener y confirmar datos
<i>Lista de datos</i>	11	Listar y definir todas las variables para las que se buscaron datos

<i>Riesgo de sesgo en los estudios individuales</i>	12	Describir los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo y cómo esta información se ha utilizado
<i>Medidas de resumen</i>	13	Especificar las principales medidas de resumen
<i>Síntesis de resultados</i>	14	Describir los métodos para manejar los datos y combinar resultados, incluyendo medidas de consistencia
<i>Riesgo de sesgo entre los estudios</i>	15	Especificar cualquier evaluación del riesgo de sesgo que pueda afectar la evidencia acumulativa
<i>Análisis adicionales</i>	16	Describir métodos de análisis adicionales (sensibilidad, subgrupos, meta-regresión)
Resultados		
<i>Selección de estudios</i>	17	Facilitar el número de estudios cribados, evaluados para su elegibilidad e incluidos en la revisión, con las razones para exclusiones en cada etapa, idealmente mediante un diagrama de flujo
<i>Características de los estudios</i>	18	Presentar los datos sobre las características de los estudios para los que se extrajeron los datos
<i>Riesgo de sesgo en los estudios</i>	19	Presentar datos sobre el riesgo de sesgo de cada estudio
<i>Resultados de los estudios individuales</i>	20	Presentar los resultados para todos los desenlaces considerados, beneficios y daños
<i>Síntesis de los resultados</i>	21	Presentar los resultados de todos los metaanálisis realizados, incluyendo los intervalos de confianza y medidas de consistencia
<i>Riesgo de sesgo entre los estudios</i>	22	Presentar los resultados de la evaluación del riesgo de sesgo entre los estudios
<i>Análisis adicionales</i>	23	Facilitar los resultados de los análisis adicionales
Discusión		
<i>Resumen de la evidencia</i>	24	Resumir los hallazgos principales, incluyendo la fortaleza de la evidencia para cada resultado principal
<i>Limitaciones</i>	25	Discutir las limitaciones a nivel de estudio y de resultados y a nivel de la revisión

<i>Conclusiones</i>	26	Proporcionar una interpretación general de los resultados y sus implicaciones para futuras investigaciones
<i>Financiación</i>		
<i>Financiación</i>	27	Describir las fuentes de financiación de la revisión sistemática y otro tipo de apoyos, así como el rol de los financiadores