

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Biopolímeros de Vanguardia: Evaluación Comparativa de
PLA y PHB para la Transformación de la Industria Plástica**

Marcelo Sebastián Molina Maldonado
Ingeniería Ambiental

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero/a Ambiental

Quito, 08 de mayo de 2025

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Biopolímeros de Vanguardia: Evaluación Comparativa de PLA y PHB
para la Transformación de la Industria Plástica**

Marcelo Sebastián Molina Maldonado

**Nombre del profesor, Título académico: Fernando Nicolás Vela García, PhD en
Química Verde**

Quito, 08 de mayo de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

| | |
|----------------------|------------------------------------|
| Nombres y apellidos: | Marcelo Sebastián Molina Maldonado |
| Código: | 00212477 |
| Cédula de identidad: | 1719956664 |
| Lugar y fecha: | Quito, 08 de mayo de 2025 |

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, cuyo apoyo incondicional, paciencia y aliento constante han sido fundamentales a lo largo de todos estos años de formación. Agradezco también a los profesores que me guiaron con su conocimiento y dedicación, y a mis compañeros de carrera, quienes no dudaron en tenderme una mano cuando más lo necesité. En especial, a Gabriel, por su compañía incansable, su ayuda constante y su apoyo tanto durante la carrera como en el desarrollo de este proyecto final. No puedo dejar de mencionar a mis fieles compañeros nocturnos, Teemo mi perrito, Wafle y Limón, mis gatitos, cuyas presencias tranquilas me acompañaron en innumerables madrugadas de estudio y trabajo. A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este camino.

RESUMEN

Se diseñó una biorrefinería para la producción de dos biopolímeros; ácido poliláctico (PLA) y polihidroxibutirato (PHB) a partir de residuos lignocelulósicos del bagazo de caña de azúcar, como alternativa sostenible frente a los plásticos derivados de hidrocarburos. Para ello, se desarrollaron y simularon dos rutas de producción en el software Aspen Plus®, lo que permitió modelar los procesos técnicos necesarios para la obtención de ambos biopolímeros. Además, se realizó un análisis económico para determinar los costos fijos y variables asociados a la operación de la biorrefinería, así como el precio mínimo de venta por kilogramo de cada biopolímero. También se evaluaron los impactos ambientales mediante la cuantificación de gases de efecto invernadero y el análisis de la huella hídrica, conforme a las normas ISO: 14064 y 14046. Los resultados indican que el PLA presenta una mayor eficiencia de conversión, una menor huella de carbono, y un precio mínimo de venta menor. Si bien ambos biopolímeros son técnicamente viables, su producción requiere una inversión inicial significativa.

Palabras clave: PLA: Ácido poliláctico, PHB: Poli-hidroxibutirato, BCA: Bagazo de caña de azúcar, biopolímeros, huella de carbono, huella hídrica

ABSTRACT

A biorefinery was designed for the production of two biopolymers; polylactic acid (PLA) and polyhydroxybutyrate (PHB) from lignocellulosic residues of sugarcane bagasse, as a sustainable alternative to hydrocarbon-derived plastics. To this end, two production routes were developed and simulated in the Aspen Plus® software, which allowed for the modeling of the technical processes necessary to obtain both biopolymers. Furthermore, an economic analysis was carried out to determine the fixed and variable costs associated with the biorefinery's operation, as well as the minimum selling price per kilogram of each biopolymer. Environmental impacts were also evaluated through the quantification of greenhouse gases and the analysis of the water footprint, in accordance with ISO standards: 14064 and 14046. The results indicate that PLA presents higher conversion efficiency, a lower carbon footprint, and a lower minimum selling price. Although both biopolymers are technically viable, their production requires a significant initial investment.

Keywords: PLA: Polylactic acid, PHB: Polyhydroxybutyrate, SCB: Sugarcane bagasse, biopolymers, carbon footprint, water footprint

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1 Antecedentes | 11 |
| 1.2 Justificación | 13 |
| 1.3 Objetivos | 15 |
| 2. METODOLOGÍA | 16 |
| 2.1 Análisis Técnico | 16 |
| 2.1.1 Análisis de materia prima | 18 |
| 2.1.2 Descripción de las etapas de producción | 19 |
| 2.1.3 Descripción de los flujos y procesos simulados | 27 |
| 2.2 Análisis económico | 28 |
| 2.2.1 Costos fijos de operación | 30 |
| 2.2.2 Costos variables de operación | 32 |
| 2.3 Análisis Ambiental | 33 |
| 2.3.1. Cálculo de huella de carbono | 35 |
| 2.3.2. Cálculo de huella hídrica | 38 |
| 3. RESULTADOS | 41 |
| 3.1 Análisis Técnico | 41 |
| 3.1.1. Ácido poliláctico | 41 |
| 3.1.2. Poli-hidroxibutirato | 44 |
| 3.2 Análisis Económico | 47 |
| 3.2.1. Costos fijos de operación | 47 |
| 3.2.2. Costos variables de operación | 51 |
| 3.3 Análisis Ambiental | 54 |
| 3.3.1. Cálculo de huella de carbono | 54 |
| 3.3.2. Cálculo de huella hídrica | 55 |
| 4. DISCUSIÓN | 57 |
| 4.1 Análisis Técnico | 57 |
| 4.2 Análisis Económico | 58 |
| 4.3 Análisis Ambiental | 60 |
| 5. CONCLUSIONES | 65 |
| 6. REFERENCIAS | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación y aplicación de los principales tipos de plástico..... | 11 |
| Tabla 2. Energría requerida para la producción de biopolímeros..... | 36 |
| Tabla 3. Factor de Emisión y Potencial de Calentamiento Global de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O | 37 |
| Tabla 4. Balance de agua por etapa en la producción de PLA | 39 |
| Tabla 5. Balance de agua por etapa en la producción de PHB | 40 |
| Tabla 6. Resultados de la simulación de los procesos del PLA | 42 |
| Tabla 7. Consumo de energía dentro del proceso de producción del PLA | 43 |
| Tabla 8. Resultados de la simulación de los procesos del PHB | 45 |
| Tabla 9. Consumo de energía dentro del proceso de producción del PHB | 46 |
| Tabla 10. Producción anual de biopolímeros | 47 |
| Tabla 11. Costos operativos fijos de los equipos para la ruta de producción del PLA .. | 48 |
| Tabla 12. Costos operativos fijos de los equipos para la ruta de producción del PHB .. | 49 |
| Tabla 13. Costos operativos fijos de los sueldos del personal | 50 |
| Tabla 14. Costos operativos variables de las materias primas para el PLA | 51 |
| Tabla 15. Costos operativos variables de las materias primas para el PHB | 52 |
| Tabla 16. Ingresos por venta de coproducto..... | 53 |
| Tabla 17. Resumen análisis económico..... | 53 |
| Tabla 18. Emisiones directas e indirectas de GEI | 54 |
| Tabla 19. Emisión por unidad de biopolímero | 55 |
| Tabla 20. Valores correspondientes del impacto hídrico de la producción de PLA | 55 |
| Tabla 21. Valores correspondientes del impacto hídrico de la producción de PHB | 55 |
| Tabla 22. Valores correspondientes al impacto hídrico de la producción de PLA Y PHB | 56 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Diagrama de flujo de la biorrefinería del ácido poliláctico..... | 16 |
| Figura 2. Diagrama de flujo de la biorrefinería del poli-hidroxitirato..... | 17 |
| Figura 3. Composición del bagazo de caña de azúcar..... | 19 |
| <i>Figura 4. Estructuras moleculares: a) celulosa, b) hemicelulosa, y c) lignina</i> | <i>20</i> |
| Figura 5. Proceso de polimerización | 24 |
| Figura 6. Resumen del ciclo de vida de un producto. | 35 |
| Figura 7. Alcance de la huella de carbono..... | 35 |
| Figura 8. Alcance de la huella hídrica | 38 |
| Figura 9. Simulación de los procesos en la biorrefinería del ácido láctico | 41 |
| Figura 10. Simulación de la polimerización del ácido poliláctico | 41 |
| Figura 11. Simulación de los procesos en la biorrefinería del poli-hidroxitirato | 44 |




1. INTRODUCCIÓN





1.1 Antecedentes

Los plásticos son materiales ligeros pero fuertes, resistentes al agua y a la corrosión, químicamente inertes, aislantes y, sobre todo, económicos. La producción de plásticos a partir de hidrocarburos se caracteriza por la abundancia y el bajo costo de su materia prima, así como la infraestructura y tecnologías ya establecidas para su procesamiento [1]. Los plásticos son materiales altamente adaptables a diversas necesidades, lo cual permite crear una amplia variedad de productos, desde envases de alimentos hasta componentes para la construcción, la industria automotriz, y la electrónica [2]. A esto se suma su amplia disponibilidad en el mercado, lo que facilita su acceso a los consumidores sin dificultad alguna [3].

Para comprender mejor la diversidad de plásticos disponibles y sus aplicaciones específicas, resulta útil analizar la clasificación de los principales tipos de plásticos junto a sus características distintivas, composición química y sus usos más comunes como se indica en la *tabla 1*.

Tabla 1. Clasificación y aplicación de los principales tipos de plástico

| No. reciclado | Símbolo | Abreviación | Nombre | Usos | Reutilización | Reciclable |
|---------------|---|-------------|--------------------------------------|--|---|-----------------------------------|
| 1 |  | PET o PETE | Polietileno o Tereftalato o | Botellas de agua, bandejas, cuerdas, peines, blísters | Textiles, alfombras, almohadas, chalecos salvavidas, velas de barco, abrigo | Sí |
| 2 |  | HDPE | Polietileno o de Alta Densidad | Botellas de zumo y leche, bolsas de compra, botes de champú, botes de detergente | Cajones de plástico, vallas | Sí |
| 3 |  | PVC | Policloruro o de Vinilo | Tuberías, blísters, bandejas, zapatillas, canalones, marcos de ventanas, tarjetas de crédito | Suelos, partes de casas móviles, tuberías, cables | Sí, pero no en su totalidad |

| No. reciclado | Símbolo | Abreviación | Nombre | Usos | Reutilización | Reciclable |
|---------------|---|-------------|---|---|------------------------|-------------------------|
| 4 |  | LDPE | Poliétileno de Baja Densidad | Botellas de miel, bolsas de comida congelada, film, tapas flexibles de contenedores | Papeleras | Sí, pero con dificultad |
| 5 |  | PP | Polipropileno | Pañales, tupperes, envases, botes de yogur, platos y vasos desechables | Rastrillos, rascadores | Difícilmente |
| 6 |  | PS | Poliestireno | Vasos de café, bandejas, blisters | Aislamiento, reglas | Sí, en otros envases |
| 7 |  | – | Otros Plásticos (policarbonato, estireno, nylon, etc) | CDs de plástico, biberones, gafas | Construcción | No |

Fuente: Tipos de plásticos, aditivación y mezclado [4]

Entre los plásticos más usados se encuentra el tereftalato de polietileno que destaca por su estructura química, donde las moléculas de ácido tereftálico y etilenglicol se unen mediante un tipo de conexión llamada éster, lo cual le otorga una combinación única de resistencia, flexibilidad y ligereza [5]. Además, este material puede ser fácilmente moldeado por inyección, extrusión o soplado [6]. El tereftalato de polietileno tiene una baja permeabilidad al oxígeno y al dióxido de carbono, lo que lo hace especialmente adecuado para el envasado de bebidas y alimentos, ya que prolonga su vida útil y evita la degradación del contenido [7].

A pesar de sus ventajas, las mismas propiedades que hacen que el tereftalato de polietileno (PET) sea un material útil también presentan obstáculos significativos para su reciclaje. Uno de los principales problemas radica en la deficiencia de los sistemas de detección y clasificación automática de los siete tipos de residuos plásticos, como botellas de PET, envases de HDPE y bolsas de plástico, lo que dificulta su tratamiento adecuado [8]. Además, los enfoques convencionales de reciclaje mecánico del PET, como el reciclaje primario y secundario, presentan limitaciones. En particular, el reciclaje

secundario es problemático debido al deterioro de las características fisicoquímicas del material reciclado [9]. Asimismo, los procesos físicos y químicos empleados en la despolimerización del PET pueden generar contaminantes secundarios, lo que representa un problema ambiental adicional [10]. Además, la ineficacia dentro de los marcos legales actuales sobre la contaminación plástica, junto con la falta de conciencia y compromiso por parte de algunos actores clave, exigen un cambio de paradigma urgente [11].

1.2 Justificación

La contaminación plástica, generada por el uso excesivo de plásticos convencionales, se ha convertido en una creciente amenaza para la salud humana y el medio ambiente. De hecho, durante su uso y eliminación, los plásticos liberan sustancias tóxicas como aditivos, monómeros residuales y microplásticos que pueden afectar la salud humana al aumentar el riesgo de trastornos endocrinos, enfermedades cardiovasculares y diversos tipos de cáncer [12]. Además, los microplásticos alteran la biomasa vegetal, la composición del tejido, los rasgos de las raíces y la actividad microbiana del suelo, lo que puede tener efectos negativos en la agricultura y los ecosistemas terrestres debido a los cambios que inducen en las propiedades biofísicas del suelo, como su estructura y la dinámica hídrica. Estas alteraciones, a su vez, modifican el entorno en el que las plantas crecen y las interacciones entre las raíces y los microorganismos del suelo, afectando la absorción de nutrientes y el desarrollo general de la planta [13]. La fauna marina también se ve gravemente afectada por el plástico de diversas formas, incluyendo la ingestión, el enredo y la alteración de su hábitat, poniendo en peligro la biodiversidad y la salud de los océanos [3].

Uno de los factores que agravan esta crisis ambiental es la alta persistencia del plástico en el ambiente, lo que provoca su acumulación durante cientos de años debido a su lenta degradación [14]. Esto junto a sus características fisicoquímicas, alteran los

hábitats naturales, afectan la reproducción y supervivencia de las especies y perjudican los ciclos biológicos, reduciendo la disponibilidad de espacios adecuados para la fauna y la flora [15]. Además, al estar compuesto principalmente de hidrocarburos, su degradación contribuye a la disminución de los recursos fósiles y a la emisión de gases de efecto invernadero, intensificando el impacto ambiental asociado a su uso [16].

Esta acumulación de plásticos en el entorno ha agravado los problemas ambientales, afectando la salud de los ecosistemas naturales y exacerbando la presión sobre los recursos [17]. En este contexto, en Ecuador la importación de grandes volúmenes de desechos plásticos agrava la gestión de residuos, incrementando la presión sobre los sistemas de tratamiento existentes [18]. Además, la falta de una transición efectiva hacia la economía circular limita las oportunidades de reutilización y reciclaje, lo que prolonga la dependencia de modelos lineales insostenibles y dificulta el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [19].

En consecuencia, el presente estudio se articula en torno a la propuesta de diseñar una ruta de producción detallada de dos biopolímeros de gran potencial: el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxitiratos (PHB). El PLA es un plástico de base biológica más usada con características similares al poliestireno o polietileno, además ofrece una amplia gama de opciones de fin de vida, ya que puede ser compostado industrialmente o digerido anaeróbicamente [20]. Por su parte, el PHB es un candidato prometedor para sustituir a los plásticos convencionales, el cual puede ser producido y polimerizado naturalmente por varios microorganismos [21]. Por lo tanto, un componente central de esta investigación radica en la realización de un exhaustivo análisis técnico económico comparativo entre ambos biopolímeros, evaluando así su viabilidad productiva, costos asociados, y los impactos ambientales asociados a la producción. Estas acciones estratégicas buscan ofrecer una alternativa robusta y sostenible al uso de

plásticos convencionales derivados de hidrocarburos, abordando de manera integral la problemática de la contaminación plástica y promoviendo la conservación de recursos naturales. Este trabajo, no solo explora las bondades individuales del PLA y PHB, sino que también destaca sus diferencias y ventajas frente a los plásticos tradicionales en términos de producción, aplicación y su integración en un esquema de economía circular.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Evaluar comparativamente la viabilidad tecno-económica y ambiental de la producción de PLA y PHB a partir de residuos orgánicos frente a los plásticos de hidrocarburos.

Objetivos específicos

➤ *Técnico*

Diseñar dos rutas de producción optimizadas para la obtención de PLA y PHB a partir de residuos orgánicos.

➤ *Económico*

Analizar tecno-económicamente las rutas de producción de PLA y PHB, estableciendo una comparativa de su rentabilidad y eficiencia en términos de costo.

➤ *Ambiental*

Evaluar el impacto ambiental de la producción de PLA y PHB mediante el cálculo de indicadores de sostenibilidad relevantes.

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis Técnico

La simulación de los procesos se llevó a cabo en el software Aspen Plus versión 12. El programa se destaca como una herramienta ideal que permite simular procesos de ingeniería química, incluyendo la producción de PLA y PHB, debido a su capacidad para modelar con precisión procesos complejos como la polimerización, y balances de masa y energía detallados. Estos balances son fundamentales para asegurar que los flujos másicos de cada proceso unitario del sistema sean consistentes, identificando pérdidas, optimizando el uso de materias primas y predecir el rendimiento del proceso. Además, la capacidad de realizar análisis económicos integrador permite evaluar la viabilidad de la producción a escala industrial.

Para la simulación de la producción de los biopolímeros PLA y PHB en el programa, se inició con la selección de compuestos químicos, sustituyendo aquellos no disponibles por alternativas de propiedades similares. Se optó por el modelo termodinámico NRTL (Non-Random Two Liquid), dada su capacidad para modelar con precisión mezclas líquidas no ideales, optimizando así el comportamiento de las fases líquidas en los procesos de producción.

Los diagramas de flujo de los procesos principales para la producción de PLA y PHB que se llevaron a cabo en el software se presentan en las *figuras 1 y 2*.



Figura 1. Diagrama de flujo de la biorrefinería del ácido poliláctico

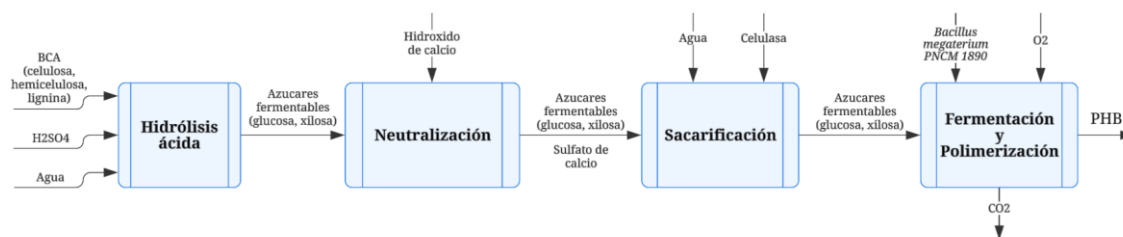


Figura 2. Diagrama de flujo de la biorrefinería del poli-hidroxibutirato

La figura 1 presentada detalla la ruta de producción del PLA, que comprende una serie de etapas secuenciales: empezando por la hidrólisis ácida, neutralización, sacarificación, fermentación láctica y polimerización. La hidrólisis ácida descompone la biomasa en azúcares fermentables con la presencia del ácido sulfúrico, seguida de la neutralización con hidróxido de calcio para ajustar el pH y que esto no inhiba los siguientes procesos. La sacarificación convierte los polisacáridos en azúcares más simples, que luego se fermentan para producir ácido láctico. Finalmente, la polimerización transforma el ácido láctico en el polímero PLA.

En contraste, la figura 2 muestra la ruta de producción del PHB, que integra la hidrólisis ácida, neutralización, similar a la otra ruta de producción, sin embargo, su fermentación y polimerización es diferente ya que se lleva en un solo bloque de proceso, debido a que los gránulos del PHB se forman dentro del microorganismo. De esta forma se generaron dos simulaciones de procesos, una para PLA y otra para PHB, utilizando los mismos flujos másicos de entrada para garantizar una comparación equitativa. Además, se establecieron las mismas condiciones de operación hasta la etapa de sacarificación, lo que permite evaluar las diferencias en la eficiencia de producción en función de la masa de producto obtenido.

2.1.1 Análisis de materia prima

La biomasa lignocelulósica requerida para la producción los biopolímeros corresponden a los residuos de la producción agrícola del bagazo de caña de azúcar. Según datos de 2023, Ecuador produce 6,3 millones de toneladas de caña de azúcar al año, lo que representa una base sólida para la implementación de una industria de bioplásticos [22]. Este volumen de producción significativo no solo contribuye a la economía nacional, sino que también genera subproductos como el bagazo. Según estudios previos, por cada tonelada de caña de azúcar se producen 264 kg de bagazo [23]. Con base en este dato, se estima la cantidad total de bagazo generado anualmente:

$$\text{Bagazo total} = 6.000.000 \text{ toneladas de caña de azúcar} \times \frac{264 \text{ kg de bagazo}}{1 \text{ tonelada de caña de azúcar}}$$

$$\text{Bagazo total} = 1.584.000.000 \text{ kg de BCA} \times \frac{1 \text{ tonelada de BCA}}{1000 \text{ kg de BCA}}$$

$$\text{Bagazo total} = 1.584.000 \text{ t de bagazo}$$

Ecuador cuenta con una producción anual estimada de 1.584.000 toneladas de bagazo de caña de azúcar (BCA), lo cual presenta una oportunidad excepcional para el desarrollo de una biorrefinería dedicada a la producción de biopolímeros. Para satisfacer las necesidades de la biorrefinería del PLA y PHB, se requerirá un suministro constante de aproximadamente 134.000 kg de BCA por hora. La abundancia de este recurso, junto con su rica composición de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo convierte en una materia prima altamente viable (ver *figura 3*) [24]. El aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar no solo optimizaría la producción de biopolímeros, sino que también generaría beneficios ambientales significativos, al reducir la generación de residuos y promover una economía circular. Además, esta iniciativa contribuiría a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, impulsando así un modelo de producción más sostenible.

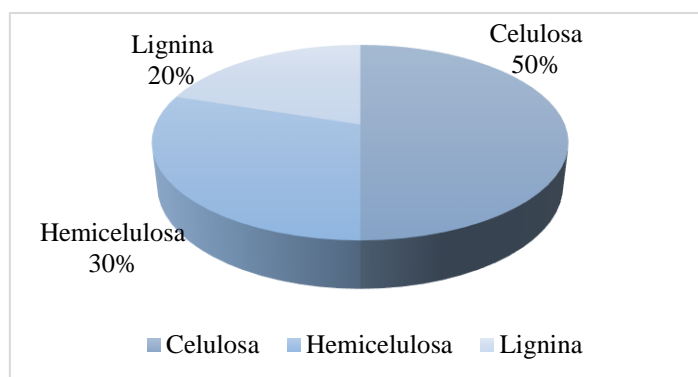


Figura 3. Composición del bagazo de caña de azúcar

La biorrefinería se ha establecido estratégicamente en la zona industrial de la ciudad de Ibarra, una ubicación seleccionada para optimizar la logística y la eficiencia operativa. Esta decisión se fundamenta en la proximidad inmediata a las extensas zonas de cultivo de caña de azúcar, lo que garantiza un acceso directo y continuo a la materia prima. La cercanía a los campos de cultivo no solo minimiza los costos de transporte, sino que también reduce la huella de carbono asociada al traslado de la materia prima. Además, la ubicación en la zona industrial de Ibarra facilita el acceso a infraestructuras y servicios necesarios.

2.1.2 Descripción de las etapas de producción

Los procesos de obtención de los biopolímeros PLA y PHB se describen en detalle a continuación. Si bien ciertas especificaciones no se incorporaron al software por limitaciones, la información completa de estos procesos se presenta aquí.

a. Pretratamiento

El pretratamiento de la materia prima BCA, es un paso esencial para la producción del PLA y PHB, este proceso de pulverización mecánica se diseña con el fin de optimizar la disponibilidad de los componentes lignocelulósicos para su posterior procesamiento.

Inicialmente, el BCA adquirido, con un contenido de humedad inicial del 50%, se sometió a un secado exhaustivo en un horno a 60°C durante 2-3 días con el fin de reducir

significativamente la humedad, llevándola a un 10% aproximadamente, lo cual es fundamental para facilitar las etapas posteriores. A continuación, el BCA seco se corta en trozos de 5-10 cm de longitud para facilitar su procesamiento en un molino de martillos. La molienda mecánica reduce el tamaño de las partículas, aumentando la superficie específica. Por último, para obtener un polvo fino y homogéneo, el BCA pretratado se procesa en un molino de corte. Este paso reducirá el tamaño de las partículas a aproximadamente 0.5 mm, resultando en un material con una alta superficie específica, ideal para los procesos de hidrólisis y fermentación posteriores [25] [26].

Los procesos de hidrólisis ácida, neutralización y sacarificación son similares para ambas simulaciones de biopolímeros.

b. Hidrólisis ácida

Para el proceso de polimerización de los biopolímeros se toma en cuenta los fraccionamientos de celulosa, hemicelulosa y lignina. El proceso de hidrólisis ácida se llevó a cabo en presencia de ácido sulfúrico diluido lo cual permite reducir la cristalinidad de la celulosa, separar la lignina que dificulta el acceso a la celulosa y hemicelulosa, y a su vez aumenta la superficie de la biomasa, que facilita la acción de las enzimas en la sacarificación. Durante este proceso, el ácido diluido rompe los enlaces glucosídicos que unen las largas cadenas de polisacáridos de la celulosa y la hemicelulosa, liberando así los azúcares simples que las componen [26].

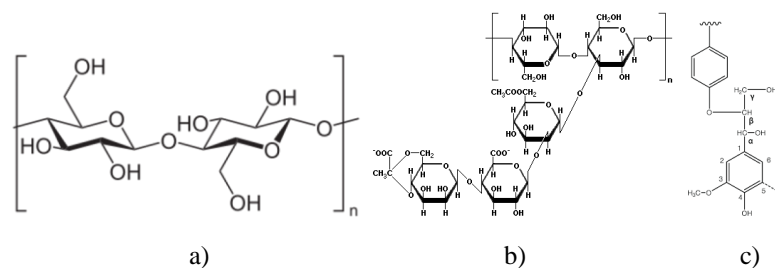
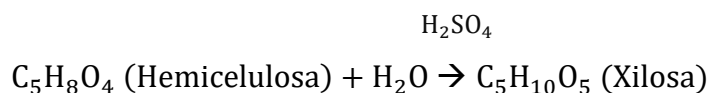
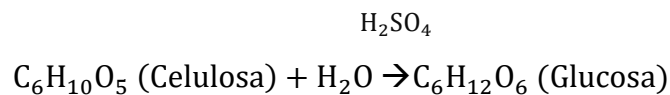


Figura 4. Estructuras moleculares: a) celulosa, b) hemicelulosa, y c) lignina



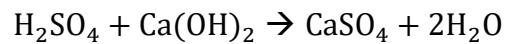
Dentro de la simulación se utilizaron las ecuaciones estequiométricas previamente presentadas. No obstante, debido a las limitaciones del software empleado para modelar directamente la celulosa, se optó por el levoglucano como sustituto. Esta elección se fundamenta en que el levoglucano, un monosacárido anhidro derivado de la glucosa, comparte similitudes estructurales y reactivas con la celulosa, permitiendo así simular su comportamiento en el proceso de manera adecuada. De forma análoga, la hemicelulosa fue sustituida por el ácido glutárico.

En la simulación de las reacciones, se definieron fracciones de conversión específicas para los reactivos, las cuales representan la proporción del reactivo que se transforma en productos. Para la reacción del levoglucano, se estableció una fracción de conversión de 0,7 (70%). Esto sugiere que, bajo las condiciones de simulación establecidas para esa reacción en particular, solo el 70% del levoglucano alimentado se convierte en los productos deseados (glucosa) dentro de la etapa de hidrólisis ácida. Por otro lado, para la reacción donde actúa el ácido glutárico, la fracción de conversión se fijó en 1 (100%) [26]. Esto indica que, en la simulación, se asume que todo el ácido glutárico que ingresa al reactor se convierte completamente en los productos (xilosa).

c. Neutralización

Posterior a la etapa de hidrólisis ácida se requiere llevar a cabo la neutralización del ácido sulfúrico residual con el fin de salvaguardar los siguientes procesos. Esto debido a que la presencia del ácido sulfúrico puede inhibir severamente la actividad de las enzimas durante etapas posteriores y afectar negativamente a los microorganismos que se encargan de la fermentación. Ante ello, un método eficaz para la neutralización es la

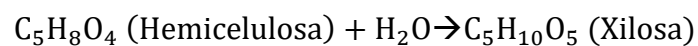
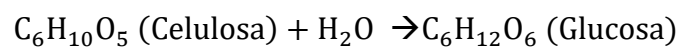
adición del hidróxido de calcio que al reaccionar con el ácido forma el sulfato de calcio, un compuesto relativamente insoluble que puede ser separado con facilidad, lo cual ayuda a elevar el pH a un rango compatible con las enzimas y microorganismos, y elimina el riesgo de inhibición por el ácido residual [27].



En esta etapa de neutralización simulada, se empleó un factor de conversión de 1. Este valor indica que se neutraliza el 1 (100%) del ácido presente en la corriente.

d. Sacarificación

La sacarificación es la etapa que permite liberar los azúcares fermentables, para ello se usa un coctel enzimático de celulasa. Las condiciones óptimas para este proceso se establecieron en una dosis de enzima de Filter Paper Unit (Unidad de Papel de Filtro) FPU/g de celulosa a una temperatura de 50°C, con un pH de 4,8, presión de 5 bar y una relación sólido-líquido de 2:10 [28]. Bajo estas condiciones, se alcanzó una alta conversión de celulosa y hemicelulosa, maximizando la disponibilidad de azúcares para la fermentación subsiguiente [28]. Las siguientes ecuaciones son una simplificación de este proceso y fueron usadas dentro de la simulación.

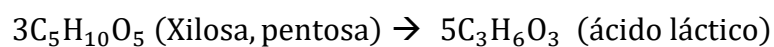


Las enzimas actúan como catalizadores biológicos, reduciendo la energía de activación necesaria para que ocurra la hidrólisis. También, las celulasas y hemicelulasas tienen sitios activos que se unen a las cadenas de polisacáridos y facilitan la adición de agua para romper los enlaces glucosídicos.

e. Fermentación del ácido poliláctico

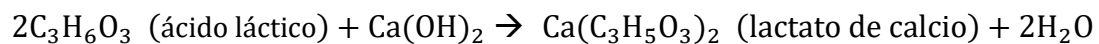
Para la obtención del ácido láctico se usó la cepa de *Lactobacillus casei*, el proceso de fermentación se llevó a cabo en condiciones anaeróbicas en un biorreactor tipo RSTOIC de tanque agitado continuo. Para este proceso se tuvo en cuenta ciertas condiciones como la temperatura a 40°C y la presión de 1bar [28].

Lactobacillus case

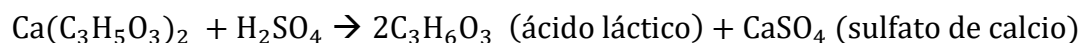


El proceso comprende las siguientes operaciones: precipitación, recuperación de ácido láctico, evaporación, extracción líquido-líquido y destilación. La etapa de precipitación consiste en la adición de hidróxido de calcio para precipitar el ácido láctico esto a 90 °C. Luego, se realiza una filtración donde la fracción sólida se mezcla con una solución de ácido sulfúrico para obtener ácido láctico y sulfato de calcio. El sulfato de calcio se filtra y se separa de la corriente del ácido láctico [28]. Además, se utilizó dodecanol el cual es un solvente orgánico que elimina el ácido láctico del agua en una columna de extracción con el fin de eliminar todas las impurezas. Posterior a la extracción, el ácido láctico se devuelve al agua usando otra columna de extracción con agua a 80 °C como solvente. Por último, la mezcla de ácido láctico-agua se destila [28].

Precipitación



Reacción del lactato de calcio con ácido sulfúrico



f. Polimerización del ácido poliláctico

La síntesis de PLA se inicia con la polimerización por apertura de anillo a 60°C y 200 bar, donde el ácido láctico acuoso se transforma en un pre-polímero de bajo peso molecular mediante oligomerización, seguida de la purificación del ácido láctico no reaccionado para optimizar el rendimiento; posteriormente, el pre-polímero se despolimeriza a lactida, que se purifica mediante destilación al vacío para eliminar impurezas como humedad y ácido láctico residual, asegurando así la calidad del polímero final; finalmente, la lactida purificada se polimeriza por apertura de anillo para obtener PLA de alto peso molecular, que se seca para eliminar la humedad residual y lograr las propiedades deseadas. Este proceso consta de tres etapas, que incluyen oligomerización, producción de lactida y polimerización final. Es crucial para la obtención de PLA de alta calidad a partir de ácido láctico, con cada etapa optimizada para maximizar la pureza y el rendimiento, tal como se describe en estudios previos (Rueda et al., 2022).

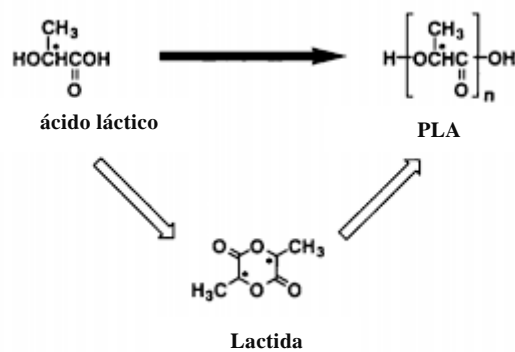
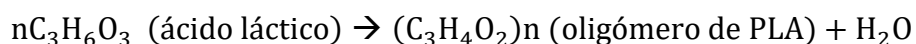


Figura 5. Proceso de polimerización

Reactor de oligomerización – Reacción de condensación

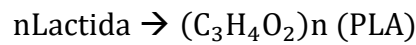


n: número de unidades de ácido láctico que se unen

Despolimerización del pre-polímero de PLA a lactida



Polimerización de PLA



g. Fermentación del poli hidroxibutirato

El proceso de producción de PHB se basa en la fermentación microbiana usando *Bacillus megaterium PNCM 1890*, un microorganismo facultativo capaz de metabolizar diferentes fuentes de carbono. Inicialmente se prepara un cultivo para luego incubarlo bajo agitación constante a 35 °C y 150 rpm por aproximadamente 18 horas con un control inicial de oxígeno disuelto (DO600) de 0,50 [29]. Las células bacterianas se separan del caldo de siembra mediante centrifugación a 2000g durante 15 minutos y se inoculan en el medio hidrolizado, que contiene una mezcla de azúcares derivados del bagazo de caña de azúcar [29]. Dada la capacidad facultativa de *Bacillus megaterium PNCM 1890*, se aprovecha su metabolismo diferencial de azúcares [30].

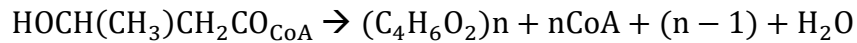
Es importante tener en cuenta que la producción de PHB es un proceso biológico complejo que involucra múltiples reacciones enzimáticas y vías metabólicas. Las bacterias utilizan fuentes de carbono como la glucosa y xilosa para producir monómeros de PHB, este proceso implica una serie de reacciones enzimáticas, incluyendo; la síntesis de Acetil-CoA, posteriormente el Acetil-CoA se utiliza para alargar la cadena de ácidos, y luego se introducen grupos hidroxilo en la cadena de ácidos formando el 3-hidroxibutiril-CoA a partir de acetil-CoA, por último se da la polimerización de esos monómeros para formar el PHB dentro del mismo microorganismo [31].

De esta manera si se omite las coenzimas la reacción neta para la producción de un monómero sería la siguiente:



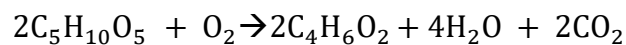
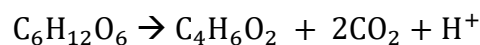
Donde: $\text{CH}_3\text{CO}_{\text{CoA}}$: moléculas de acetil-Coenzima A, $\text{HOCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CO}_{\text{CoA}}$: (R)-3-hidroxi-butiril-Coenzima A.

La enzima PHB sintasa (PhaC) llevaría a cabo la polimerización del 3-hidroxi-butiril-CoA liberando CoA libre en cada ciclo.



Esto indicaría que cada vez que se agrega un monómero al polímero PHB, se libera un CoA y se forma agua, mientras que el polímero se acumula como gránulos insolubles dentro de la célula del microorganismo. Este paso no consume poder reductor adicional (disponibilidad de coenzimas reducidas como el NADPH y el NADH, que pueden donar electrones en reacciones metabólicas), pero requiere enzimas específicas y ocurre típicamente cuando el crecimiento celular se frena redirigiendo el flujo de acetil-CoA hacia PHB en lugar de otras biomoléculas.

Sin embargo, pese a las limitaciones del programa, se usaron las siguientes ecuaciones simplificadas en su totalidad para la simulación del proceso de polimerización.



h. Polimerización del poli hidroxibutirato

La producción del PHB se distingue por su polimerización intracelular, donde *Bacillus megaterium* PNCM 1890, en condiciones de exceso de carbono y limitaciones de nutrientes acumula el PHB como reserva de energía en forma de gránulos dentro de sus células. Posterior a la fermentación las células se rompen para liberar estos gránulos, los cuales se separan y purifican por medio de técnicas como centrifugación y extracción con disolventes, seguido de un secado para obtener el PHB puro, listo para su

procesamiento en distintas aplicaciones mediante granulaci3n, moldeo o modificaci3n para mejorar sus propiedades.

La extracci3n del PHB se da mediante la disoluci3n del material celular no-PHB utilizando hipoclorito de sodio, seguido de una purificaci3n con acetona. Posteriormente los gr3nulos del PHB se centrifugan con el fin de separar los gr3nulos de PHB de los restos celulares. Luego los gr3nulos son lavados con agua para eliminar las impurezas. Posterior a ello se da la purificaci3n con acetona que disuelve el PHB y lo separa de otros componentes, luego se da la precipitaci3n de la soluci3n de disolvente mediante la adici3n de un anti-disolvente como el etanol. Por 3ltimo, el PHB precipitado se seca en un horno 60°C con el fin de eliminar cualquier resto de disolvente y humedad [29].

2.1.3 Descripci3n de los flujos y procesos simulados

El proceso de producci3n de PLA comienza con la combinaci3n de dos corrientes: una corriente de biomasa de 67.000 kg/h, (S1) compuesta por 30% de hemicelulosa (3cido glut3rico), 50% de celulosa (levoglucano) y 20% de lignina (vanilina), y una corriente 3cida de 192.859,5 kg/h, que contiene 95% de agua y 5% de 3cido sulf3rico (S2). Esta mezcla se calienta para someterla a la hidr3lisis 3cida en un reactor CSTR (B1), seguida de un enfriamiento en un intercambiador de calor (B9). Posteriormente, se lleva a cabo la neutralizaci3n del 3cido sulf3rico en un segundo reactor CSTR (B2). El flujo resultante se env3a a un siguiente reactor donde se da la sacarificaci3n (B3). Este resultado se purifica al pasar por un separador de fases (B6) antes de que se lleve a cabo la fermentaci3n l3ctica (B4). Finalmente, se utiliza un separador l3quido (B7) para retirar los residuos y obtener un flujo puro con el mon3mero 3cido l3ctico a trav3s de la corriente S21 (ver *figura 9*). Por consiguiente, se simul3 la polimerizaci3n para lo cual se us3 un reactor CSTR (B1) donde los flujos de ingreso fueron el mon3mero del PLA (S1),

hidrogeno, hexano y el catalizador, lo cual permite obtener el ácido poli láctico, con una eficiencia del 100%, debido a que toda la materia que ingresa como monómero se convierte en polímero. Por último, se tiene un separador (B2) que permitió obtener una corriente compuesta únicamente por el PLA (S4) (ver *figura 10*).

El proceso de producción de PHB inicia con la combinación de dos corrientes: una corriente de biomasa de 67.000 kg/h, (S1) compuesta en un 30% de hemicelulosa (ácido glutárico), 50% de celulosa (levoglucano) y 20% de lignina (vanilina), junto a una corriente ácida de 192.859,5 kg/h, que contiene 95% de agua y 5% de ácido sulfúrico (S2). Esta mezcla se calienta para someterla a la hidrólisis ácida en un reactor CSTR (B2), seguida de un enfriamiento en un intercambiador de calor (B3). Posteriormente, se lleva a cabo la neutralización del ácido sulfúrico en un segundo reactor CSTR (B4). El flujo resultante se envía a un separador de fases (B10) para aislar los componentes necesarios para la sacarificación (B5). Este resultado se purifica al pasar por un segundo separador de fases (B6) antes de la fermentación láctica (B4). Dentro del proceso de fermentación se inyectó una corriente de oxígeno con la ayuda de un compresor (B12), donde la corriente S25 ingresa aire a un flujo molar de 447kmol/h para posteriormente por la corriente S26 ingresar solo una corriente de oxígeno de 3.000kg/h. Finalmente, se utiliza dos destiladores tipo flash (B7 y B11) para retirar los residuos y obtener un flujo que contenga únicamente el polímero PHB a través de la corriente S21 (ver *figura 11*).

2.2. Análisis económico

Los biopolímeros PLA y PHB presentan diversas ventajas; entre ellas sus propiedades mecánicas comparables con las del PET, PE y PS, por ende, puede remplazar los envases cotidianos a base de hidrocarburos, lo cual ayudaría a reducir el uso de

recursos fósiles [32]. Sin embargo, pese a las ventajas, el uso de estos biopolímeros se encuentra limitado por su alto costo.

El análisis tecno económico se presenta como una herramienta clave para evaluar la viabilidad y competitividad de la producción de biopolímeros a partir del bagazo de caña de azúcar. Este enfoque integral permite cuantificar y comparar los costos de producción con otros trabajos y entre las dos rutas de producción, lo cual facilita la construcción de una biorrefinería optimizada tanto en desempeño ambiental como económico. Para lo cual se consideran exhaustivamente los costos asociados a la infraestructura y los costos de producción que abarcan desde la materia prima y maquinaria hasta los recursos naturales y salarios. Además, se consideró importante distinguir entre los costos operativos en fijos (salarios y maquinaria) y variables (materia prima y recursos naturales), proporcionando una visión detallada para la toma de decisiones estratégicas en la implementación del proyecto.

El análisis tecno-económico de las dos rutas de producción se realizó mediante el dimensionamiento de los equipos, el cálculo de los costos fijos y variables, junto a la proyección de un flujo de caja que permitió determinar el precio mínimo de venta (PMV) por kilogramo de biopolímero (PLA, PHB). Además, para evaluar la rentabilidad de las rutas de producción se utilizó el método del valor actual neto (VAN) como indicador, el cual se basa en el flujo de caja y en el descuento de su valor a lo largo del tiempo. Si el VAN es positivo indica resultados rentables de modo que las inversiones generan ganancias. Mientras que un valor negativo indica que el proyecto no genera suficiente retorno para cubrir el costo del capital. Ante ello, este trabajo determino un valor igual a 0 durante los primeros 25 años de operación de la biorrefinería, debido a que indica el punto de equilibrio lo que significaría que la inversión no genera ganancias ni pérdidas. La evaluación de los riesgos del proyecto se llevó a cabo mediante la evaluación de la

probabilidad de rendimiento con base en umbrales como la tasa interna de retorno (TIR) del 9%, este valor refleja el rendimiento bancario típico del país, permitiendo comparar la rentabilidad de las plantas modeladas con las opciones financieras convencionales [33].

2.2.1 Costos fijos de operación

Los costos fijos son los gastos que la empresa debe cubrir independientemente de su nivel de producción o ventas. En el contexto de la producción de biopolímeros PLA y PHB a partir de BCA, estos costos incluyen la inversión inicial y la depreciación de los equipos especializados, el mantenimiento de las instalaciones. Además, de los salarios del personal de la planta. Estos costos son cruciales para mantener la operatividad de la biorrefinería y deben ser cubiertos incluso en períodos de baja producción, lo que hace que su análisis detallado sea fundamental para la planificación financiera y la determinación del punto de equilibrio del proyecto.

Para la estimación de los costos de los equipos primero se obtuvo las dimensiones del software Aspen Plus. Posteriormente se hizo uso del método CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) el cual permite actualizar los costos de capital en proyectos de ingeniería de procesos químicos a lo largo del tiempo con una base de costos que se actualiza constantemente, esto permitió estimar el valor actual de los equipos a usar en los procesos. De tal modo se usó como periodo base el año 1987 con un CEPCI de 323,8, para la obtención del costo actual se usó un índice más actualizado con un CEPCI de 800 perteneciente al año 2024. Además, se aplicó el factor de Lang establecido en 3,5, para considerar los costos indirectos asociados a la instalación y puesta en marcha de la planta. Este factor se multiplica por el costo directo de los equipos para obtener una estimación más precisa de la inversión total.

Para determinar el costo de adquisición de equipo (CAE) se empleó una metodología que considera la vida útil de 25 años, una tasa de interés del 9% y la operación continua durante 350 días al año con un grupo de 68 operadores, para contemplar los tiempos de mantenimiento necesarios. Se aplicó las ecuaciones presentadas a continuación, que ajustan los costos base (1987) a los actuales (2024) mediante los índices CEPCI correspondientes. Se incorporó un exponente de dimensión específico para cada equipo, que refleja la relación no lineal entre su capacidad y su costo, permitiendo así una estimación precisa y adaptada a las particularidades de cada componente de la biorrefinería.

$$\text{CAE 1987} = \text{Costo base} \times \text{Dimensión del equipo}^{\text{exponente de dimensión}}$$

$$\text{CAE actual} = \text{CAE 1987} \times \left(\frac{\text{CEPCI}_{\text{actual}}}{\text{CEPCI}_{\text{año base}}} \right)$$

Para determinar la inversión total (IT) requerida para cada componente de la biorrefinería, se aplicó el factor de Lang, específicamente un multiplicador de 3,5 al costo de adquisición de equipo (CAE) actual. Este factor, ampliamente utilizado en la industria de procesos, permite estimar la inversión total de capital al considerar no solo el costo de los equipos principales, sino también los costos adicionales asociados, tales como la instalación de tuberías, instrumentación, trabajos eléctricos, estructuras y otros gastos de construcción [34]. Al multiplicar el CAE actual por este factor, se obtuvo una estimación más precisa de la inversión total individual para cada componente. La sumatoria de estas inversiones individuales proporciona la inversión total del proyecto, detallada en la *tabla 11*.

Dentro de los costos fijos de operación, los salarios del personal representan un componente crucial. Para garantizar la operatividad continua de la planta durante los 350 días del año, se ha establecido un esquema de tres turnos diarios de ocho horas. Los

salarios presentados en la *tabla 13* se incluyen no solo la remuneración base, sino también las contribuciones a la seguridad social, calculadas al 0,236%, y todos los beneficios laborales exigidos por la ley. Esta consideración integral asegura que los costos laborales reflejen con precisión la carga financiera total asociada al personal de la biorrefinería.

2.2.2 Costos variables de operación

Los costos variables son aquellos que fluctúan en proporción directa al nivel de producción de la empresa. En el contexto de producción de la biorrefinería de PLA y PHB, estos costos están intrínsecamente ligados a las materias primas utilizadas y a los recursos necesarios para el proceso, principalmente energía eléctrica y calor.

Los precios de las materias primas fueron obtenidos de la literatura, tal es el caso de bagazo de caña de azúcar (BCA), material esencial para la producción de PLA y PHB. En el caso del Ecuador no se cuenta con un precio establecido por tonelada de BCA, por lo que se tomó como referencia precios que se establecen en países de Latinoamérica que señalan un costo aproximado de \$15/tonelada [35]. Considerando las particularidades del mercado local, y las posibles variaciones en la disponibilidad del material, en este estudio se adopta un valor de \$10/tonelada de BCA, el cual permite realizar una evaluación económica más ajustada a la realidad del país. De la misma forma se determinó los precios de otros materiales que se encuentran a disposición en la *tabla 14* y *15*.

Si bien el software de simulación utilizado presenta una limitación con respecto al uso de microorganismos, este trabajo lo toma en cuenta. Ante ello tanto como el *Lactobacillus casei* y el *Bacillus megaterium* PNCM 1890 se comprará una sola vez durante la operación de la biorrefinería. Esto se debe a que se estos microorganismos se encuentran en constante crecimiento. El requerimiento del calor y energía para las rutas de producción fueron tomadas de la simulación de AspenPlus. El calor requerido se

obtuvo del gas natural mientras que la energía requerida para la ruta de producción del PBH se la toma de la red eléctrica del país.

El flujo de caja se llevó a cabo con el fin de representar cuánto dinero genera o utiliza la empresa. El análisis del flujo de caja proyectada considera los costos operativos que incluyen los costos fijos (como los salarios del personal, la inversión inicial en equipos), y los costos variables (como las materias primas y recursos naturales). La combinación de estos costos permitió determinar el costo de producción por kilogramo de biopolímero (PLA y PHB). También se consideró los ingresos generadores por la venta de los productos principales como los coproductos de lignina. Con esta información, se logró determinar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período necesario para recuperar el capital invertido, proporcionando una visión integral de la rentabilidad del proyecto lo cual permitió obtener el precio de venta mínimo (PVM) de cada polímero

2.3. Análisis Ambiental

Actualmente, el uso de los plásticos es algo inevitable y se encuentra en constante crecimiento en diversos sectores como en la industria, la vida cotidiana, entre otros. La rentabilidad, el costo y accesibilidad del plástico le ha permitido incorporarse en distintos productos. Sin embargo, esto también ha resultado en un desafío ambiental significativo. De acuerdo con un informe emitido por el PNUMA, entre el año 1950 y 2017 se produjo aproximadamente 7.000 millones de toneladas de plásticos, y se estima que para el 2050 la producción primaria del plástico puede alcanzar los 34 mil millones de toneladas. Donde los residuos plásticos se acumulan en el mar entre 10 a 20 millones de toneladas cada año [25]. Para 2019, los residuos plásticos alcanzaron la cifra de 353 millones de toneladas de las cuales solo el 9% se recicló, mientras que el 19% se incineró y el 50%

terminó en los rellenos sanitarios, mientras que el 20% terminó en vertederos a cielo abierto, en el medio ambiente o se quemó en fosas abiertas [32].

La contaminación ambiental se da en los procesos de producción debido a que se hace uso de la materia prima de origen fósil, a ello se suma el uso de grandes cantidades de energía para las operaciones de producción. De esta forma las emisiones sustanciales de gases de efecto invernadero se encuentran asociadas a la producción de plásticos, la cual consume o usa el 6% del petróleo extraído [32]. Es así como a nivel mundial el sector del plástico contribuye a las emisiones totales de GEI en un 3.4%, generando así 1.800 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) en 2019. De lo cual se comprende que el 90% de las emisiones proviene de las etapas de producción de plásticos y la extracción y conversión de su materia prima (hidrocarburos) [36].

La cuantificación del impacto ambiental de la biorrefinería se lleva a cabo en base a las normas ISO: 14064 (Huella de carbono), y la ISO: 14046 (Huella hídrica).

La huella hídrica y la huella de carbono son dos categorías de impacto ambiental significativas evaluadas dentro del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este trabajo se enfoca en la cuantificación detallada de estos dos indicadores, proporcionando información valiosa para comprender el desempeño ambiental en términos de uso de agua y emisiones de gases de efecto invernadero [37]. Idealmente, el cálculo de estos indicadores debería extenderse a todas las fases, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final "de la cuna a la tumba", tal como se ilustra en la *figura 6*. No obstante, este estudio se centra específicamente en el cálculo correspondiente a la etapa de producción.



Figura 6. Resumen del ciclo de vida de un producto.

2.3.1. Cálculo de huella de carbono

Alcance de la Huella de Carbono

La cuantificación de la huella de carbono se llevó únicamente en la etapa de producción de los biopolímeros (PLA y PHB), para ello se basó en la norma internacional ISO 14064, que proporciona un marco para cuantificar, informar y verificar las emisiones y remociones de GEI.

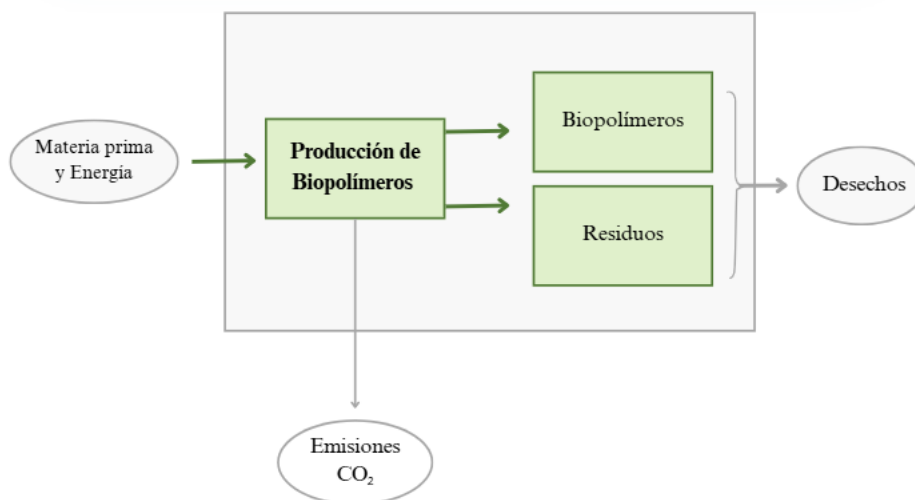


Figura 7. Alcance de la huella de carbono

Para la cuantificación se toma en cuenta como tiempo base los 350 días que pertenecen a los días que labora la biorrefinería.

Límites del proyecto

Las emisiones consideradas dentro del trabajo corresponden a:

- a. Emisiones directas provocadas por:
 - Emisiones directas por consumo de combustible en fuentes estacionarias
 - ✓ Consumo de combustibles: ocasionados por el consumo de gas natural en diversos sectores de la producción de PLA y PHB.
- b. Emisiones indirectas provocadas por:
 - Emisiones indirectas provenientes de electricidad importada
 - ✓ Consumo de energía eléctrica a través de sistema nacional interconectado (SNI) para el compresor usado en la producción de PHB.

Análisis de datos

Combustible

Se hace referencia al tipo de combustible fósil usado en la producción de biopolímeros (PLA y PHB), en este caso se hace referencia al gas natural usado para calentar el caldero y otros reactores que requieran aumentar la temperatura de su flujo. Se dispone de información de la energía en forma de calor requerido por cada equipo en mega julios por año, dato que fue obtenido de la simulación del programa de Aspen plus.

Tabla 2. *Energía requerida para la producción de biopolímeros*

| Producción | Requerimiento de energía (MJ/a) |
|-------------------|--|
| PLA | 1.646.632.674 |
| PHB | 778.355.504 |

Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica proveniente del sistema Nacional Interconectado (SIN) se encuentra expresado en kWh anual. Dentro de este sistema, la producción de PHB es el único proceso que requiere energía eléctrica, específicamente para el funcionamiento de un compresor. Este compresor consume 551kWh de electricidad por cada hora. Lo que totaliza un requerimiento anual de 4.826,76MWh.

Cuantificación de emisiones de combustión estacionaria

Se presenta la expresión específica utilizada para calcular la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por cada categoría. Las emisiones de GEI se componen de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, las cuales se calculan de forma independiente. Al final sumarlos y obtener la emisión neta. El Factor de Emisión (FE) se tomó de las directrices del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero [38], mientras que el Potencial de Calentamiento Global (PCG) se tomó del AR6 de año 2023.

$$\text{Emisiones GEI} = A \times \text{FE} \times \text{PCG}$$

Donde: A: Dato de actividad; FE: Factor de Emisión de cada componente del gas natural; PCG: Potencial de Calentamiento Global; VCN: Valor Calorífico Neto.

Tabla 3. Factor de Emisión y Potencial de Calentamiento Global de CO₂, CH₄ y N₂O

| GEI | FE (kg/TJ) | PCG |
|-----------------------|-------------------|------------|
| CO₂ | 56100 | 1 |
| CH₄ | 1 | 28 |
| N₂O | 0,01 | 265 |

Cuantificación de emisiones indirectas por energía importada

Para cuantificar las emisiones de CO₂ asociadas a la energía importada, se utilizó la expresión indicada. El Factor de Emisión de energía para Ecuador se obtuvo del

informe 2023, específicamente el Factor de emisión de CO₂ del sistema nacional interconectado del Ecuador aprobada por el ministerio de energías y minas [39]. Este factor de emisión es 0,1200 tCO_{2eq}/MWh.

$$\text{Emisiones de CO}_2 = A \times FE_{\text{país}}$$

Donde: A: Dato de actividad; FE_{país}: Factor de Emisión del país

Adicionalmente, se calcula la emisión de CO_{2eq} por unidad de biopolímero producido. Para ello, se dividieron las emisiones totales correspondientes de cada proceso producido. Para ello, se dividieron las emisiones totales correspondientes de cada proceso entre la cantidad de biopolímero producido, obteniendo así un resultado en tCO_{2eq}/t biopolímero (PLA o PHB).

2.3.2. Cálculo de huella hídrica

Alcance de la Huella hídrica

La cuantificación de huella hídrica se llevó únicamente en la etapa de producción de los biopolímeros (PLA y PHB), para ello se basó en la norma internacional ISO 14046, que proporciona principios, requisitos y directrices para la evaluación de la huella hídrica de productos.

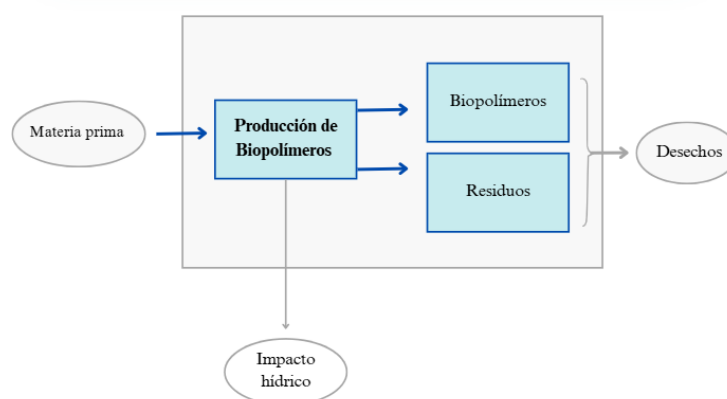


Figura 8. Alcance de la huella hídrica

Para la cuantificación se toma en cuenta como tiempo base los 350 días que pertenecen a los días que labora la biorrefinería.

Límites del proyecto

Los consumos considerados dentro del trabajo corresponden a:

- a. Fuentes de consumo directo:
 - o Consumo directo por uso industrial
 - ✓ Consumo de agua en procesos industriales: para la producción de biopolímeros

Análisis de datos

El cálculo del impacto hídrico se realiza únicamente en el proceso de producción de los biopolímeros, es decir, desde la entrada de materia prima hasta la conversión en PLA y PHB. Se dispone de información del agua requerida en cada etapa, dato que fue obtenido de la simulación del programa de Aspen plus en kilogramo por hora. Sin embargo, para facilitar los cálculos se cambió estos valores a metros cúbicos por año tomando en cuenta la densidad del agua que es equivalente a 1000 kilogramos por metro cubico y tomando en cuenta los 350 días de operación de la biorrefinería.

A continuación, en la *tabla 4*, se presenta el balance de masa del agua en la producción de PLA.

Tabla 4. Balance de agua por etapa en la producción de PLA

| PLA | | |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Ingreso de agua (kg/h) | Etapas | Agua resultante (kg/h) |
| 190950 | Hidrólisis ácida | 185.603,70 |
| | Neutralización | 189.295,67 |
| | Sacarificación | 188.849,02 |
| | Fermentación | 132.194,31 |

De la misma manera en la *tabla 5* se indica el balance de masa de agua dentro de la producción de PHB.

Tabla 5. Balance de agua por etapa en la producción de PHB

| PHB | | |
|------------------------|------------------|------------------------|
| Ingreso de agua (kg/h) | Etapas | Agua resultante (kg/h) |
| 190950 | Hidrólisis ácida | 185.603,69 |
| | Neutralización | 189.295,67 |
| | Sacarificación | 150.375,73 |
| | Fermentación | 373,63 |

Cuantificación de consumo directo

Para cuantificar el consumo directo de agua en los procesos de producción de PLA y PHB, se realiza un balance de masa que permite determinar los flujos de entrada y salida de agua en cada etapa de los procesos, evaluando así el uso directo de recursos hídricos como los posibles impactos ambientales asociados.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

El balance de masa para la cuantificación del impacto hídrico toma en cuenta la entrada del agua, el cual dentro de la simulación es 190.950 kg/h en cada proceso. De esta forma la salida se comprende como la cantidad (flujo) de agua que sale de cada etapa como se indican en la *tabla 4* y *5*, también puede estar relacionado con el agua que se evapora. En este caso igualmente se tuvo una generación (representadas con el signo menos), eso hace sentido a que se crearon moléculas de agua debido a la mezcla de un ácido con una base, por último, se tiene el consumo el cual hace referencia a toda el agua que se quedó dentro la biorrefinería, específicamente el agua que se usa para la producción del biopolímero. El valor del agua consumida se determinó con una resta del agua que ingresa al sistema menos la cantidad que sale de la hidrolisis acida, posteriormente se da la resta entre el agua que ingresa a la neutralización menos lo que sale y así sucesivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis Técnico

3.1.1. Ácido poliláctico

La *figura 9* indica los procesos de simulación de la biorrefinería de PLA a base de BCA. Este proceso arroja una producción de 50.694,81 kg del monómero - ácido láctico por cada hora.

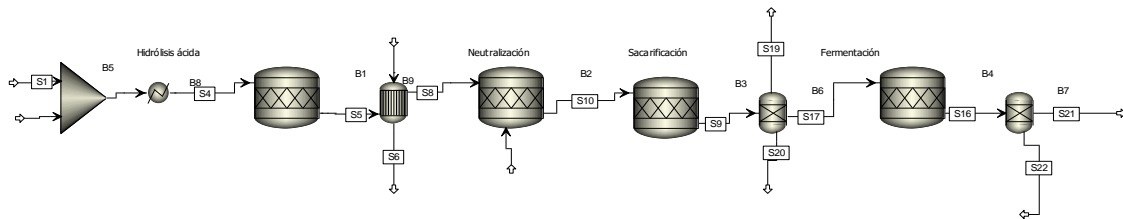


Figura 9. Simulación de los procesos en la biorrefinería del ácido láctico

Mientras que la *figura 10* presenta la simulación de la polimerización del PLA que permitió obtener un flujo másico de 50.694,81 kg de ácido poliláctico por cada hora.

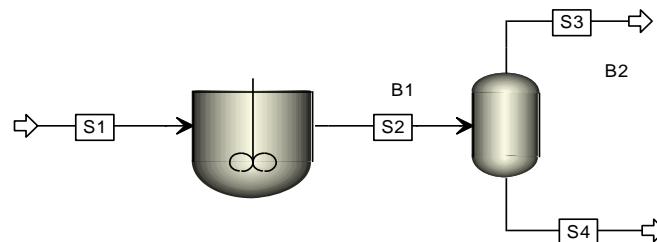


Figura 10. Simulación de la polimerización del ácido poliláctico

A continuación, la *tabla 6* presenta los flujos y fracciones másicas de mayor relevancia obtenido en la simulación del PLA.

Tabla 6. Resultados de la simulación de los procesos del PLA

| Proceso | Componente | Flujo masico (kg/h) | Fracción másica |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Hidrólisis ácida | Celulosa | 10.050 | 0,04 |
| | Hemicelulosa | 0,00 | 0,00 |
| | Lignina | 13.400 | 0,05 |
| | Glucosa | 26.055,48 | 0,10 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,09 |
| | Agua | 185.603,70 | 0,69 |
| | Ácido sulfúrico | 10.050 | 0,04 |
| Neutralización | Celulosa | 10.050 | 0,04 |
| | Lignina | 13.400 | 0,05 |
| | Glucosa | 26.055,48 | 0,09 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,08 |
| | Agua | 189.295,67 | 0,68 |
| | Hidróxido de calcio | 13.950,15 | 0,05 |
| Sacarificación | Celulosa | 6.030 | 0,02 |
| | Glucosa | 30.522,13 | 0,11 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,08 |
| | Agua | 188.849,02 | 0,68 |
| Fermentación | Glucosa | 1.526,11 | 0,01 |
| | Agua | 132.194,31 | 0,69 |
| | Ácido láctico | 50.694,81 | 0,26 |
| Polimerización | Ácido poliláctico | 50.694,81 | 1,00 |

La simulación proporcionó información clave sobre los balances de masa que permite comprender y cuantificar la transformación de la materia prima en productos y subproductos. Adicionalmente, una de las capacidades del software empleado es la obtención de datos sobre el consumo y la liberación de energía en cada etapa del proceso.

A continuación, se presenta información detallada sobre el balance energético de la producción de los biopolímeros. La *tabla 7* presenta la energía en forma de calor requerida en cada etapa dentro de la simulación del PLA.

Tabla 7. Consumo de energía dentro del proceso de producción del PLA

| Etapa | Consumo de Energía (MJ/h) | Observaciones |
|-------------------------|----------------------------------|--|
| Calentador | 173.039,78 | Alta demanda de energía debido al calentamiento necesario para la reacción química. |
| Hidrólisis ácida | 6,40 | Alta demanda de energía debido al calentamiento necesario para la reacción química. |
| Neutralización | -119.280 | Proceso exotérmico que libera energía. |
| Sacarificación | -21.312 | Requiere energía para mantener la temperatura y la agitación enzimática. |
| Fermentación | -23.280 | Proceso biológico que libera energía debido a la actividad metabólica. |
| Polimerización | 22.981,51 | Proceso endotérmico que requiere energía para la fusión y reacción de polimerización, formando cadenas de PLA a partir de los monómeros obtenidos previamente. |
| Total | 196.027,70 | |

El proceso de producción de PLA presenta un consumo total de energía de 196.027,70 MJ/h, siendo las etapas del calentador y la polimerización las que representan un mayor consumo de energía. De acuerdo con la literatura los rangos de energía

específica para la producción del ácido poliláctico a partir de residuos lignocelulósicos es de 2 a 6 MJ/kg [40].

Al estimar la cantidad de energía necesaria para la producción de PLA con una cantidad de 50.694,81 kg/h se obtuvo lo siguiente:

$$\text{Energía Específica} = \frac{\text{Energía total usada}}{\text{Producción de PLA}}$$

$$\text{Energía Específica} = \frac{196.027,70 \text{ MJ/h}}{50.694,81 \text{ kg/h}} = 3,86 \frac{\text{MJ Gas Natural}}{\text{Kg PLA}}$$

3.1.2. Poli-hidroxibutirato

La *figura 11* indica los procesos de simulación de la biorrefinería de PHB a base de BCA. Este proceso arroja una producción de 27.071,45 kg del poli-hidroxibutirato por cada hora.

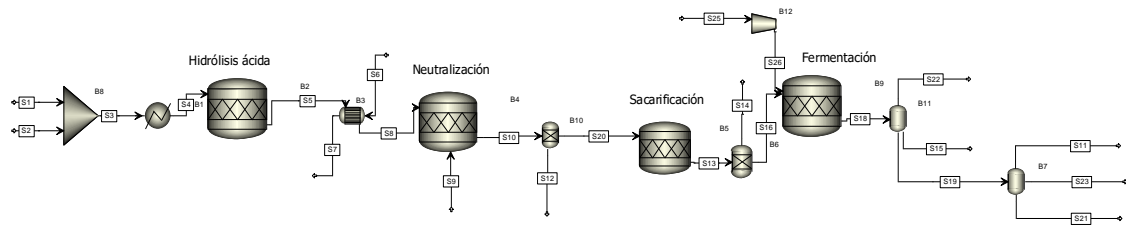


Figura 11. Simulación de los procesos en la biorrefinería del poli-hidroxibutirato

A continuación, la *tabla 8* los flujos y fracciones másicas de mayor relevancia obtenidos en la simulación del PHB.

Tabla 8. Resultados de la simulación de los procesos del PHB

| Proceso | Componente | Flujo masico (kg/h) | Fracción másica |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Hidrólisis ácida | Celulosa | 10.050 | 0,03 |
| | Hemicelulosa | 0,00 | 0,09 |
| | Lignina | 13.400 | 0,05 |
| | Glucosa | 26.055,47 | 0,09 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,08 |
| | Agua | 185.603,69 | 0,69 |
| | Ácido sulfúrico | 10.050 | 0,03 |
| Neutralización | Celulosa | 10.050 | 0,03 |
| | Lignina | 13.400 | 0,05 |
| | Glucosa | 26.055,47 | 0,09 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,08 |
| | Agua | 189.295,67 | 0,71 |
| | Sulfato de calcio | 13.950,15 | 0,05 |
| Sacarificación | Celulosa | 502,50 | 0,00 |
| | Glucosa | 36.663,77 | 0,17 |
| | Xilosa | 22.840,82 | 0,10 |
| | Agua | 150.375,73 | 0,71 |
| Fermentación | Glucosa | 1.833,18 | 0,05 |
| | Agua | 373,63 | 0,01 |
| | CO ₂ | 518,29 | 0,01 |
| | O ₂ | 22,07 | 0,00 |
| | Ácido hidroxibutírico (PHB) | 27.071,50 | 0,76 |

La *tabla 9* presenta la energía eléctrica y calor requerida en cada etapa dentro de la simulación del PHB.

Tabla 9. Consumo de energía dentro del proceso de producción del PHB

| Etapa | Consumo de Energía (MJ/h) | Observaciones |
|-------------------------|----------------------------------|---|
| Calentador | 92.632,67 | Alta demanda de energía debido al calentamiento necesario para la reacción química. |
| Hidrólisis ácida | 28,70 | Segunda etapa de hidrólisis que también consume energía térmica. |
| Neutralización | -87.720 | Consumo de energía para mezclar y controlar la reacción de neutralización. |
| Sacarificación | -19.160 | Requiere energía para mantener la temperatura óptima y la agitación enzimática. |
| Fermentación | 0 | Consumo de energía para mantener la temperatura y la agitación en el biorreactor. |
| Compresor | 551kWh | Consumo de energía eléctrica para inyectar oxígeno al fermentador. |

Se requieren 551kWh de energía eléctrica para la etapa de fermentación, esta energía requerida corresponde al compresor. Con respecto al proceso de producción de PHB se obtiene un consumo total de energía en forma de calor de 93.661,36 MJ/h, y de la misma manera se lleva a cabo la estimación de la cantidad específica de energía necesaria donde se obtuvo los siguiente:

$$\text{Energía Específica} = \frac{\text{Energía total usada}}{\text{Producción de PLA}}$$

$$\text{Energía Específica} = \frac{92.661,36 \text{ MJ/h}}{27.071,45 \text{ kg/h}} = 3,42 \frac{\text{MJ Gas Natural}}{\text{kg PHB}}$$

De esta forma en la *tabla 10* se presenta la producción anual de biopolímeros en toneladas. Obteniendo así una producción de ácido poli láctico 425.826,40 t/a, mientras que la producción de polihidroxibutirato fue de 227.400,18 t/a.

Tabla 10. Producción anual de biopolímeros

| Biopolímeros | kg/h | t/a |
|---------------------|-------------|------------|
| PLA | 50.694,81 | 425.826,40 |
| PHB | 27.071,45 | 227.400,18 |

3.2. Análisis Económico

3.2.1. Costos fijos de operación

La *tabla 11* y *tabla 12* presentan los costos operativos referentes a los equipos a usar en las rutas de producción en base al dimensionamiento tomado de Aspen Plus. Aquí se aprecia el Costo de Adquisición de Equipo (CAE) 1987, el Costo de Adquisición de Equipo (CAE) actual junto a la inversión total (IT). Obteniendo así una inversión total para la ruta de producción del PLA de \$5.486.678,36.

Tabla 11. Costos operativos fijos de los equipos para la ruta de producción del PLA

| Ácido poli-láctico (PLA) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Equipos | Dimensión | Unidad | CAE 1987 (\$) | CAE actual (\$) | IT |
| B8 Caldero (Calentador) | 386 | m ² | \$223.925,58 | \$553.244,18 | \$1.936.354,64 |
| B1 Reactor (hidrólisis ácida) | 33,77 | m ³ | \$46.207,97 | \$114.164,24 | \$399.574,83 |
| B9 Intercambiador de calor | 320,67 | m ² | \$79.359,93 | \$196.071,47 | \$686.250,15 |
| B2 Reactor (Neutralización) | 33,77 | m ³ | \$46.207,97 | \$114.164,24 | \$399.574,83 |
| B3 Reactor (Sacarificación) | 27,78 | m ³ | \$41.099,60 | \$101.543,19 | \$355.401,15 |
| B6 Separador de corriente | 4,27 | m ³ | \$13.361,49 | \$33.011,72 | \$115.541,02 |
| B4 Reactor (Fermentación) | 22,081 | m ³ | \$35.810,43 | \$88.475,43 | \$309.664,00 |
| B7 Separador de corriente | 22,34 | m ³ | \$36.061,87 | \$89.096,64 | \$311.838,25 |
| Polimerización de PLA | | | | | |
| B1 Reactor (Polimerización) | 91,95 | m ³ | \$84.280,93 | \$208.229,61 | \$728.803,62 |
| B2 Separador de corriente | 14,81 | m ³ | \$28.179,37 | \$69.621,68 | \$243.675,87 |
| Total | | | \$ 634.495,16 | \$1.567.622,39 | \$5.486.678,36 |

La *tabla 12* indica que la ruta de producción del PHB requiere una inversión total de \$8.541.758,12.

Tabla 12. Costos operativos fijos de los equipos para la ruta de producción del PHB

| Poli-hidroxibutirato (PHB) | | | | | |
|--|------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Equipos | Dimensión | Unidad | CAE 1987 (\$) | CAE actual (\$) | IT |
| B1 Caldero (Calentador) | 249,28 | m ² | \$223.925,58 | \$553.244,18 | \$1.936.354,64 |
| B2 Reactor (hidrólisis ácida) | 33,77 | m ³ | \$46.207,97 | \$114.164,24 | \$399.574,83 |
| B3 Intercambiador de calor | 1012,97 | m ² | \$79.359,93 | \$196.071,47 | \$686.250,15 |
| B4 Reactor (Neutralización) | 33,15 | m ³ | \$46.207,97 | \$114.164,24 | \$399.574,83 |
| B10 Separador de corriente | 11,10 | m ³ | \$41.099,60 | \$101.543,19 | \$355.401,15 |
| B5 Reactor (Sacarificación) | 22,55 | m ³ | \$13.361,49 | \$33.011,72 | \$115.541,02 |
| B6 Separador de corriente | 8,61 | m ³ | \$35.810,43 | \$88.475,43 | \$309.664,00 |
| B9 Reactor (Fermentación – Polimerización) | 28,87 | m ³ | \$36.061,87 | \$89.096,64 | \$311.838,25 |
| B11 Separador de corriente | 25,64 | m ³ | \$84.280,93 | \$208.229,61 | \$728.803,62 |
| B7 Separador de corriente | 23,43 | m ³ | \$28.179,37 | \$69.621,68 | \$243.675,87 |
| B12 Compresor | 551 | kW | \$353.298,15 | \$872.879,93 | \$3.055.079,76 |
| Total | | | \$987.793,31 | \$2.440.502,32 | \$8.541.758,12 |

A continuación, la *tabla 13* presenta los costos operativos fijos pertenecientes a los sueldos del personal de la empresa compuesta por 68 personas. Para ello se tomó en cuenta el sueldo neto mensual y el sueldo neto anual con lo cual se obtuvo el coste

operativo anual que no es nada más que el producto entre el sueldo neto anual y la cantidad de empleadores. Todos los empleadores que se presentan a continuación operan en la biorrefinería que tiene dos rutas de producción pertenecientes al PLA y al PHB. Obteniendo así un costo total de \$3.411.296,46.

Tabla 13. Costos operativos fijos de los sueldos del personal

| Operador | Cantidad | Sueldo neto mensual | Sueldo neto anual | Costes operativo anual |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Gerente de la planta | 1 | \$7.000,00 | \$84.000,00 | \$84.000,00 |
| Gerente de laboratorio | 1 | \$4.000,00 | \$48.000,00 | \$48.000,00 |
| Personal administrativo | 3 | \$1.200,00 | \$14.400,00 | \$43.200,00 |
| Personal de logística | 5 | \$900,00 | \$10.800,00 | \$54.000,00 |
| Personal de laboratorio | 6 | \$1.500,00 | \$18.000,00 | \$108.000,00 |
| Técnicos de operación | 10 | \$1.500,00 | \$18.000,00 | \$180.000,00 |
| Técnicos de mantenimiento | 6 | \$1.500,00 | \$18.000,00 | \$108.000,00 |
| Operadores de gestión de residuos | 4 | \$1.000,00 | \$12.000,00 | \$48.000,00 |
| Supervisores | 3 | \$900,00 | \$10.800,00 | \$32.400,00 |
| Obreros | 20 | \$700,00 | \$8.400,00 | \$168.000,00 |
| Personal de limpieza | 5 | \$600,00 | \$7.200,00 | \$36.000,00 |
| Personal de seguridad | 4 | \$600,00 | \$7.200,00 | \$28.800,00 |
| Carga laboral | | | | \$844.560,00 |
| Costo operativo fijo Total | | | | \$3.411.296,46 |

3.2.2. Costos variables de operación

La *tabla 14* y la *tabla 15* indican los costos operativos variables referentes a las materias primas y recursos (comprende el calor y la energía eléctrica). Donde se presenta el precio por tonelada, precio por kilogramo, junto al flujo de entrada de cada material en kg/h o MJ/h o kW/h. Lo cual permitió determinar el costo de cada material por kilogramo de producto (PLA o PHB) obtenido.

Tabla 14. Costos operativos variables de las materias primas para el PLA

| Ácido poli-láctico (PLA) | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|---|
| Producto | Precio (\$/t - \$/MJ) | Precio (\$/kg - \$/MJ) | Flujo de entrada | Unidad | Costo por kg de producto (\$/kg) |
| Bagazo de caña de azúcar | \$10 | \$0,01 | 67.000 | kg/h | 0,01 |
| Agua | \$0,72 | \$0,00 | 190.950 | kg/h | 0,00 |
| Ácido sulfúrico | \$46.714,80 | \$46,71 | 1.909,5 | kg/h | 1,76 |
| Hidróxido de calcio | \$900 | \$0,90 | 11.000 | kg/h | 0,20 |
| <i>Lactobacillus casei</i> | \$73.580 | \$73,58 | 0,012 | kg/h | 0,00 |
| Gas Natural | \$0,004 | \$0,004 | 196.027,69 | MJ/h | 0,00 |
| Mantenimiento | - | - | - | - | 0,006 |
| Total | | | | | \$1,98 |

En cambio, la *tabla 15* indica los precios de la materia prima usada para la producción del PHB.

Tabla 15. Costos operativos variables de las materias primas para el PHB

| Poli-hidroxibutirato (PHB) | | | | | |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|---|
| Producto | Precio (\$/t - \$/MJ) | Precio (\$/kg - \$/MJ) | Flujo de entrada | Unidad | Costo por kg de producto (\$/kg) |
| Bagazo de caña de azúcar | \$10 | \$0,01 | 67.000 | kg/h | 0,02 |
| Agua | \$0,72 | \$0,00 | 190.950 | kg/h | 0,01 |
| Ácido sulfúrico | \$46.714,80 | \$46,71 | 1.909,5 | kg/h | 3,30 |
| Hidróxido de calcio | \$0,90 | \$0,90 | 11.000 | kg/h | 0,00 |
| <i>Bacillus megaterium PNCM 1890</i> | \$9.000 | \$9 | 0,023 | kg/h | 0,00 |
| Gas Natural | \$0,004 | \$0,004 | 92.661,36 | MJ/h | 0,00 |
| Energía eléctrica | \$85,80 | \$0,09 | 551 | kW/h | 0,00 |
| Mantenimiento | - | - | - | - | 0,02 |
| Total | | | | | \$3,34 |

Además, se han considerado los ingresos adicionales generados por la venta de la lignina residual, un subproducto leñoso que, debido a su valor energético, puede ser aprovechado para combustión. Este coproducto obtenido durante el proceso de producción de los biopolímeros (PLA y PHB) representan una fuente de ingresos secundarios que de cierta forma contribuye a la rentabilidad global del proyecto, esto dependió en gran medida de la cantidad de producción del biopolímero. Para ello, se tomó en cuenta un precio de venta de \$580/t de lignina, el ingreso por la venta de este material se presenta en la *tabla 16*.

Tabla 16. Ingresos por venta de coproducto

| Biopolímeros | Cantidad de lignina (kg/h) | Ingresos (\$/kg) | Ingresos netos (\$/h) |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| PLA | 13.400 | \$0,15 | \$2,010 |
| PHB | 13.400 | \$0,29 | \$3,886 |

Por último, en esta sección se presenta la *tabla 17* que contiene un resumen general de los resultados obtenidos. Donde se agrega relevancia a que la inversión total de PHB resulto ser más alto en comparación a la inversión total del PLA. Por otro lado, se presentaron los costes operativos variables asociados a la materia prima donde se aprecia el costo de inversión por kilogramo de biopolímeros siendo así que para la producción del PHB se tiene una inversión de \$3,34/ kg PHB y para el PLA \$1,98/ kg PLA. Por último, se tomó en cuenta los ingresos por la venta de coproducto. Con toda esa información se logró determinar el Precio Mínimo de Venta de los biopolímeros. En cuanto al PLA se obtuvo un PMV de \$1,83/kg PLA, mientras que para el PHB se determinó un PMV de \$3,07/kg PHB.

Tabla 17. Resumen análisis económico

| | Componentes | Valores |
|-----------------------------|-----------------------|----------------|
| | Inversión total (PLA) | \$5.486.678,36 |
| Costes Operativos Fijos | Inversión total (PHB) | \$8.541.758,12 |
| | Salarios del personal | \$3.411.296,46 |
| Costes Operativos Variables | Materia Prima (PLA) | \$1,98 |
| | Materia Prima (PHB) | \$3,34 |
| Ingresos coproductos | Lignina (PLA) | \$0,15 |
| | Lignina (PHB) | \$0,29 |

3.3. Análisis Ambiental

3.3.1. Cálculo de huella de carbono

La *tabla 18* indica los resultados obtenidos de las emisiones directas e indirectas de la biorrefinería de biopolímeros (PLA y PHB) para lo cual se obtuvo que la producción de PLA emite 92.426,56 tCO_{2eq}. Mientras que la producción de PHB se distribuye en emisiones directas con una emisión de 43.689,60 tCO_{2eq} y una emisión indirecta de 555,41 tCO_{2eq} lo cual su sumatoria indicaría una emisión en la producción de PHB de 44.245,01 tCO_{2eq}. De esta forma la emisión total de la biorrefinería en la sección de producción es de 136.671,51 tCO_{2eq} al año (350 días).

Tabla 18. Emisiones directas e indirectas de GEI

| Huella de carbono | | | | | |
|----------------------|--|---|----------|---------------------------------|------------|
| Emisión | Categoría | Subcategoría | Producto | CO _{2eq} (tonelada) | Porcentaje |
| Emisiones directas | Emisiones y remociones directas de GEI | Emisiones causadas por combustión estacionaria | PLA | 92.426,56 | 67,63% |
| | | | PHB | 43.689,60 | 31,97% |
| Emisiones indirectas | Emisiones indirectas de GEI causadas por energía importada | Emisiones indirectas causadas por la electricidad importada | PLA | - | - |
| | | | PHB | 555,41 | 0,41% |
| Total | | | | 136.671,57 | 100 |

De la misma forma se llevó a cabo el cálculo para la obtención de emisión de por unidad de biopolímero producido. La *tabla 19*, indica los resultados obtenidos, donde se emite 0,22 tonelada de CO_{2eq} por cada tonelada de PLA, por otro lado, se emite 0,19 tonelada de CO_{2eq} por cada tonelada de PHB.

Tabla 19. Emisión por unidad de biopolímero

| Biopolímero | tCO _{2eq} /t biopolímero |
|-------------|-----------------------------------|
| PLA | 0,22 |
| PHB | 0,19 |

3.3.2. Cálculo de huella hídrica

La *tabla 20* indica los resultados del impacto hídrico correspondientes a la producción del PLA donde se obtuvo un consumo total de agua de 524.560,34 m³ al año.

Tabla 20. Valores correspondientes del impacto hídrico de la producción de PLA

| PLA | | | |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Ingreso de agua m ³ /a | Etapas | Salida de agua (m ³ /a) | Agua consumida (m ³ /a) |
| 1.603.980 | Hidrolisis ácida | 1.559.071,08 | 44.908,92 |
| | Neutralización | 1.590.083,628 | -31.012,54 |
| | Sacarificación | 1.586.331,768 | 3.751,86 |
| | Fermentación | 1.110.432,204 | 475.899,56 |
| Total | | | 524.560,34 |

De la misma manera, la *tabla 21* indica un consumo total de agua, tras la producción del PHB que es 1.631.854,14 m³ al año.

Tabla 21. Valores correspondientes del impacto hídrico de la producción de PHB

| PHB | | | |
|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Ingreso de agua m ³ /a | Etapas | Salida de agua (m ³ /a) | Agua consumida (m ³ /a) |
| 1.603.980 | Hidrólisis ácida | 1.559.070,99 | 44.909,00 |
| | Neutralización | 1.590.083,62 | -31.012,63 |
| | Sacarificación | 1.263.156,13 | 326.927,49 |
| | Fermentación | 3.138,49 | 1.260.017,64 |
| Total | | | 1.631.854,14 |

La *tabla 22* presenta los valores correspondientes al consumo de agua en un año con respecto a la cantidad de biopolímero producido.

Tabla 22. *Valores correspondientes al impacto hídrico de la producción de PLA Y PHB*

| | Biopolímero (t/a) | Consumo de Agua (m³/a) | m³_{agua}/t biopolímero |
|-----|--------------------------|--|---|
| PLA | 425.836,404 | 524.560,34 | 1,23 |
| PHB | 227.400,6 | 1.631.854,14 | 7,18 |
| | Total | 2.156.414,48 | |

4. DISCUSIÓN

4.1. Análisis Técnico

Las simulaciones de biorrefinería para la producción de PLA y PHB respectivamente, usando residuos lignocelulósicos como materia prima, revelan resultados un tanto diferentes en la producción de polímeros. De este modo la biorrefinería de la *figura 9 y 10* alcanzan una producción de 50.694,81 kg PLA/h, mientras que la *figura 11* produce 27.071,45 kg PHB/h. Estas diferencias pueden atribuirse a las distintas rutas metabólicas y eficiencias de conversión de los microorganismos utilizados en cada proceso. Es notable que, a pesar de compartir la misma materia prima y condiciones de entrada, la producción de PLA sea casi el doble que la de PHB. Esto podría indicar una mayor eficiencia en la conversión de los azúcares presentes en la biomasa a ácido láctico en comparación con la producción de ácido hidroxibutírico. Estos resultados sugieren que la biorrefinería de PLA a base de BCA presenta una mayor eficiencia en la producción del polímero en comparación con la de PHB, bajo las condiciones de simulación establecidas. Sin embargo, es importante considerar otros factores, como el consumo de energía, y la generación de subproductos, para una evaluación completa de la sostenibilidad y viabilidad económica de ambos procesos.

El análisis del balance energético reveló diferencias significativas entre los procesos de PLA y PHB. La producción de PLA requiere alrededor de 3,86MJ/kg PLA, concentrados en la hidrólisis ácida, y en la última fase de la polimerización mientras que las etapas restantes son exotérmicas y ofrecen potencial para la recuperación de calor. En contraste, la producción de PHB demanda 3,42 MJ/kg PHB, siendo tanto la hidrólisis como la fermentación procesos endotérmicos. La fermentación endotérmica en PHB se atribuye al metabolismo aeróbico, que requiere energía adicional para el mantenimiento celular y la biosíntesis, a pesar de la acumulación de PHB como reserva de carbono [41].

También se toma en cuenta que en la etapa de fermentación se requiere energía eléctrica debido a la presencia del compresor que inyecta aire al reactor. Estos resultados subrayan la necesidad de optimizar el consumo energético en ambos procesos para mejorar su sostenibilidad y viabilidad económica.

Ambos biopolímeros presentan ventajas ambientales significativas en comparación con los plásticos convencionales derivados del petróleo. La producción de PLA y PHB a partir de BCA representa una estrategia sostenible al reutilizar residuos agroindustriales y reducir la dependencia de fuentes no renovables. Sin embargo, el PHB se degrada más rápidamente en ambientes naturales, esto se debe a que el PHB es un poliéster producido por microorganismos y es más susceptible a la biodegradación por enzimas microbianas en el suelo o en ambientes acuáticos lo que lo hace ideal para aplicaciones de plásticos de un solo uso con un menor impacto ambiental post-consumo [42]. Por otro lado, el PLA, aunque también es biodegradable, requiere condiciones específicas, como altas temperaturas y humedad, para degradarse eficientemente, lo que hace que su proceso de degradación sea más lento en comparación con el PHB [42].

4.2. Análisis Económico

El análisis tecno-económico exhaustivo de las rutas de producción de PLA y PHB, proyectadas a lo largo de un horizonte de 25 años, reveló una estructura de inversión inicial detallada y una evaluación de viabilidad económica. La inversión total necesaria para la biorrefinería se cifra en \$14.028.436,48, dividiéndose en \$5.486.678,36 destinados a la producción de PLA y \$8.541.758,12 para la producción de PHB. A pesar de las similitudes inherentes en los procesos de producción, se observaron diferencias significativas en los costos de inversión y en los PMV: \$1,83/kg para el PLA y \$3,07/kg para el PHB. Esta disparidad en los precios de venta indica una mayor viabilidad económica para la producción de PLA, lo que sugiere un potencial de rentabilidad

superior en comparación con el PHB. Desde una perspectiva financiera, el proyecto tuvo un VAN de 0 y una TIR del 9% que indicarían un punto de equilibrio. Esto significa que, si bien el proyecto no genera ganancias adicionales, tampoco incurre en pérdidas, cubriendo únicamente el costo de capital. El análisis de producción detallado reveló que el período de recuperación de la inversión es de 9 años para el PLA y 10 años para el PHB. En consecuencia, se estima que la biorrefinería en su conjunto alcanzará el punto de equilibrio financiero en 10 años, proyectándose la generación de beneficios netos a partir del undécimo año, extendiéndose a lo largo de los 15 años restantes del horizonte de evaluación.

Un análisis comparativo con otros estudios reveló que la producción integrada de PLA a partir de jugo de caña de azúcar presenta un precio mínimo de venta de \$1,41/kg, inferior a los \$1,83/kg estimados en este proyecto [43]. No obstante, esta diferencia se considera mínima al considerar que nuestro proyecto utiliza bagazo de caña de azúcar (BCA), un subproducto residual, como materia prima, en contraposición al jugo de caña, que contiene una mayor concentración de azúcares como glucosa y xilosa. Esta variación de \$0,42/kg subraya la competitividad de nuestra ruta tecnológica, al lograr costos comparables a los de materias primas más valiosas, pero aprovechando un recurso de menor costo y contribuyendo a la economía circular.

Inicialmente, el PMV estimado para el PHB fue de \$18,59/kg, considerado elevado debido al alto costo del oxígeno requerido en la fermentación. Sin embargo, al comparar con competidores como Monsanto (\$26/kg) y una empresa del Reino Unido (\$30/kg), el precio inicial se consideró competitivo [44]. Para reducir aún más este costo, se optó por sustituir el oxígeno puro por aire comprimido (21% oxígeno), lo que requirió la instalación de un compresor y lo cual modificó los costos variables ya que ahora no sería únicamente calor, sino también energía eléctrica. Tras recalcular los balances

estequiométricos y considerar el nuevo consumo de energía eléctrica y gas natural, se obtuvo un PMV de \$3,07/kg. Este valor es comparable a otros estudios de investigación que utilizan melaza cítrica como materia prima, donde los precios oscilan entre \$2,71/kg y \$4,28/kg [45], además, otros autores reportan valores de producción entre 4,36\$/kg y 5,50\$/kg esto valida la viabilidad económica de la producción de PHB en este proyecto usando un compresor en lugar de inyectar oxígeno puro.

En el contexto ecuatoriano, donde la producción de polímeros derivados de hidrocarburos es inexistente y se depende de la importación, el PET, un polímero comparable con el PLA y el PHB, experimentó un aumento de precio significativo, pasando de \$945 por tonelada en 2021 a \$1314 en 2025 [46]. Los cálculos realizados sugieren que los precios de venta mínimos para el PLA y el PHB serían de \$1980 y \$3340 por tonelada, respectivamente. Aunque estos valores son superiores a los del PET, representan una oportunidad para que los biopolímeros ingresen al mercado y compitan con los polímeros sintéticos.

4.3. Análisis Ambiental

La evaluación del impacto ambiental de la producción de biopolímeros se basó en la producción de 425.836.404 toneladas de PLA por año y de 227.400.600 toneladas de PHB por año. Esto reveló que la producción de PLA genera una mayor emisión de Gases de Efecto Invernadero (92.426,56 toneladas de CO_{2eq}) por la combustión directa de gas natural, lo cual representa el 67,63% de las emisiones totales, debido al alto requerimiento de energía en forma de calor en la etapa de polimerización. En contraste, la producción de PHB emite 43.689,60 toneladas de CO_{2eq} asociado a la emisión directa por la combustión del gas natural, y de 554,41 toneladas de CO_{2eq} asociada a emisiones indirectas por consumo de energía eléctrica del compresor, dando así un total de (44.245,01 toneladas de CO_{2eq}) lo que corresponde a un 32,37% de la emisión neta de la

biorrefinería. De esta forma se apreció que la producción de PLA presenta una mayor huella de carbono debido a la etapa de polimerización que requiere una gran cantidad de calor, mientras que en el proceso de producción del PHB la polimerización se da dentro del microorganismo en la etapa de fermentación por ende requiere menos energía en forma de calor.

La literatura establece que la producción de plásticos sintéticos PET genera una emisión promedio de GEI de 2,60 tCO_{2eq}/t PET [47]. En contraste, el análisis de los resultados obtenidos en este estudio revela una huella de carbono sustancialmente menor para los biopolímeros evaluados, con emisiones por unidad de producto de 0,22 tCO_{2eq}/t PLA y 0,19 tCO_{2eq}/t PHB que se indican en la *tabla 19*. Esta diferencia indica el potencial de los biopolímeros como alternativas con menor impacto climático en comparación con los plásticos convencionales derivados del petróleo. Por otro lado, otros estudios en producción de PLA cuantificaron una emisión de GEI de (0,8 tCO_{2eq}/t PLA) [47], lo cual indica que el valor calculado en este trabajo. Por otro lado, en estudios previos sobre la producción de PHB se cuantificó la emisión de GEI promedio de (0,64 tCO_{2eq}/t PHB) [48], es notablemente menor, aproximadamente tres veces inferior al promedio cuantificado en estudios anteriores. Esta discrepancia podría ser atribuible a las particularidades del proceso de producción de PHB evaluado en este trabajo, posibles optimizaciones implementadas, o diferencias en las metodologías de cálculo. En conjunto, estos resultados resaltan la prometedora contribución de la producción de PLA y PHB, bajo las condiciones analizadas, hacia la mitigación del cambio climático en el sector de los materiales.

A pesar de presentar huellas de carbono relativamente bajas en comparación con los plásticos derivados de hidrocarburos, mitigar incluso estas emisiones menores representa una acción proactiva y responsable hacia la sostenibilidad ambiental. Una

estrategia prometedora para lograr esta compensación radica en la propia materia prima utilizada en la producción de PLA y PHB: la caña de azúcar. Esto debido a que se tiene información de que una hectárea de caña de azúcar puede capturar entre 30 a 50 toneladas de CO₂ por hectárea anualmente [49]. Es crucial destacar que esta capacidad de captura está intrínsecamente ligada a las prácticas de manejo agrícola implementadas, siendo las técnicas sostenibles las que maximizan este potencial [50]. En el contexto ecuatoriano, donde la caña de azúcar se cultiva típicamente dos veces al año, la capacidad anual de captura de CO₂ por hectárea podría aumentar, en escenarios óptimos con prácticas de manejo eficientes, hasta aproximadamente 100 toneladas. Esta considerable capacidad de secuestro de carbono por el cultivo de la caña de azúcar ofrece una vía natural y potencialmente efectiva para compensar las emisiones residuales asociadas a la producción de biopolímeros, fortaleciendo aún más su perfil ambientalmente favorable y contribuyendo a una economía circular más completa. Al integrar la capacidad de captura de carbono de la materia prima en la ecuación de la huella de carbono de los biopolímeros, se podría avanzar hacia un modelo de producción con un impacto climático aún más reducido o incluso neutro.

En cuanto a los resultados obtenidos sobre la cuantificación de huella hídrica, los biopolímeros evaluados presentan diferencias significativas entre sí y con respecto a los plásticos convencionales. De esta forma, la producción de PLA en la biorrefinería arroja un impacto hídrico de 524.560,34 m³. Por su parte, el PHB tiene un valor correspondiente de 1.631.854,14 m³ al año. Esta diferencia significativa está asociada principalmente a la variabilidad en la demanda hídrica de las etapas internas del proceso como la fermentación, que en el caso del PHB representa un consumo extremo comparado con el PLA.

El proceso de producción del biopolímero PHB implica varias etapas que requieren un uso intensivo de agua, como el cultivo bacteriano en medios acuosos, la ruptura celular y la posterior extracción y purificación del polímero. Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza del microorganismo utilizado y las condiciones requeridas en el proceso fermentativo. Para la producción de PHB, se suelen usar la bacteria *Bacillus megaterium* PNCM 1890, este microorganismo requiere condiciones altamente controladas y medios de cultivo ricos en nutrientes y agua, especialmente cuando se busca maximizar el contenido intracelular del polímero [51]. Estas condiciones fermentativas intensas implican un mayor volumen de medio y agua de proceso, lo cual incrementa la huella hídrica total. En contraste, la producción de PLA se basa en procesos químicos más directos, como la fermentación de azúcares para obtener ácido láctico y su posterior polimerización, lo que resulta en un menor consumo de agua. Dado que la producción de PHB genera aguas residuales con alta carga orgánica, incluyendo restos de medios de cultivo, residuos celulares y elevadas concentraciones de DQO y DBO₅, es esencial implementar una planta de tratamiento de aguas residuales. Esta instalación permitirá reducir la contaminación ambiental y cumplir con las normativas vigentes sobre vertidos líquidos.

Para poder compensar el impacto hídrico ocasionado es posible implementar proyectos de agua, que buscan no solo reducir el consumo de agua, sino también generar un impacto neto positivo en el balance hídrico de una región. Esto implica devolver al medio ambiente una cantidad de agua igual o superior a la que se consume, a través de acciones como la reforestación, la restauración de humedales y la recarga de acuíferos. Un ejemplo de este enfoque es el proyecto "Agua Positivo" desarrollado por Florida Ice & Farm y FUNDECOR en Costa Rica, que logró una recarga acuífera potencial de más de 5.7 millones de m³ mediante la protección de 150 hectáreas de bosque [52]. Existe la

viabilidad de aplicar este enfoque en Imbabura donde existen ecosistemas de páramo de gran valor ecológico como Piñán, El Ángel o la zona de Angochagua permitiría compensar el agua utilizada en procesos industriales mediante acciones concretas de conservación, tales como la reforestación con especies nativas, la protección de nacimientos de agua y la construcción de zanjas de infiltración para promover la recarga de acuíferos [53]. Además, este tipo de estrategia puede articularse con actores locales como comunidades indígenas, juntas de agua y gobiernos parroquiales, fomentando así la gestión participativa del recurso hídrico. Restaurar los páramos de Imbabura es una estrategia efectiva para compensar la huella hídrica generada en la producción de biopolímeros como el PLA y el PHB. Estos ecosistemas actúan como esponjas naturales, capturando, almacenando y liberando agua de manera gradual, lo que es esencial para mantener el equilibrio hídrico en la región [53].

5. CONCLUSIONES

El diseño de rutas de producción para los biopolímeros PLA y PHB a partir del bagazo de caña demostró ser técnicamente viable. Los resultados de estas simulaciones no solo confirman la factibilidad ingenieril de las rutas propuestas, sino que también sientan una base sólida para el desarrollo y escalado de estos procesos a nivel industrial. Al evaluar la eficiencia productiva, se observó una notable diferencia con la ruta del PLA alcanzando una mayor cantidad de producto final en comparación con el PHB bajo las mismas condiciones simuladas. Esta disparidad se atribuye principalmente a las diferencias inherentes en sus vías metabólicas asociados a cada proceso de bioconversión. En conclusión, el análisis técnico integral valida el potencial de este residuo lignocelulósico como materia prima sostenible, destacando una ventaja en la eficiencia de producción para la ruta del PLA, lo cual es crucial para futuras decisiones de optimización y evaluación económica.

El análisis económico llevado a cabo en esta investigación revela una clara ventaja en la rentabilidad de la producción de PLA sobre el PHB, sustentada principalmente en su precio de venta considerablemente menor, aproximadamente un 50% inferior. La favorable viabilidad económica se evidencia gracias a la utilización de residuos lignocelulósicos, un subproducto de bajo costo que impulsa a ambos biopolímeros como alternativas competitivas frente a los plásticos de origen petroquímico. Si bien el precio de venta mínimo, determinado a partir del análisis detallado de los costos fijos y operativos se sitúa en niveles competitivos con productos similares, las proyecciones sugieren un potencial para que la producción de PLA y PHB compita directamente con los plásticos convencionales en el mercado. Más aún, se anticipa que la incorporación de un margen adicional al precio de venta podría generar beneficios económicos.

Una vez desarrollado el diseño de las rutas de producción y haber realizado un análisis económico, se llevó a cabo un análisis ambiental donde se calcularon los indicadores de sostenibilidad como la huella de carbono e hídrica. Donde se obtuvo que la producción de PLA genera menos emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que el PHB presentó un mayor impacto hídrico. Estos resultados sugieren que ambos biopolímeros tienen diferentes perfiles ambientales. Ante ello, la evaluación integral de estos indicadores es crucial para optimizar la sostenibilidad de su producción y considerar sus ventajas potenciales frente a los plásticos convencionales. Por lo tanto, si se tuviera que elegir entre qué producto producir, desde una perspectiva ambiental, el PLA se perfila como la opción más favorable.

Considerando los tres componentes principales en los que se enfoca este trabajo se reconoce que la producción de PLA y PHB a partir de BCA es una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para abordar la problemática de los plásticos convencionales. Donde el PLA destaca por su eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad, en cambio el PHB ofrece ventajas en biodegradabilidad. En este contexto, se recomienda priorizar la producción de PLA para aplicaciones de alto volumen y corto ciclo de vida, como envases y empaques desechables, debido a su menor costo y facilidad de procesamiento. Por otro lado, el PHB, aunque presenta un mayor costo de producción, se considera ideal para nichos específicos donde su alta biodegradabilidad represente una ventaja clave, como en aplicaciones agrícolas o médicas. Ambos procesos, integrados en un modelo de economía circular, representan un avance hacia la sostenibilidad, alineándose tanto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y promoviendo a la vez el uso de materiales que tengan un menor impacto al medio ambiente. Demostrando así que la implementación de los bioplásticos no solo es una opción viable, sino también una

oportunidad concreta para impulsar un desarrollo industrial más limpio, responsable y competitivo.

A pesar de haber determinado la viabilidad técnica de ambos procesos bajo un escenario de simulación idealizado se recomienda tener en cuenta que su implementación a gran escala enfrenta desafíos significativos. Debido a que la producción requeriría un volumen considerable de materia prima, cuya disponibilidad debería ser evaluada más detalladamente. Además, el análisis simplificado inherente al software usado omitió ciertos procesos, lo cual implica que la rentabilidad podría ser considerablemente menor en un escenario productivo completo. Por último, la alta inversión inicial requerida para construir la planta de producción de biopolímeros representa una barrera económica importante a considerar para su viabilidad real en el mercado ecuatoriano.

6. REFERENCIAS

- [1] L. Lebreton and A. Andrady, "Future scenarios of global plastic waste generation and disposal," *Palgrave Communications* 2019 5:1, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2019, doi: 10.1057/s41599-018-0212-7.
- [2] N. Evode, S. A. Qamar, M. Bilal, D. Barceló, and H. M. N. Iqbal, "Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 4, p. 100142, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CSCEE.2021.100142.
- [3] W. Huang *et al.*, "Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health," *J Hazard Mater*, vol. 405, p. 124187, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.124187.
- [4] M. Beltrán, "Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado," 2019, Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/16893>
- [5] G. Irena, B. Jolanta, and Z. Karolina, "Chemical modification of poly(ethylene terephthalate) and immobilization of the selected enzymes on the modified film," *Appl Surf Sci*, vol. 255, no. 19, pp. 8293–8298, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.APSUSC.2009.05.126.
- [6] L. Rigamonti, S. E. Taelman, S. Huysveld, S. Sfez, K. Ragaert, and J. Dewulf, "A step forward in quantifying the substitutability of secondary materials in waste management life cycle assessment studies," *Waste Management*, vol. 114, pp. 331–340, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.WASMAN.2020.07.015.
- [7] J. Qiu *et al.*, "A comprehensive review on enzymatic biodegradation of polyethylene terephthalate," *Environ Res*, vol. 240, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.117427.
- [8] G. Sierra, K. A. Olarte Ramírez, H. Ariadna, F. Alberto, and S. Herrera, "Diseño de sistema de separación y clasificación de residuos plásticos para el conjunto residencial Amatista: incorporación de inteligencia artificial para la separación de residuos plásticos," 2023.
- [9] K. Chan and A. Zinchenko, "Design and synthesis of functional materials by chemical recycling of waste polyethylene terephthalate (PET) plastic: Opportunities and challenges," *J Clean Prod*, vol. 433, p. 139828, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.139828.
- [10] A. Kushwaha, L. Goswami, M. Singhvi, and B. S. Kim, "Biodegradation of poly(ethylene terephthalate): Mechanistic insights, advances, and future innovative strategies," *Chemical Engineering Journal*, vol. 457, p. 141230, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.CEJ.2022.141230.
- [11] P. Dauvergne, "The necessity of justice for a fair, legitimate, and effective treaty on plastic pollution," *Mar Policy*, vol. 155, p. 105785, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.MARPOL.2023.105785.

- [12] R. Kumar *et al.*, "Micro(nano)plastics pollution and human health: How plastics can induce carcinogenesis to humans?," *Chemosphere*, vol. 298, p. 134267, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134267.
- [13] A. A. De Souza Machado *et al.*, "Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance," *Environ Sci Technol*, vol. 53, no. 10, pp. 6044–6052, May 2019, doi: 10.1021/ACS.EST.9B01339/SUPPL_FILE/ES9B01339_SI_003.PDF.
- [14] F. Samperi, C. Puglisi, R. Alicata, and G. Montaudo, "Thermal degradation of poly(ethylene terephthalate) at the processing temperature," *Polym Degrad Stab*, vol. 83, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2024, doi: 10.1016/S0141-3910(03)00166-6.
- [15] P. Burgos Pintos, A. Sanz de León, and S. I. Molina, "Large format additive manufacturing of polyethylene terephthalate (PET) by material extrusion," *Addit Manuf*, vol. 79, p. 103908, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ADDMA.2023.103908.
- [16] A. E. Amobonye, C. E. Aruwa, and S. Pillai, "Biodegradability and current status of polyethylene terephthalate," *Biodegradability of Conventional Plastics: Opportunities, Challenges, and Misconceptions*, pp. 155–177, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-89858-4.00011-7.
- [17] J. G. Portilla-Jiménez, "Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 13, no. 1, pp. 38–47, Feb. 2022, doi: 10.29166/revfig.v13i1.3364.
- [18] S. Rached, A. del Castillo, and M. Donoso, "La-basura-plástica-llegó-a-América-Latina," 2021.
- [19] F. J. González Soriano, G. G. Ortiz Choez, and J. R. Landaburú Mendoza, "Economía Circular y Comercio Internacional," *RECIAMUC*, vol. 6, no. 3, pp. 646–655, Jul. 2022, doi: 10.26820/reciamuc/6.(3).julio.2022.646-655.
- [20] A. Morão and F. de Bie, "Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand," *J Polym Environ*, vol. 27, no. 11, pp. 2523–2539, Nov. 2019, doi: 10.1007/S10924-019-01525-9/TABLES/7.
- [21] P. Fink, C. Menzel, J. H. Kwon, and K. Forchhammer, "A novel recombinant PHB production platform in filamentous cyanobacteria avoiding nitrogen starvation while preserving cell viability," *Microb Cell Fact*, vol. 24, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2025, doi: 10.1186/S12934-025-02650-Y/FIGURES/8.
- [22] "Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC," 2024.
- [23] "Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos Caña de azúcar." [Online]. Available: www.snv-la.org
- [24] D. Resano *et al.*, "Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 2, pp. 247–258, Apr. 2022, doi: 10.4067/S0718-07642022000200247.
- [25] T. K. Yong, M. N. S. Musa, R. Abdulla, E. Derman, J. A. Gansau, and M. Rajin, "Synthesis and characterization of bioplastics, Polyhydroxyalkanoates produced from sugarcane

- bagasse by using *Bacillus cereus*,” *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 58, p. 103181, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.BCAB.2024.103181.
- [26] A. V. Grillo and B. F. Santos, “Simulation of Poly-lactic Acid Production from Sugarcane Bagasse Constituents Extracted with Supercritical Water,” *Chem Eng Trans*, vol. 99, pp. 595–600, 2023, doi: 10.3303/CET2399100.
- [27] B. Yang, L. Tao, and C. E. Wyman, “Strengths, challenges, and opportunities for hydrothermal pretreatment in lignocellulosic biorefineries,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 12, no. 1, pp. 125–138, Jan. 2018, doi: 10.1002/BBB.1825.
- [28] C. A. Rueda-Duran, M. Ortiz-Sanchez, and C. A. Cardona-Alzate, “Detailed economic assessment of polylactic acid production by using glucose platform: sugarcane bagasse, coffee cut stems, and plantain peels as possible raw materials,” *Biomass Convers Biorefin*, vol. 12, no. 10, pp. 4419–4434, Oct. 2022, doi: 10.1007/S13399-022-02501-5.
- [29] H. J. C. Barrameda, P. J. Requiso, C. G. Alfafara, F. R. P. Nayve, R. L. G. Ventura, and J. R. S. Ventura, “Hydrolysate production from sugarcane bagasse using steam explosion and sequential steam explosion-dilute acid pretreatment for polyhydroxyalkanoate fermentation,” *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, vol. 30, p. 100376, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.BCDF.2023.100376.
- [30] J. C. A. Dañez, P. J. Requiso, C. G. Alfafara, F. Rey, P. Nayve, and J.-R. S. Ventura, “Optimization of Fermentation Factors for Polyhydroxybutyrate (PHB) Production Using *Bacillus megaterium* PNCM 1890 in Simulated Glucose-Xylose Hydrolysates from Agricultural Residues,” 2020.
- [31] L. De Donno Novelli, S. Moreno Sayavedra, and E. R. Rene, “Polyhydroxyalkanoate (PHA) production via resource recovery from industrial waste streams: A review of techniques and perspectives,” *Bioresour Technol*, vol. 331, p. 124985, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2021.124985.
- [32] J. M. Bressanin *et al.*, “Techno-economic and environmental assessment of polylactic acid production integrated with the sugarcane value chain,” *Sustain Prod Consum*, vol. 34, pp. 244–256, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SPC.2022.09.009.
- [33] K. Maggauer and B. Fina, “Monte Carlo simulation-based economic risk assessment in energy communities,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 987–1003, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.12.046.
- [34] Y. A. Wain, “Updating the Lang Factor and Testing its Accuracy, Reliability and Precision as a Stochastic Cost Estimating Method,” 2014. [Online]. Available: www.pmworlplibary.net
- [35] “El objetivo es el bagazo : Revista Pesquisa Fapesp.” Accessed: Mar. 24, 2025. [Online]. Available: <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/el-objetivo-es-el-bagazo-2/>
- [36] OECD, “Global Plastics Outlook Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options,” *Global Plastics Outlook*. Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html
- [37] R. Kumar *et al.*, “Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions,”

- Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 9963, vol. 13, no. 17, p. 9963, Sep. 2021, doi: 10.3390/SU13179963.
- [38] IPCC *et al.*, *Resumen para responsables de políticas Editado por*. 2019. [Online]. Available: www.ipcc.ch
- [39] Ministro de energía y minas *et al.*, “Informe 2023. Factor de emisión de dióxido de carbono,” Jul. 2024. Accessed: Apr. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- [40] E. T. H. Vink, K. R. Rábago, D. A. Glassner, and P. R. Gruber, “Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production,” *Polym Degrad Stab*, vol. 80, no. 3, pp. 403–419, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00372-5.
- [41] J. M. Naranjo, J. A. Posada, J. C. Higueta, and C. A. Cardona, “Valorization of glycerol through the production of biopolymers: The PHB case using *Bacillus megaterium*,” *Bioresour Technol*, vol. 133, pp. 38–44, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2013.01.129.
- [42] S. Bahl, J. Dolma, J. J. Singh, and S. Sehgal, “Biodegradation of plastics: A state of the art review,” *Mater Today Proc*, vol. 39, pp. 31–34, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.06.096.
- [43] J. M. Bressanin *et al.*, “Techno-economic and environmental assessment of polylactic acid production integrated with the sugarcane value chain,” *Sustain Prod Consum*, vol. 34, pp. 244–256, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SPC.2022.09.009.
- [44] N. A. Manikandan, K. Pakshirajan, and G. Pugazhenthii, “Techno-economic assessment of a sustainable and cost-effective bioprocess for large scale production of polyhydroxybutyrate,” *Chemosphere*, vol. 284, p. 131371, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131371.
- [45] F. A. Pavan *et al.*, “Economic analysis of polyhydroxybutyrate production by *Cupriavidus necator* using different routes for product recovery,” *Biochem Eng J*, vol. 146, pp. 97–104, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.BEJ.2019.03.009.
- [46] Torres Wilmer, “Incremento en el costo del plástico impacta a la industria de alimentos y de banano.” Accessed: Mar. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/costos-plastico-industria-nacional/>
- [47] I. S. Fahim, H. Chbib, and H. M. Mahmoud, “The synthesis, production & economic feasibility of manufacturing PLA from agricultural waste,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 12, p. 100142, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.SCP.2019.100142.
- [48] V. Kachrimanidou *et al.*, “Techno-economic evaluation and life-cycle assessment of poly(3-hydroxybutyrate) production within a biorefinery concept using sunflower-based biodiesel industry by-products,” *Bioresour Technol*, vol. 326, p. 124711, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2021.124711.
- [49] Ochoa Linda, “Hablemos de azucar - Caña que respira vida: Un cultivo en la captura de CO₂ y liberación de oxígeno,” Blog. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available:

<https://hablemosdeazucar.com/blog/post/cana-que-respira-vida-un-cultivo-en-la-captura-de-co2-y-liberacion-de-oxigeno>

- [50] H. B. Carminati, R. de F. D. Milão, J. L. de Medeiros, and O. de Q. F. Araújo, "Bioenergy and full carbon dioxide sinking in sugarcane-biorefinery with post-combustion capture and storage: Techno-economic feasibility," *Appl Energy*, vol. 254, p. 113633, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113633.
- [51] C. Kourmentza *et al.*, "Recent Advances and Challenges towards Sustainable Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production," *Bioengineering 2017, Vol. 4, Page 55*, vol. 4, no. 2, p. 55, Jun. 2017, doi: 10.3390/BIOENGINEERING4020055.
- [52] "Proyectos | Agua Tica." Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.aguatica.org/proyectos>
- [53] R. Célleri Alvear, P. Crespo Sánchez, G. M. Mosquera, A. E. Ochoa-Sánchez, and J. P. Pesántez Vallejo, "Hidrología de los páramos en el Ecuador," *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro*, pp. 76–101, Jun. 2023, doi: 10.18272/USFQPRESS.71.C259.