

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN PROCESO CONCEPTUAL PARA LA VALORIZACIÓN DE VINAZA MEDIANTE PRODUCCIÓN DE PHB

Escuela de ingeniería química, año 2025.

Michael Steven Vanegas-Menjura (Estudiante), Víctor Fernando Marulanda (Co-director), David Andrés Gómez-Ríos (Director)

ABSTRACT

Este estudio propone un esquema conceptual para la producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de vinaza, subproducto de la industria del etanol, mediante un enfoque integrado que combina simulación de procesos, evaluación económica y un análisis línea base de ciclo de vida (ACV). El objetivo principal es ofrecer una alternativa sostenible para la valorización de este residuo, reduciendo su impacto ambiental y generando un bioplástico competitivo. La metodología incluyó la adaptación de rutas metabólicas de *Cupriavidus necator* reportadas en literatura, simuladas en Aspen Plus bajo tres escenarios de concentración de vinaza (7.5%, 5%, 2.5%), utilizando datos experimentales para proyectar condiciones industriales.

Los resultados demostraron que el escenario al 7.5% maximiza la producción de PHB (1.25 kg/hora), con un costo total de USD 3.29 millones para una capacidad anual de 10 toneladas, y un precio de venta estimado de USD 408/kg, competitivo frente a bioplásticos comerciales (USD 174–1.024/kg). El análisis de sensibilidad reveló que las variaciones en el precio del PHB y los costos de insumos impactan significativamente en la viabilidad económica, mientras que el ACV identificó la producción de enzimas como el principal contribuyente al calentamiento global (27,840 kg CO₂ eq/lote) y la escasez de recursos fósiles (1,217 kg oil eq/lote). La recirculación de reactivos redujo el consumo de cloroformo e isopropil en un 85%, alineándose con principios de economía circular. Este trabajo establece un marco técnico-económico para escalar procesos de biorrefinería, destacando la necesidad de optimizar pretratamientos de vinaza y validar experimentalmente los modelos simulados.

PALABRAS CLAVE

bioplásticos, polihidroxibutirato, economía circular, simulación de procesos, valorización de residuos.

1. INTRODUCCIÓN

La vinaza de caña de azúcar constituye el principal subproducto de la producción de bioetanol, caracterizándose por su elevada acidez y por contener alta carga orgánica, sólidos en suspensión y metales pesados. La generación masiva de este efluente (en el orden de 9–14 L de vinaza por cada litro de etanol fermentado) representa una amenaza ambiental significativa, pues su disposición inadecuada contamina suelos y cuerpos de agua [2]. Este residuo se caracteriza por su pH ácido, alta demanda química de oxígeno (DQO) y contenidos significativos de compuestos fenólicos y metales pesados, lo que puede provocar eutrofización y deterioro de la calidad del agua al ser vertido sin tratamiento. Tradicionalmente se han empleado estrategias como la fertirrigación o la digestión anaerobia para mitigar su impacto, pero estas

poseen limitaciones técnicas y ambientales [8]. En este sentido, la búsqueda de alternativas innovadoras de valorización material se ha convertido en una prioridad para reducir la huella ecológica de la industria azucarera.

Frente a estos desafíos, los biopolímeros de la familia de los poli(hidroxialcanoatos) (PHA) emergen como una alternativa sostenible para aprovechar la vinaza como materia prima. Los PHA son poliésteres microbianos termoplásticos acumulados en células bacterianas como reserva de carbono, caracterizados por su biodegradabilidad completa y sus propiedades mecánicas comparables a las de polímeros convencionales [3]. En particular, el poli(3-hidroxibutirato) (PHB) es un homopolímero termoplástico cristalino que fue el primer PHA aislado y descrito [4]. El PHB posee propiedades mecánicas similares al polipropileno (PP), con alta rigidez y resistencia, aunque con menor flexibilidad [3]. Estas características lo hacen atractivo para aplicaciones en envases descartables, biomateriales médicos y otros usos industriales donde se requieren polímeros biodegradables. Sin embargo, su producción a escala industrial enfrenta como principal limitante su elevado costo: mientras un plástico petroquímico como el PE o PP se cotiza en alrededor de 0.2–0.5 USD/kg, el PHB se produce en rangos de 6–15 USD/kg. Aproximadamente la mitad del costo de producción de un biopolímero corresponde al sustrato utilizado [4]. Por ello, la investigación se ha orientado a emplear residuos agroindustriales y subproductos de bajo costo para abaratar la materia prima.

En particular, la vinaza destaca como sustrato económico y abundante para la fermentación de PHB. El aprovechamiento de la vinaza no solo reduciría los costos de producción, sino que además agregaría valor al residuo y disminuiría su impacto ambiental. Estudios recientes confirman el potencial de esta estrategia: Trapé et al. (2022) señalan que utilizar vinaza como fuente de carbono en la producción de PHA abarata el proceso y mitiga la contaminación asociada a la disposición de este efluente [5]. En trabajos experimentales, cepas bacterianas como *Cupriavidus necator* han logrado alcanzar hasta un ~51% de contenido de PHB en biomasa utilizando vinaza tratada como fuente de carbono en el medio de cultivo [6]. Además, análisis tecno-económicos previos han estimado costos de producción de PHAs (a partir de vinaza) en el rango de 2–3 USD/kg bajo escenarios optimizados [7]. Por otra parte, otro estudio reportó que, en un medio suplementado con dextrosa de almidón de yuca y vinaza pretratada al 7,5%, *Cupriavidus necator* alcanzó 5,9 g/L de biomasa y acumuló un 51 % de PHB [1]. Estos resultados muestran que la combinación de vinaza y microorganismos productores puede dar lugar a procesos económicamente viables y con beneficios ambientales. En este contexto, el presente trabajo propone formular un esquema conceptual para la obtención de PHB a partir de vinaza como materia prima, utilizando herramientas de simulación de procesos y evaluación de sostenibilidad.

El objetivo del estudio es diseñar y evaluar un flujo de proceso basado en simulación en Aspen Plus, complementado con análisis económico preliminar y análisis de ciclo de vida. Con ello se pretende determinar la factibilidad técnica, económica y ecológica de esta vía de valorización de vinaza, contribuyendo a generar una alternativa circular para el manejo de residuos agroindustriales y la producción de bioplásticos biodegradables.

2. METODOLOGÍA

2.1 Selección de rutas bioquímicas y reacciones involucradas

Para la formulación del esquema conceptual de producción de polihidroxialcanoatos (PHA), se realizó inicialmente una revisión bibliográfica de estudios experimentales previos realizados por investigadores de la Universidad del Valle, los cuales reportan rutas metabólicas, condiciones operativas y rendimientos asociados a la síntesis de PHA utilizando dextrosa como fuente de carbono en cultivos de *Cupriavidus necator* a escala de laboratorio [1]. La información recopilada permitió establecer las operaciones unitarias y condiciones críticas (como temperatura, pH, tiempo de fermentación y concentración de sustrato) necesarias para adaptar el proceso al uso de vinaza como materia prima. Esta adaptación incluyó el análisis de la composición típica de la vinaza pretratada, y su comparación con las concentraciones equivalentes de azúcares fermentables reportadas en los estudios de referencia.

En esta etapa se identificaron las materias primas clave (vinaza, nutrientes, aire, enzimas y solventes) y se catalogaron las reacciones bioquímicas principales del proceso, tal y como se observa a en las figuras 1 y 2:

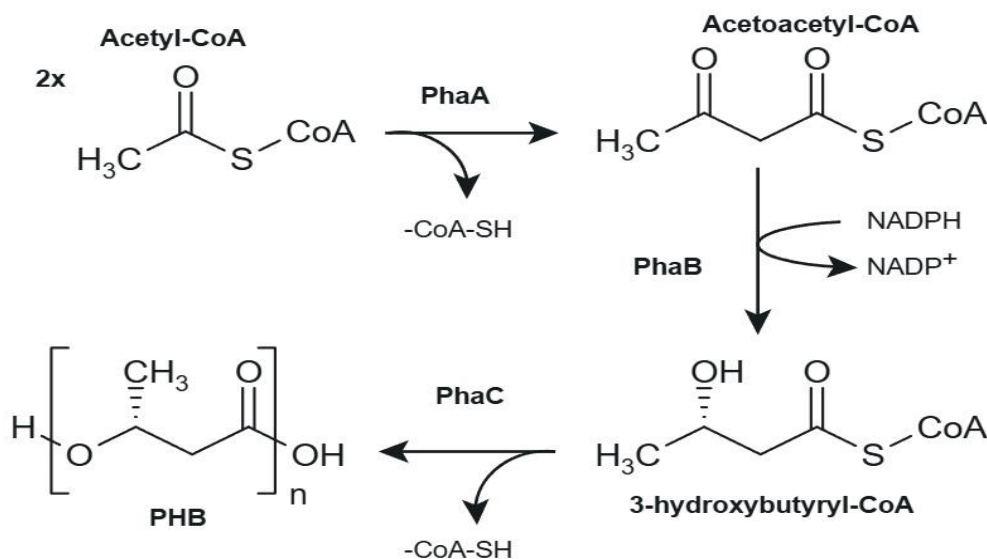


Figura 1. Reacción de Acetyl-Coenzima A para convertirse en PHB

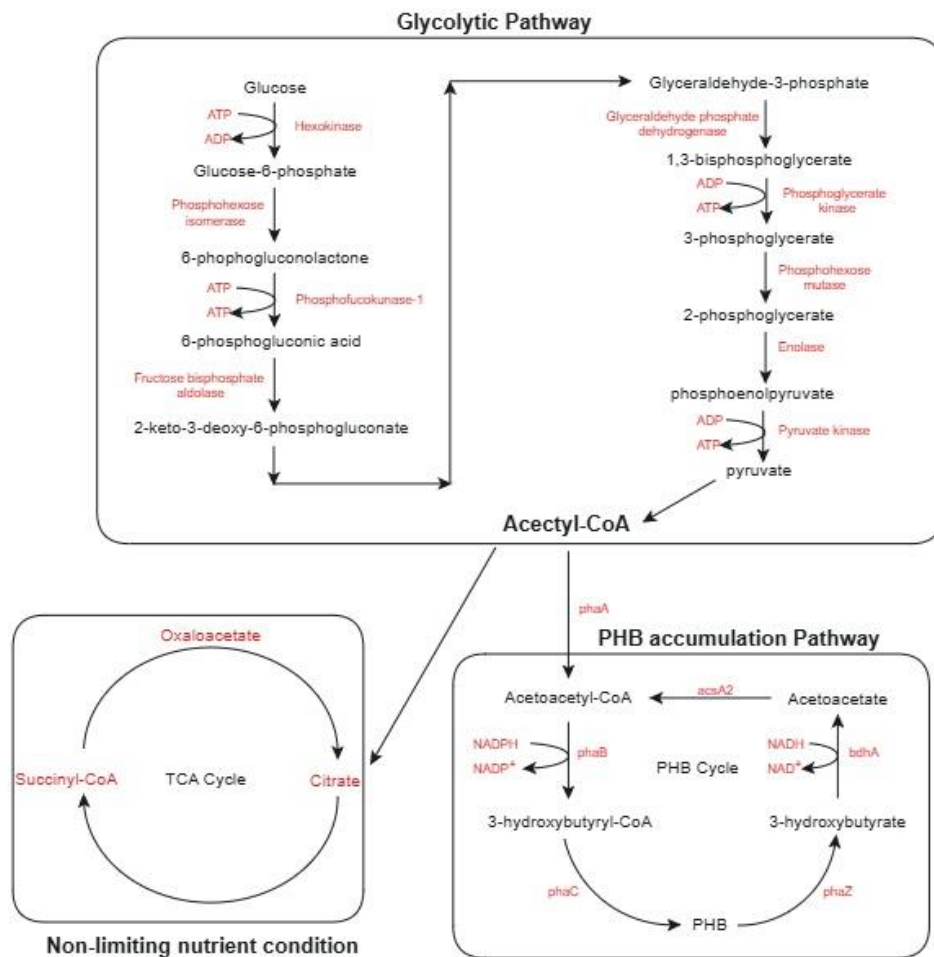


Figura 2. Reacción de glucosa para convertirse Acetyl-Coenzima A y posteriormente PHB

Debido a las limitaciones inherentes al modelado de rutas bioquímicas complejas y cadenas de alto peso molecular en plataformas de simulación de procesos como Aspen Plus, se adoptó una estrategia de simplificación basada en la selección de las etapas más relevantes de la vía metabólica que conduce desde dextrosa (glucosa) hasta acetyl-coenzima A (Acetyl-CoA). Esta decisión metodológica se fundamenta en la necesidad de reducir la complejidad computacional sin comprometer la representatividad del sistema bioquímico, permitiendo así un análisis más robusto del proceso global.

Tabla 1. Reacciones utilizadas para la simulación.

<i>Estequiometría</i>
<i>Dextrosa + 2NAD+2 → 2Piruvato + 2NADH2</i>
<i>Piruvato + COASH + NAD2+ → Acetyl + NADH2</i>
<i>2Acetyl → AcetoAcetyl + COASH</i>
<i>AcetoAcetyl + 2NADPH → Butyryl + 2NADP</i>
<i>Butyryl + H2O → COASH + PHB</i>
<i>Dextrosa → 2Biomasa</i>

En lugar de implementar un modelo cinético completo, se optó por utilizar datos experimentales obtenidos a escala de laboratorio como base para la simulación. Los valores de rendimiento considerados se tomaron de un artículo de referencia [1], en el cual se reportan conversiones experimentales bajo condiciones controladas de fermentación en medio con glucosa y vinaza tratada. En particular, se integraron los siguientes parámetros derivados de dicho estudio: Consumo de glucosa, crecimiento de biomasa celular, y producción de PHB.

Estos valores sirvieron como entrada para estimar los flujos de materia en la simulación y proyectar la productividad del sistema a condiciones de planta conceptual. La incorporación de resultados experimentales previamente validados permite aproximarse de forma realista al comportamiento del sistema, incluso en ausencia de modelos cinéticos detallados.

2.2 Simulación en Aspen Plus

A continuación, el esquema conceptual planteado:

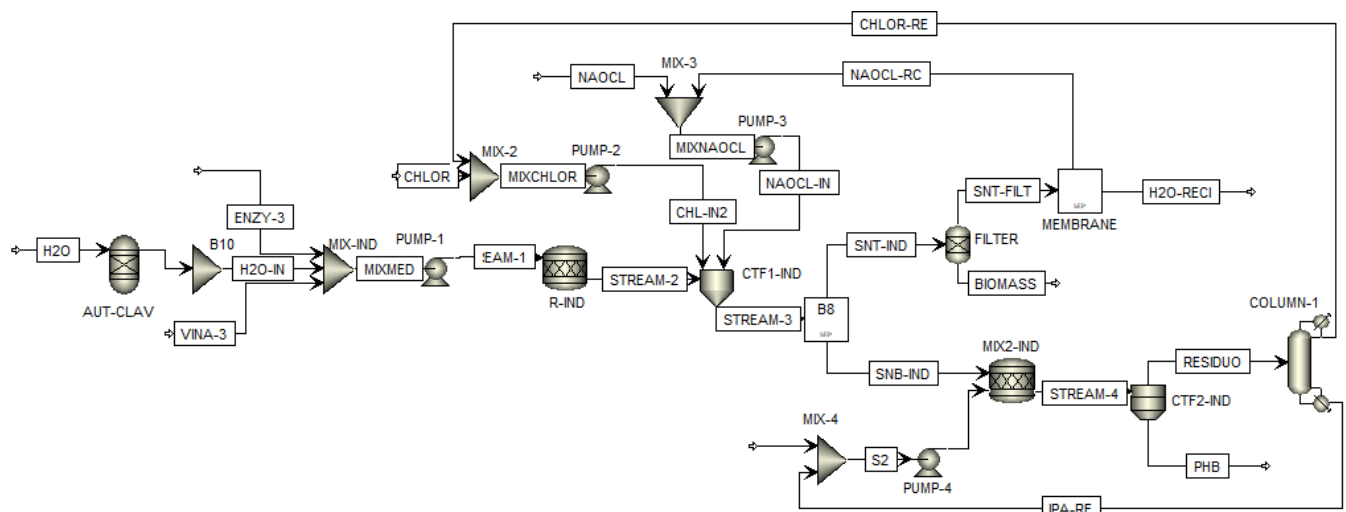


Figura 3. Esquema conceptual planteado para el proceso de producción de PHB a partir de Vinaza.

La **Figura 3** ilustra el esquema conceptual propuesto para la producción y recuperación de poli(3-hidroxibutirato) (PHB). En este diseño, los reactivos y nutrientes ingresan a un biorreactor donde *Cupriavidus necator* metaboliza los compuestos carbonados presentes en la vinaza, generando biomasa celular e intracelularmente acumulando PHB en forma de gránulos. Previamente, el agua requerida para la preparación del medio se toma del acueducto y es sometida a un tratamiento de esterilización en un sistema tipo autoclave, donde se eleva la temperatura hasta 120 °C a una presión de 15 psi (≈ 2 atm), con el fin de eliminar posibles contaminantes microbiológicos y asegurar condiciones asépticas en el cultivo. Una vez finalizado el proceso fermentativo, la suspensión resultante es conducida a un sistema de centrifugación, donde se adicionan cloroformo e hipoclorito de sodio con el objetivo de facilitar la ruptura celular y la

solubilización selectiva del biopolímero. El cloroformo actúa como disolvente para el PHB, permitiendo su separación de otros componentes intracelulares, mientras que el hipoclorito degrada residuos proteicos y estructuras celulares no deseadas [9]. Cabe destacar la adición de dextrosa, la cual se empleó en una concentración de 20 g/L la cual se mantuvo para cada escenario.

Durante la centrifugación, se aprovechan las diferencias de densidad entre fases: el cloroformo, de mayor densidad, se posiciona en la fase inferior, arrastrando el PHB disuelto; por otro lado, la solución de hipoclorito y los restos celulares flotan en la fase superior. De esta manera, se logra una separación preliminar del PHB mediante extracción líquido-líquido asistida por centrifugación [10].

La fase superior es dirigida a un sistema de filtración industrial (filtro prensa o tambor rotatorio), en el cual se retienen los sólidos remanentes (biomasa). El hipoclorito presente en la fracción líquida se canaliza a un sistema de membranas de separación, tales como nanofiltración, ósmosis inversa o electrodiálisis, estas tecnologías han reportado eficiencias de transporte iónico superiores al 90% para aniones monovalentes [26]. Por lo tanto, en este trabajo se asumió un rango teórico de recuperación del hipoclorito entre 87–90%, lo cual representa un escenario viable de valorización y reutilización del agente oxidante, contribuyendo tanto a la reducción del impacto ambiental como a la disminución de los costos operativos asociados al consumo de agentes químicos [11].

La fase inferior, compuesta por cloroformo con PHB disuelto, es sometida a una segunda etapa de tratamiento. En un mezclador, se adiciona isopropanol como agente precipitante. La incorporación del isopropanol disminuye la solubilidad del PHB en el cloroformo, promoviendo su precipitación como sólido. Esta suspensión es nuevamente centrifugada para recuperar el PHB precipitado en forma sólida, mientras que la fase líquida, compuesta por la mezcla de cloroformo e isopropanol, es enviada a una columna de destilación [12].

La destilación se lleva a cabo en condiciones controladas, permitiendo la separación de cloroformo e isopropanol en función de sus puntos de ebullición. Ambos disolventes son condensados, recolectados en tanques de almacenamiento y reincorporados al proceso, cerrando el ciclo de uso de solventes. Esta etapa final permite optimizar la eficiencia del sistema, reducir el consumo de insumos vírgenes y minimizar la generación de residuos peligrosos [12].

A continuación, la composición de vinaza utilizada para la simulación como fuente de carbono de bajo costo y el flujo masico de los reactivos y producto:

Tabla 2. Composición de vinaza para la simulación.

Componentes	Nombre en el simulador	Fracción másica
Agua	WATER	0.9331
Dextrosa	DEXTR-01	0.0083
Ácido glutámico	L-GLU-01	0.0076
Glicerol	GLYCE-01	0.0147
Ácido fumárico	FUMAR-01	0.0128
Ácido láctico	L-LAC-01	0.0121
Óxido de calcio	CALCI-01	0.0005
Óxido de magnesio	MAGNE-01	0.0005
Sulfato de sodio	SODIU-01	0.0011
Etanol	ETHANOL	0.0093

El proceso conceptual descrito fue simulado bajo tres escenarios diferenciados según la concentración de vinaza en el medio de cultivo, con el fin de evaluar su influencia en la productividad del sistema. Las proporciones seleccionadas (7,5 %, 5 % y 2,5 % v/v) se definieron con base en parámetros experimentales reportados en la literatura, específicamente en el artículo de referencia, esto debido a que fueron los que brindaron los mejores resultados [1].

Las simulaciones fueron ejecutadas en Aspen Plus v14, integrando los flujos de entrada y salida, las operaciones de conversión microbiana, y las etapas de separación y recuperación del biopolímero. Se asumió que la disponibilidad de carbono proveniente de la vinaza afecta directamente tanto la generación de biomasa como el rendimiento de PHB acumulado, de acuerdo con los valores experimentales previamente reportados [1].

Con el fin de reflejar de forma más realista los rendimientos observados en los estudios experimentales, se ajustaron las conversiones fraccionarias de las reacciones principales del modelo. Este procedimiento se realizó de forma independiente para cada escenario (2.5%, 5.0% y 7.5% v/v de vinaza), con base en las concentraciones de biomasa y PHB reportadas en la literatura. En el caso del tratamiento con 7.5% de vinaza, por ejemplo, el modelo fue calibrado para obtener concentraciones simuladas de 5.87 kg/m³ de biomasa y 2.98 kg/m³ de PHB, valores técnicamente equivalentes a los reportados experimentalmente (5.90 ± 0.14 g/L y 2.98 ± 0.12 g/L, respectivamente). Las siguientes tablas presentan las conversiones utilizadas y los resultados obtenidos en Aspen Plus para este caso:

Tabla 3. Supuestos de conversión y estequiometría del modelo simulado en Aspen Plus (escenario 7.5% v/v de vinaza).

Conversión	Componente clave	Estequiometria	Resultado Aspen (kg/m ³)	Resultado Dorado et al. (2024) (g/L)
0.2543	Dextrosa	<i>Dextrosa + 2NAD+2 → 2Piruvato + 2NADH2</i>		
1	Piruvato	<i>Piruvato + COASH + NAD2+ → Acetyl + NADH2</i>		
1	Acetyl	<i>2Acetyl → AcetoAcetyl + COASH</i>		
1	AcetoAcetyl	<i>AcetoAcetyl + 2NADPH → Butyryl + 2NADP</i>		
1	Butyryl	<i>Butyryl + H2O → COASH + PHB</i>	2.98179	2.98 ± 0.12
0.388	Dextrosa	<i>Dextrosa → 2Biomasa</i>	5.87091	5.90 ± 0.14

Cada escenario permitió observar variaciones en la eficiencia global del proceso, la productividad específica, y la carga de insumos químicos necesarios por lote. Los resultados obtenidos fueron utilizados como base para los análisis económico y ambiental, permitiendo identificar el escenario más prometedor en términos de viabilidad técnica, impacto ambiental y escalabilidad industrial. El modelo termodinámico utilizado fue NRTL-RK, para más información, consultar el documento anexo.

2.3 Parámetros de modelado en OpenLCA y supuestos adoptados

Para la evaluación ambiental del proceso propuesto, se desarrolló un análisis de ciclo de vida (ACV) en condiciones de línea base. Se asumió que la planta de producción de PHB será construida contigua a un ingenio azucarero en el Valle del Cauca (Colombia), lo cual permite prescindir del análisis de impactos asociados al transporte de vinaza y otros reactivos desde fuentes externas, en coherencia con una estrategia de integración industrial.

Alcance y meta: El análisis de ciclo de vida tiene como objetivo cuantificar los impactos ambientales asociados a la producción de PHB a partir de vinaza como materia prima alternativa.

El alcance considera todas las etapas del proceso, desde la entrada de materias primas hasta la recuperación del biopolímero, modelado como un bloque funcional.

Método de evaluación de impactos: Se utilizó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), seleccionando las categorías de Global Warming Potential, Fossil Resource Scarcity y Freshwater Eutrophication por ser representativas del uso intensivo de energía, solventes petroquímicos y efluentes ricos en nutrientes.

Base de datos: Se empleó Agribalyse, base de datos gratuita adecuada para estudios de ciclo de vida con cobertura europea, aunque se reconoce que existen alternativas comerciales como Ecoinvent para estudios futuros.

El ACV se estructuró bajo un enfoque de “caja negra”, modelando el proceso completo como un único bloque funcional con entradas (vinaza, aire, nutrientes, enzimas, solventes) y salidas (PHB, biomasa residual, emisiones, residuos líquidos). Este método se utilizó para facilitar la comparación entre escenarios operativos, concentrando el análisis en los procesos internos y los impactos directos asociados al uso de insumos y generación de productos/residuos.

Unidad funcional: Se define como la producción de 1 kg de PHB, permitiendo la comparación ambiental entre los tres escenarios que se mencionan a continuación.

El estudio se aplicó a tres escenarios definidos por la concentración de vinaza en el medio de cultivo: 7,5 %, 5 % y 2,5 % (v/v). La estructura general del proceso se mantuvo constante en todos los casos, modificando únicamente los flujos másicos de vinaza, biomasa, PHB y enzimas de acuerdo con los resultados de simulación. Esto permitió identificar cómo la concentración de materia prima afecta indicadores clave de impacto ambiental.

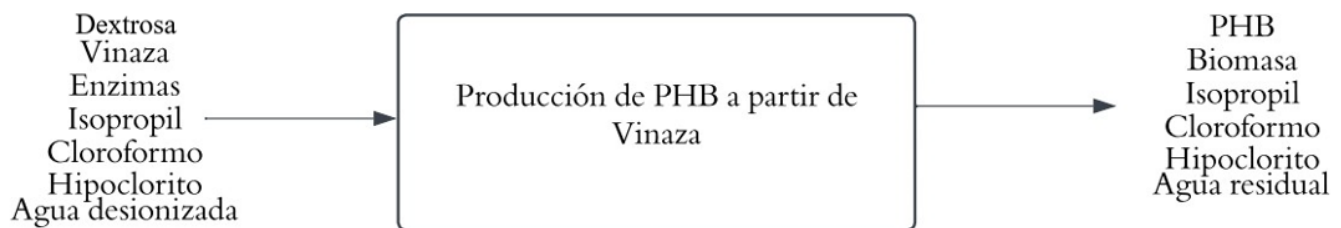


Figura 4. Esquema simplificado del proceso para el análisis de ciclo de vida del PHB.

Para la definición de entradas y salidas del sistema, se utilizaron los datos obtenidos del balance de masa generado previamente en Aspen Plus, correspondientes a cada uno de los tres escenarios de concentración de vinaza. En el caso específico de la vinaza, se utilizó el flujo disponible en la base de datos correspondiente a vinaza de remolacha, debido a que no se cuenta con datos públicos sobre vinaza proveniente de fermentación de caña de azúcar. Esta elección se fundamenta en la similitud tecnológica de los procesos agroindustriales involucrados en ambos casos, los cuales incluyen extracción del jugo, fermentación alcohólica y separación de fases líquidas residuales [1]. Aunque existe un flujo específico para vinaza de caña, su acceso está restringido por requerimientos de licencia comercial.

Dado que la base de datos Agribalyse utilizada en OpenLCA no incluye un flujo específico para el isopropanol (IPA), se diseñó un subproceso que incorpora tanto los insumos materiales como los flujos energéticos asociados. Este modelo se desarrolló utilizando datos de simulación obtenidos en Aspen Plus, basados en el proceso industrial descrito en la patente US5808161A [25].

El reactor del proceso opera a condiciones de alta presión y temperatura (1500 psig y 320 °F) con zeolita beta como catalizador. A partir de los balances de masa y energía simulados, se determinó que la reacción genera un calor total de 2.82 kJ. Este calor fue integrado al análisis en OpenLCA mediante su conversión a un equivalente energético, suponiendo el uso de una fuente de energía térmica como gas natural o electricidad. De esta forma, el modelo considera el impacto ambiental asociado a la energía requerida o energía recuperada durante la producción del IPA. A continuación, se presentan las entradas y salidas de este sistema, en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Flujos de entrada en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de IPA.

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad
Electricidad, tensión media	Others / Ecoinvent cut-off	2.825E5	kJ
Propileno	Others / Ecoinvent cut-off	3.846E4	kg
Agua potable	Others / Ecoinvent cut-off	8064	kg

Tabla 5. Flujos de salida en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de IPA.

Flujo	Categoría	Cantidad	Unidad
Isopropanol	TESIS (producto principal)	2.3623E4	kg
Propileno	Emisión al suelo / no especificado	2.193E4	kg
Agua residual (CO)	Emisión al agua / no especificado	13.56	L

En cuanto al tratamiento de residuos, la biomasa residual fue clasificada como un “residuo sólido urbano” y asignada a un sistema de disposición en relleno sanitario no controlado. Por su parte, los reactivos residuales no recuperados —como el hipoclorito de sodio (NaClO), el cloroformo (CHCl₃) y el isopropanol— fueron considerados emisiones directas al medio acuático, alineadas con escenarios conservadores de descarte.

Debido a la ausencia de una entrada específica para dextrosa en la base de datos seleccionada, se utilizó el flujo “glucose production” como sustituto funcional. Esta decisión se fundamenta en que la dextrosa (D-glucosa) y la glucosa son químicamente equivalentes ($C_6H_{12}O_6$) y cumplen exactamente el mismo rol como fuente primaria de carbono en procesos fermentativos. Por tanto, desde el punto de vista funcional y ambiental, esta sustitución no compromete la validez del análisis realizado. A continuación, se presentan los flujos propuestos o análisis de inventarios en OpenLCA para cada proporción de vinaza:

Flow	Category	Amount	Unit
Enzymes {GLO} market f...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	3876.06900	kg
Heat, from steam, in che...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	142.00000	kWh
ISOPROPIL	TESIS	1417.39000	kg
Sodium hypochlorite, wit...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	275.19000	kg
Trichloromethane {RER} ...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	444.87000	kg
Vinasse, from fermentati...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	1932.49000	kg
Water, deionised, from ta...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	2.71885E4	kg
Glucose {RER} glucose pr...	Others/Ecoinvent cut-off U ...	598.14792	kg

Figura 5. Flujos de entrada en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 7.5%

Flow	Category	Amount	Unit
PHB	TESIS	90.25470	kg
municipal solid waste ...	End-of-life treatment/La...	177.70430	kg
Chloroform	Emission to water/unsp...	444.87000	kg
Sodium hypochlorite	Emission to water/unsp...	270.68000	kg
Water, CO	Emission to water/unsp...	27.27000	m3

Figura 6. Flujos de salida en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 7.5%

Flow	Category	Amount	Unit
Enzymes {GLO} market f...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	3095.28800	kg
Glucose {RER} glucose pr...	Others/Ecoinvent cut-off U ...	598.14792	kg
Heat, from steam, in che...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	142.00000	kWh
ISOPROPIL	TESIS	1417.39000	kg
Sodium hypochlorite, wit...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	275.19840	kg
Trichloromethane {RER} ...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	444.87000	kg
Vinasse, from fermentati...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	1402.92910	kg
Water, deionised, from ta...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	2.71885E4	kg

Figura 7. Flujos de entrada en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 5%

Flow	Category	Amount	Unit
PHB	TESIS	58.14178	kg
municipal solid waste ...	End-of-life treatment/La...	114.31031	kg
Chloroform	Emission to water/unsp...	444.87000	kg
Sodium hypochlorite	Emission to water/unsp...	270.68000	kg
Water, CO	Emission to water/unsp...	27.27000	m3

Figura 8. *Flujos de salida en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 5%*

Flow	Category	Amount	Unit
Enzymes {GLO} market f...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	2591.66420	kg
Heat, from steam, in che...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	142.00000	kWh
ISOPROPIL	TESIS	1417.39000	kg
Sodium hypochlorite, wit...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	275.19000	kg
Trichloromethane {RER} ...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	444.87000	kg
Vinasse, from fermentati...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	717.84970	kg
Water, deionised, from ta...	Others/Ecoinvent cut-off S ...	2.71885E4	kg
Glucose {RER} glucose pr...	Others/Ecoinvent cut-off U ...	598.14792	kg

Figura 9. *Flujos de entrada en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 2.5%*

Flow	Category	Amount	Unit
PHB	TESIS	47.56700	kg
municipal solid waste ...	End-of-life treatment/La...	100.04211	kg
Chloroform	Emission to water/unsp...	444.87000	kg
Sodium hypochlorite	Emission to water/unsp...	270.68000	kg
Water, CO	Emission to water/unsp...	27.27000	m3

Figura 10. *Flujos de salida en la línea base del análisis de ciclo de vida de producción de PHB con una composición de vinaza de 2.5%*

Dado que los reactivos empleados en la etapa de separación y purificación del PHB —como cloroformo, hipoclorito de sodio e isopropanol— se mantienen constantes en los tres escenarios simulados, el análisis comparativo del ciclo de vida se centró en el impacto asociado a la categoría “market for enzyme”. Este insumo representa el principal flujo variable entre escenarios, debido a que su requerimiento se relaciona directamente con la cantidad de vinaza procesada y, por ende, con la producción de biomasa y PHB.

Con el fin de evaluar de manera integral los efectos ambientales del proceso, se seleccionaron tres categorías de impacto a nivel de punto medio, de acuerdo con el método ReCiPe 2024:

- Global Warming Potential (kg CO₂ eq): Esta categoría cuantifica las emisiones netas de gases de efecto invernadero, representando un indicador clave para evaluar la contribución del proceso al cambio climático, especialmente relevante en la producción de biopolímeros que buscan sustituir

plásticos derivados de combustibles fósiles [13].

- Fossil Resource Scarcity (kg oil eq): Evalúa el agotamiento de recursos fósiles no renovables, un parámetro crucial en el contexto de la transición hacia sistemas productivos basados en fuentes sostenibles. Su inclusión permite comparar la dependencia relativa del proceso con respecto a insumos petroquímicos [14].
- Freshwater Eutrophication (kg P eq): Esta categoría se incorporó debido a la alta carga orgánica y contenido de nutrientes presentes en la vinaza, los cuales, en condiciones de manejo inadecuado, pueden generar procesos de eutrofización en cuerpos de agua dulce, afectando negativamente la biodiversidad acuática y los servicios ecosistémicos [15].

Estas tres categorías representan un balance entre impactos globales, energéticos y ecosistémicos locales, facilitando una evaluación comparativa robusta entre los escenarios de concentración de vinaza definidos en el diseño del proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis técnico

A continuación, se presentan los flujos másicos obtenidos para cada proporción de vinaza:

Tabla 6. Flujos masicos obtenidos a partir de la simulación con composición de vinaza de 7.5%

Componente	Nombre en el simulador	Flujo masico de entrada (kg/hora)	Flujo masico de salida (kg/hora)
Vinaza	VINA	26,840	-
Agua destilada	DYSH2O	377,62	-
Cloroformo	CHLOROF	653,6	6,179
Hipoclorito	HIPOCHLO	32.39	3,822
Isopropil	ISOPROP	334,89	19,686
Biomasa	BIOMASS	-	2,468
Polihidroxibutirato	PHB	-	1,254

Tabla 7. Flujos masicos obtenidos a partir de la simulación con composición de vinaza de 5%.

Componente	Nombre en el simulador	Flujo masico de entrada (kg/hora)	Flujo masico de salida (kg/hora)
Vinaza	VINA	19,485	-
Agua destilada	DYSH2O	377,62	-
Cloroformo	CHLOROF	653,6	6,179
Hipoclorito	HIPOCHLO	32.39	3,822
Isopropil	ISOPROP	334,89	19,686
Biomasa	BIOMASS	-	1,588
Polihidroxibutirato	PHB	-	0,808

Tabla 8. Flujos masicos obtenidos a partir de la simulación con composición de vinaza de 2.5%.

Componente	Nombre en el simulador	Flujo masico de entrada (kg/hora)	Flujo masico de salida (kg/hora)
Vinaza	VINA	9,97	-
Agua destilada	DYSH2O	377,62	-
Cloroformo	CHLOROF	653,6	6,179
Hipoclorito	HIPOCHLO	32.39	3,822
Isopropil	ISOPROP	334,89	19,69
Biomasa	BIOMASS	-	1,389
Polihidroxibutirato	PHB	-	0,661

Las Tablas 6, 7 y 8 presentan los balances de materia correspondientes a los tres escenarios evaluados (7,5 %, 5 % y 2,5 % v/v de vinaza). En cada caso, se cuantifican las entradas y salidas principales del sistema, destacando las variaciones generadas por la dilución del sustrato carbonado, mientras se mantienen constantes las cantidades iniciales de los reactivos auxiliares involucrados en la fermentación, extracción y purificación del PHB.

Este enfoque permite evidenciar el impacto directo que tiene la concentración de vinaza sobre la productividad específica de PHB y biomasa, al modificar la cantidad disponible de carbono fermentable en el medio de cultivo. En particular, a mayor dilución del sustrato, se observa una disminución proporcional en los productos biológicos generados, lo que influye tanto en los flujos másicos como en los indicadores técnicos y económicos derivados.

Es importante señalar que las entradas de solventes y reactivos presentan valores aparentemente elevados en comparación con las salidas netas del sistema. Esto se debe a que el modelo considera la recuperación y reutilización interna de estos insumos mediante operaciones como centrifugación, filtración por membranas y destilación, tal como se describió previamente. Esta estrategia de recirculación permite minimizar las pérdidas operativas, reducir la carga ambiental asociada y mejorar la eficiencia global del proceso, tanto en términos de consumo específico como de costos operativos.

3.2 Impacto ambiental

Para simplificar la visualización de los resultados, se agruparon los impactos en tres gráficos, uno para cada categoría ambiental evaluada, donde se comparan las tres proporciones de vinaza:

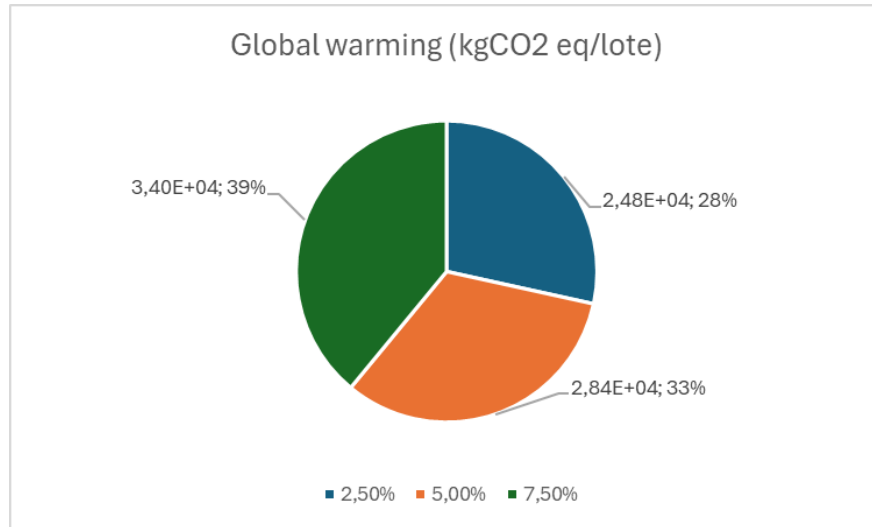


Figura 11. Impacto ambiental por global warming para las 3 composiciones de vinaza.

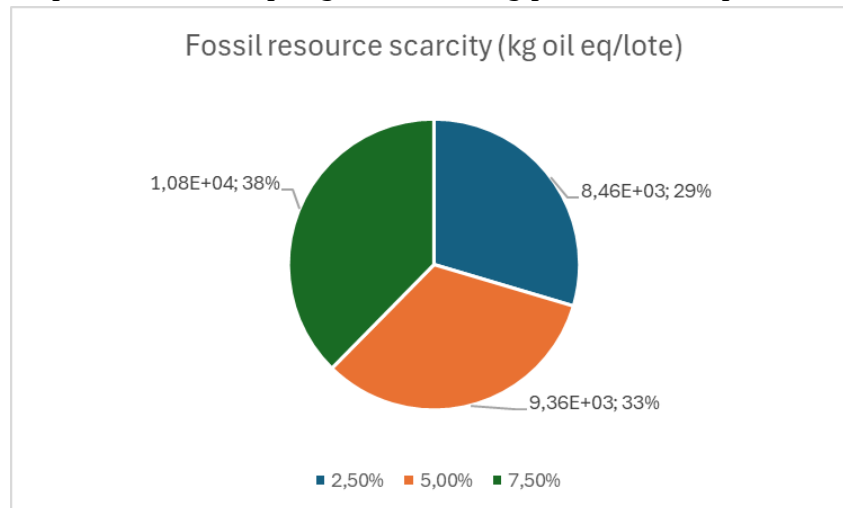


Figura 12. Impacto ambiental por fossil resource scarcity para las 3 composiciones de vinaza.

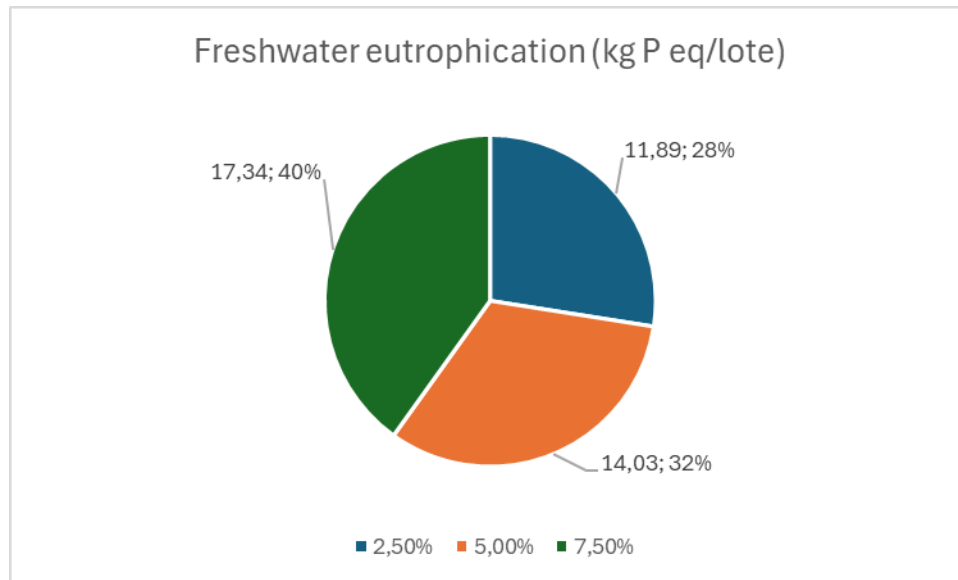


Figura 13. Impacto ambiental por freshwater eutrophication para las 3 composiciones de vinaza.

El incremento observado en los gráficos se explica por la mayor demanda de enzimas en el proceso. Al utilizar una mayor concentración de vinaza, es necesario un volumen más alto de enzimas para degradar la materia orgánica y facilitar la conversión a PHB, lo que incrementa el consumo de este insumo y, en consecuencia, los impactos asociados a su producción y transporte.

En el caso de Global Warming, el aumento del 7.5 % de vinaza implica una mayor cantidad de enzimas, cuya producción genera emisiones adicionales de gases de efecto invernadero a lo largo de su ciclo de vida. Además, el procesamiento de un mayor volumen de vinaza puede requerir más energía, lo que también contribuye a un incremento en las emisiones. Respecto a fossil resource Scarcity, el incremento se debe a que la producción de enzimas implica el uso de insumos químicos y energía, ambos derivados en gran parte de recursos fósiles. Al aumentar la concentración de vinaza y la necesidad de enzimas, se intensifica la extracción y el consumo de estos recursos no renovables, por otro lado, el impacto por freshwater eutrophication se debe a que en el proceso de producción de enzimas genera residuos líquidos con alto contenido de nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Estos compuestos, cuando no se gestionan adecuadamente, pueden liberarse al ambiente, causando un mayor riesgo de eutrofización en cuerpos de agua dulce. A mayor concentración de vinaza, se requiere una mayor cantidad de enzimas, lo que aumenta el volumen de residuos generados y, por ende, el potencial de eutrofización. A continuación, los gráficos generados por el software OpenLCA para el caso de composición de vinaza de 7.5%:

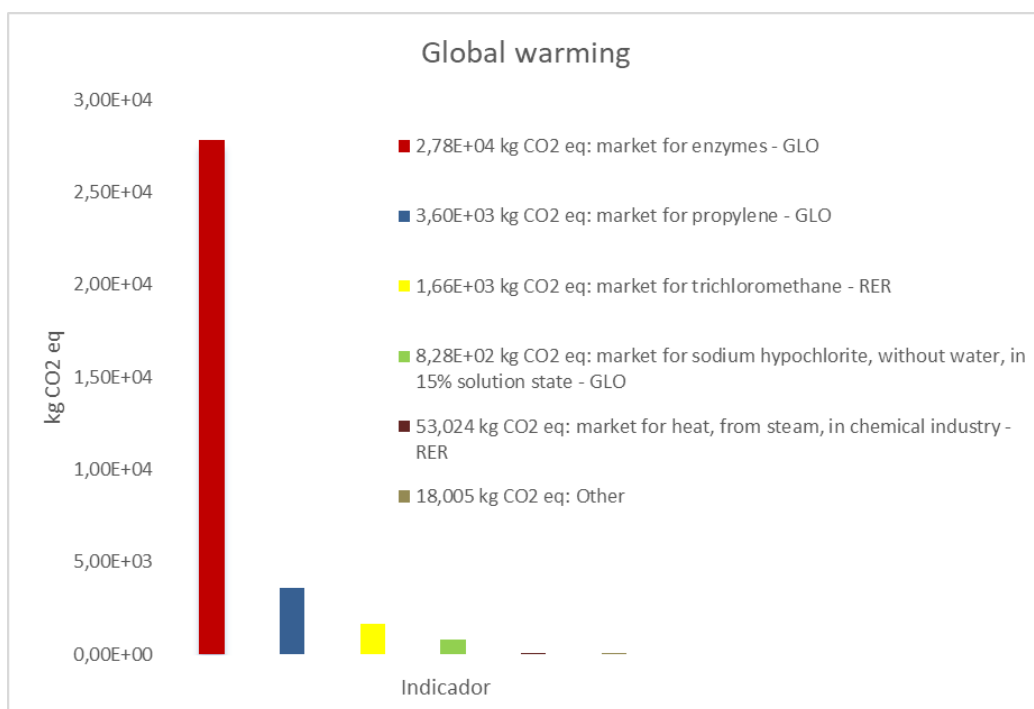


Figura 14. Global warming del proceso a partir de vinaza diluida al 7.5%.

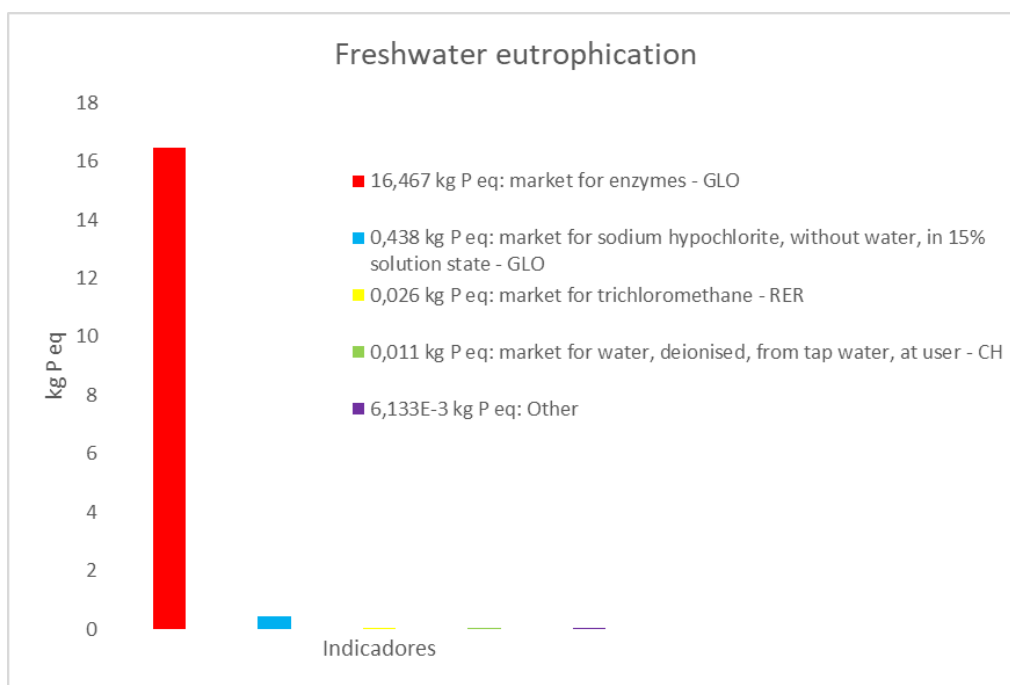


Figura 15. Freshwater eutrophication del proceso a partir de vinaza diluida al 7.5%.

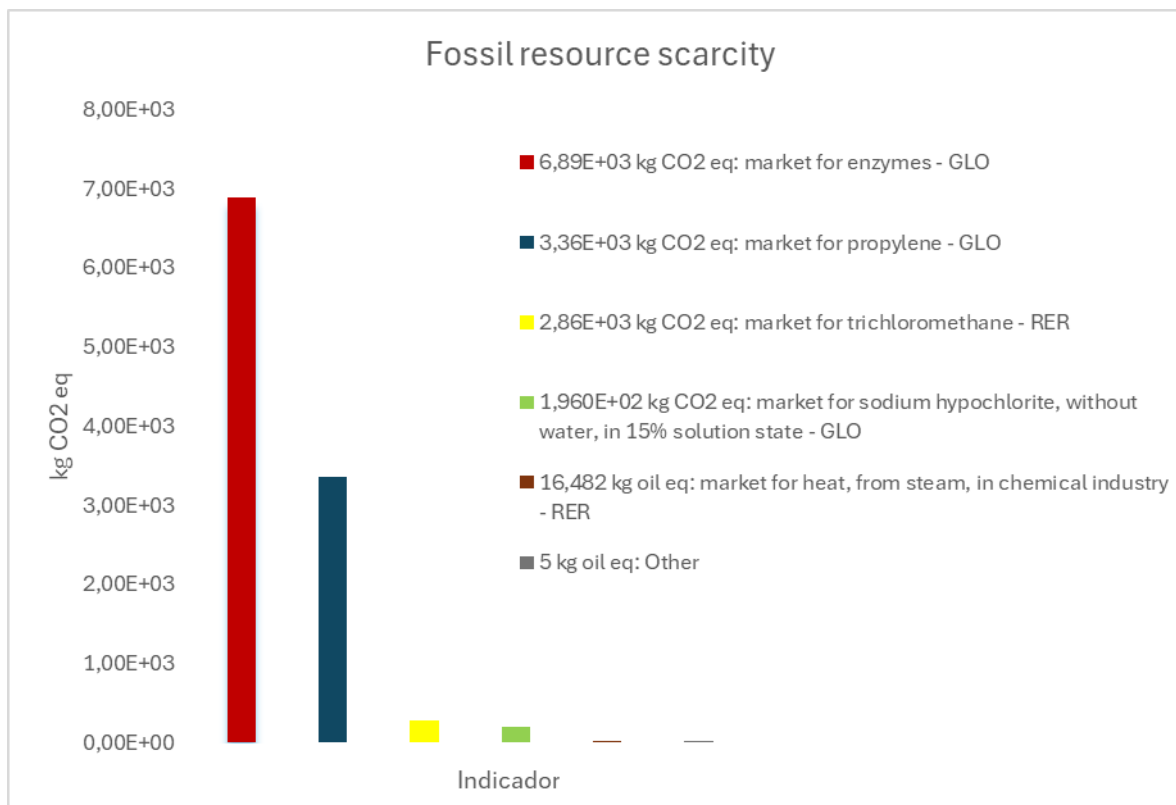


Figura 16. Fossil resource scarcity del proceso a partir de vinaza diluida al 7.5%.

Las Figuras 14, 15 y 16 presentan los resultados del análisis de ciclo de vida para las tres categorías de impacto seleccionadas: Global Warming Potential, Fossil Resource Scarcity, y Freshwater Eutrophication, evaluadas bajo el método ReCiPe MidPoint (H) 2016. En todos los escenarios, los principales contribuyentes a la carga ambiental son el insumo modelado como market for enzyme, seguido por el isopropanol (C_3H_8O), el cloroformo ($CHCl_3$) y el hipoclorito de sodio ($NaClO$).

El impacto asociado al “mercado de enzimas” se debe a su representación genérica en la base de datos Agribalise, la cual considera procesos industriales de síntesis enzimática intensivos en energía, uso de medios de cultivo y purificación [16]. Aunque en la operación real del proceso este insumo se adquiere de forma puntual (por lote o campaña), el modelo lo considera como una entrada proporcional al flujo de biomasa, lo que sobreestima su contribución recurrente. Esto resalta la necesidad de ajustar la representación de enzimas específicas en futuras simulaciones, especialmente si se trata de procesos con recirculación o uso prolongado de catalizadores biológicos [17].

En la categoría de eutrofización de agua dulce, las enzimas vuelven a figurar como el principal contribuyente, debido a las emisiones de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo) durante su producción industrial [18]. El hipoclorito de sodio y el cloroformo presentan impactos moderados, relacionados con sus rutas de síntesis y posibles emisiones al agua. Dado que estos compuestos se

emplean de manera continua durante la separación del PHB, su efecto puede acumularse si no se optimiza su recuperación o se sustituyen por alternativas de menor impacto ambiental.

En cuanto al potencial de calentamiento global, las enzimas generan nuevamente el mayor impacto, seguidas por el isopropanol y el cloroformo. Este resultado se vincula al uso de energía eléctrica y calor de origen fósil en las etapas de producción, especialmente en procesos de fermentación a escala industrial [19]. Un componente adicional es la energía térmica requerida para la destilación del cloroformo, cuya contribución, aunque menor, es significativa a lo largo del tiempo. Se recomienda evaluar la incorporación de fuentes renovables (biomasa, solar térmica, etc.) o mejoras en eficiencia energética para mitigar este impacto.

Finalmente se llevan los escenarios a una unidad funcional de 1 kg, esto debido a que cada proceso producía una cantidad diferente de PHB, para ello se emplea las tablas 9, 10 y 11 que se observa a continuación:

Tabla 9. Impacto por escenario para cada kg PHB por Global Warming Potential

Escenario	Impacto GWP (kg CO ₂ eq/lote)	PHB producido (kg)	Impacto por kg PHB
2.5 %	18610	47.56	391 kg CO ₂ /kg
5.0 %	22230	58.14	382 kg CO ₂ /kg
7.5 %	27840	90.25	308 kg CO ₂ /kg

Tabla 10. Impacto por escenario para cada kg PHB por Fossil Resource Sarcity

Escenario	Impacto FRS (kg oil eq/lote)	PHB producido (kg)	Impacto por kg PHB
2.5 %	4608	47.56	97 kg oil eq/kg
5.0 %	5504	58.14	95 kg oil eq /kg
7.5 %	6892	90.25	76 kg oil eq /kg

Tabla 11. Impacto por escenario para cada kg PHB por Freshwater eutrophication

Escenario	Impacto FE (kg P eq/lote)	PHB producido (kg)	Impacto por kg PHB
2.5 %	11	47.56	0.23 kg P /kg
5.0 %	13	58.14	0.22 kg P/kg
7.5 %	16	90.25	0.18 kg P/kg

Como era de esperarse y se logra identificar en las tres tablas de impactos ambientales, cuando se utiliza un 7.5 % de vinaza, los impactos disminuyen aproximadamente un 27 % en comparación con las composiciones de 5 % y 2.5 %, respectivamente. Al llevar todo a una unidad funcional, considerando la cantidad de PHB producido, se observa cómo se genera un menor impacto por kg de producto al utilizar el escenario de 7.5%.

En conjunto, estos resultados evidencian áreas prioritarias de mejora:

- Ajustar las bases de datos para representar de manera más precisa insumos específicos como enzimas técnicas.
- Evaluar alternativas sostenibles para solventes como el isopropanol, hipoclorito y cloroformo, o implementar esquemas de reciclaje más eficientes.
- Incorporar tecnologías energéticamente eficientes o fuentes renovables en las etapas de separación térmica.

Estos hallazgos sirven como punto de partida para futuros trabajos, orientados a optimizar el proceso desde una perspectiva ambiental, contribuyendo a que el PHB producido a partir de vinaza sea competitivo no solo en términos económicos, sino también de sostenibilidad.

3.3 Análisis económico preliminar

La planta fue diseñada para operar de forma continua durante 24 horas al día, 340 días al año, lo que equivale a aproximadamente 10 lotes de producción mensuales (de 72 horas por lote). El dimensionamiento de los equipos y la estimación preliminar de costos se realizaron a partir de los datos obtenidos mediante la simulación del proceso en Aspen Plus, proyectando las necesidades operativas a una escala conceptual de planta piloto.

El costo total de los equipos se estimó con base en dos metodologías principales:

1. **Equipos calculados con simulación:** Los valores correspondientes a la columna de platos y a las bombas centrífugas fueron obtenidos directamente del módulo económico del software de simulación de procesos.
2. **Equipos cotizados:** Para los demás equipos (biorreactores, tanques, mezcladores y centrífugas), se utilizaron cotizaciones reales proporcionadas por un proveedor internacional con sede en China. Estas cotizaciones se basaron en la fabricación con acero inoxidable tipo 304, seleccionado por su buena resistencia química, costo reducido y compatibilidad con los requerimientos sanitarios del proceso [20].

El precio base de los equipos fue ajustado considerando los siguientes factores:

- Arancel de importación del 19 % sobre el valor CIF (producto + envío).
- Impuesto al valor agregado (IVA) correspondiente al 19 % en Colombia.
- Tasa de cambio representativa de 4300 COP/USD, calculada como promedio anual para 2023 según reportes del Banco de la República [21].

La Tabla 12 muestra el listado de equipos junto con sus respectivas especificaciones y valores estimados en dólares (USD), mientras que la Tabla 13 presenta los costos de mano de obra anual y precios unitarios de los principales reactivos e insumos utilizados para la producción de PHB. Es

importante destacar que los salarios anuales se establecieron de acuerdo con valores promedio del sector industrial colombiano. Se incluyó el costo para ingenieros, operarios y supervisores, reflejando una configuración básica de personal para una planta piloto (debido a las diferencias que se pueden presentar a la hora de realizar el escalado industrial) en operación regular.

En cuanto a los insumos químicos, los precios unitarios fueron determinados a partir de bases de datos de comercio internacional y cotizaciones recientes, expresados en USD por kilogramo o litro según el caso.

Tabla 12. Listado de equipos y sus costos estimados.

Equipo	Especificación principal	Costo (USD)
R-101	Biorreactor batch* 5(6 m3)	\$ 419.655,60
R-102	Reactor autoclave	\$ 80.000,00
TK-101	Tanque de biorreactor* 2(5 m3)	\$ 139.885,20
TK-102	Tanque de cloroformo* 3(4 m3)	\$ 167.862,24
TK-103	Tanque de isopropil* 3(4 m3)	\$ 167.862,24
TK-104	Tanque de hipoclorito* 3(4 m3)	\$ 167.862,24
TK-105	Mixer* 2(10 m3)	\$ 279.770,40
V-101	Centrífuga 1* 2(1 m3)	\$ 27.977,04
V-102	Centrífuga 2* 2(1 m3)	\$ 13.988,52
C-101	Columna de platos	\$ 543.400,00
P-101	Bomba centrífuga	\$ 6.700,00
P-102	Bomba centrífuga	\$ 6.700,00
P-103	Bomba centrífuga	\$ 6.700,00
P-104	Bomba centrífuga	\$ 6.700,00

Tabla 13. Costos asociados a mano de obra y reactivos.

ITEM	COSTO	UNIDAD
SALARIO INGENIEROS	\$ 10.000.000,00	COP/mensual
SALARIO OPERARIOS	\$ 30.000.000,00	COP/mensual
SALARIO SUPERVISORES	\$ 9.000.000,00	COP/mensual
DEXTROSA	\$0.94	USD/kg
FOSFATO DE SODIO	\$1.51	USD/kg
FOSFATO MONOPOTÁSICO	\$4.69	USD/kg
SULFATO DE AMONIO	\$3.13	USD/kg
SULFATO DE MAGNESIO	\$11.47	USD/kg
CITRATO DE SODIO	\$3.13	USD/kg
SULFATO FERROSO	\$3.34	USD/kg
CLORURO DE CALCIO	\$0.19	USD/kg
CLOROFORMO	\$18.12	USD/kg
HIPOCLORITO DE SODIO	\$1.05	USD/kg
ISOPROPIL	\$9.27	USD/L
AGUA	\$0.0006	USD/L

Con los costos de los equipos, la mano de obra y los reactivos definidos, se procedió a realizar el cálculo de CAPEX y OPEX, así como la evaluación financiera, considerando las siguientes suposiciones:

1. **Horizonte de evaluación:** Se establece un periodo de análisis de 20 años, acorde con la vida útil estimada de los activos industriales involucrados.
2. **Ubicación de la planta:** La planta se proyecta junto a un ingenio azucarero en el Valle del Cauca, lo que permite aprovechar la vinaza como subproducto disponible localmente y reducir costos logísticos.
3. **Estructura de financiamiento:**
 - 80 % de la inversión inicial se financiará mediante un préstamo bancario con una tasa de interés del 35 % efectivo anual vencido, a un plazo de 20 años.
 - El 20 % restante será aportado por inversionistas, quienes esperan una rentabilidad mínima del 25 % anual, correspondiente a su tasa de oportunidad.
4. **Depreciación:** Se aplicará un esquema de depreciación lineal durante los 20 años del proyecto, conforme a las prácticas contables estándar para activos industriales.
5. **Ramp-up de producción:** Durante el primer año de operación, se alcanzará el 75 % de la capacidad instalada, considerando el periodo de puesta en marcha y ajustes operativos.
6. **Inflación y ajuste de precios:** Se proyecta un incremento anual del 5,20 % tanto en los costos de manufactura como en el precio de venta del PHB, basado en la inflación registrada en Colombia durante 2024 [23].
7. **Costos de personal:**
 - 2 ingenieros con un salario mensual de 5.000.000 COP.
 - 15 operarios con un salario mensual de 2.000.000 COP.
 - 3 supervisores con un salario mensual de 3.000.000 COP.
8. **Precio de venta del PHB:** Se establece en 408 USD/kg, considerando los precios de mercado actuales para polímeros de alta pureza.
9. **Costo de electricidad:** Se fija en 0,208 USD/kWh, según el promedio para usuarios industriales en Colombia en septiembre de 2024.
10. **Mantenimiento anual:** Se estima en un 5 % del valor de la inversión fija de capital (FCI), conforme a las recomendaciones del documento consultado [22].

El CAPEX se refiere a las inversiones en activos fijos o mejoras de capital que proporcionan

beneficios a largo plazo, como la adquisición de maquinaria, construcción de instalaciones o desarrollo de infraestructura tecnológica. Estas inversiones se capitalizan en el balance general y su costo se distribuye a lo largo de la vida útil del activo mediante procesos contables como la depreciación. Por otro lado, el OPEX engloba los gastos operativos recurrentes necesarios para el funcionamiento diario de la empresa, tales como salarios, alquileres, servicios públicos y mantenimiento. El proyecto cuenta con un CAPEX de 2.035.064 USD (Coste de los equipos) y un OPEX anual de 2.824.253 USD (el cual incluye insumos químicos, solventes estimados por 120 lotes/año y mano de obra).

El análisis se estructuró en varias etapas. Inicialmente, se evaluó el proyecto utilizando todas las proporciones de vinaza, lo que permitió identificar el mejor resultado. A partir de este resultado óptimo, se realizó el cálculo del gross margin para establecer un precio de venta adecuado para el producto. Finalmente, se diseñaron tres escenarios –pesimista, base y optimista– y se variaron dos aspectos clave del proceso, el precio de los insumos y el precio de venta del PHB, con el fin de analizar cómo estos cambios afectarían la viabilidad económica del proyecto. Por último, se incluyó un análisis adicional que contempla la cotización de los reactivos en grado laboratorio, con el fin de recalcular la curva de VPN (Para un biopolímero de menor calidad) y determinar hasta qué punto llega el precio mínimo de venta del PHB. Asimismo, se desarrolló un análisis de sensibilidad respecto al rendimiento de producción del biopolímero, lo que permite identificar el umbral mínimo de eficiencia necesario para que el proyecto mantenga su viabilidad económica con respecto a la dextrosa alimentada.

3.4 Análisis Económico

Se realizaron simulaciones para tres escenarios operativos, utilizando vinaza diluida en proporciones de 2,5 %, 5,0 % y 7,5 % v/v, con el fin de evaluar el impacto de la concentración del sustrato sobre la producción de PHB y la rentabilidad del proyecto. Cada escenario se caracteriza por un rendimiento diferente en la conversión de vinaza a biopolímero, lo que a su vez afecta el volumen de producción, los ingresos anuales y la recuperación de la inversión.

Para cuantificar la viabilidad económica de cada configuración, se construyó un diagrama de flujo de caja descontado (Figura 17), el cual muestra el comportamiento del Valor Presente Neto (VPN) acumulado a lo largo de un horizonte de evaluación de 20 años, aplicando una tasa de descuento efectiva acorde con la estructura de financiación planteada. Se calcula un valor de WACC de 23,2% el cual se utilizará para comparar la TIR de cada escenario, un valor menor al WACC indica una inviabilidad económica.

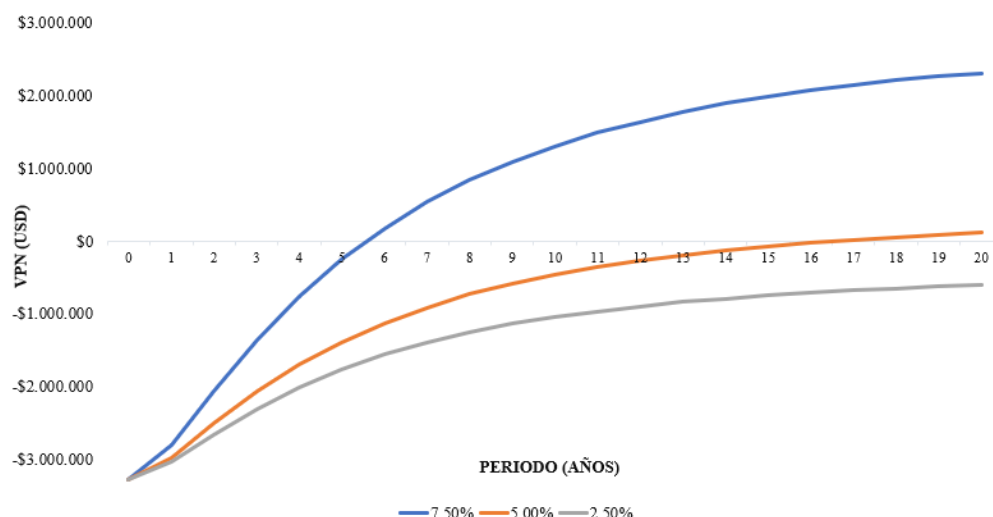


Figura 17. Diagrama de flujo de caja descontado variando las proporciones de vinaza.

El análisis demuestra que el escenario con 7,5 % de vinaza es el más favorable desde el punto de vista financiero. En este caso, la producción de PHB alcanza su máximo, lo que se traduce en mayores ingresos netos, una recuperación de la inversión en aproximadamente 5 años, TIR de 35,7% y un VPN sustancialmente más alto que en los otros dos escenarios. Además, esta configuración ofrece una mayor capacidad de absorción frente a variaciones en el precio de insumos o del producto final, lo que mejora la robustez financiera del proyecto.

Por el contrario, el escenario con vinaza al 5 % logra el punto de equilibrio únicamente hacia el año 15, con un TIR de 23,86%, mientras que el caso con 2,5 % no alcanza a recuperar la inversión dentro del periodo evaluado, y un TIR de 19,3%, indicando una viabilidad económica limitada.

En conjunto, los resultados validan que operar con una concentración de vinaza al 7,5 % no solo optimiza la productividad y el aprovechamiento del residuo agroindustrial, sino que además constituye la estrategia más sólida y rentable a largo plazo, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

3.4.1 Análisis de sensibilidad al margen bruto

Dado que este escenario fue identificado como óptimo, el siguiente paso en el análisis consistió en realizar un estudio de sensibilidad sobre el margen bruto, con el objetivo de determinar el precio mínimo viable de venta del PHB que garantice la rentabilidad deseada. El resultado de esta evaluación se presenta en la figura 19.

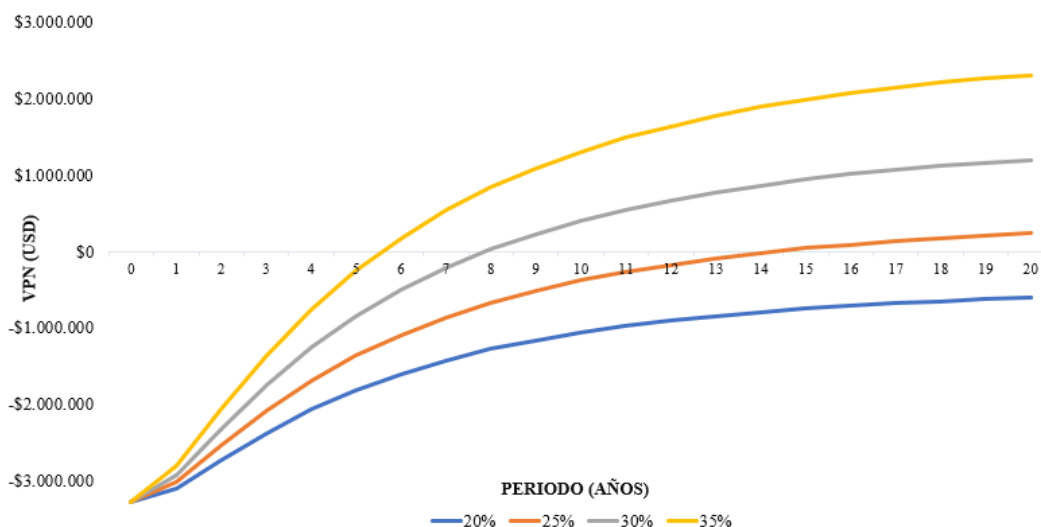


Figura 18. Diagrama de flujo de caja descontado variando el margen bruto.

La Figura 18 presenta el comportamiento del Valor Presente Neto (VPN) del proyecto bajo diferentes márgenes brutos estimados (20 %, 25 %, 30 % y 35%). El análisis permite evaluar el impacto de la rentabilidad operativa sobre la viabilidad financiera del proceso en un horizonte de 20 años.

Se observa que la curva correspondiente al 35 % de margen bruto presenta la mayor pendiente positiva y alcanza el VPN más alto al final del periodo evaluado. Esto implica que, con un margen operativo de ese nivel, el proyecto genera flujos de caja más robustos, acelera la recuperación de la inversión (Payback cercano a los 5 años) y disminuye la exposición al riesgo financiero. Asimismo, un margen elevado permite absorber mejor posibles variaciones en los precios de insumos o ventas, al incorporar un colchón de rentabilidad que incrementa la resiliencia del modelo de negocio.

En contraste, márgenes inferiores (20 % y 25 %) muestran curvas menos pronunciadas y valores acumulados de VPN considerablemente menores, lo que indica menor rentabilidad y mayor dependencia de condiciones externas para mantener la viabilidad del proyecto. Con base en este análisis, se definió que un margen bruto del 35 % constituye el punto de referencia más favorable, permitiendo fijar el precio de venta del PHB en 408 USD/kg, en línea con los valores altos del mercado actual para biopolímeros de alta pureza [24].

A partir del margen bruto óptimo identificado, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad basado en tres escenarios de mercado: pesimista, base y optimista. Esta evaluación tiene como objetivo anticipar variaciones en factores críticos y determinar la robustez económica del proyecto ante condiciones fluctuantes.

- **Escenario pesimista:**

Precio de venta de PHB: 367,2 USD/kg (−10 %)

Costos de insumos: +10 %

Costo de energía: +10 %

- **Escenario base:**

Precio de venta: 408 USD/kg

Costos de insumos y energía: condiciones actuales

- **Escenario optimista:**

Precio de venta: 448,8 USD/kg (+10 %)

Costos de insumos: -10 %

Costo de energía: -10 %

3.4.2 Análisis de escenarios: evaluación integral de la rentabilidad

Este enfoque de simulación permite identificar los factores más sensibles que afectan la rentabilidad, evaluar riesgos potenciales, y definir estrategias de mitigación para escenarios adversos. Además, proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas, especialmente en fases de escalado industrial y negociación con posibles inversionistas. Los resultados financieros de estos tres escenarios se presentan a continuación.

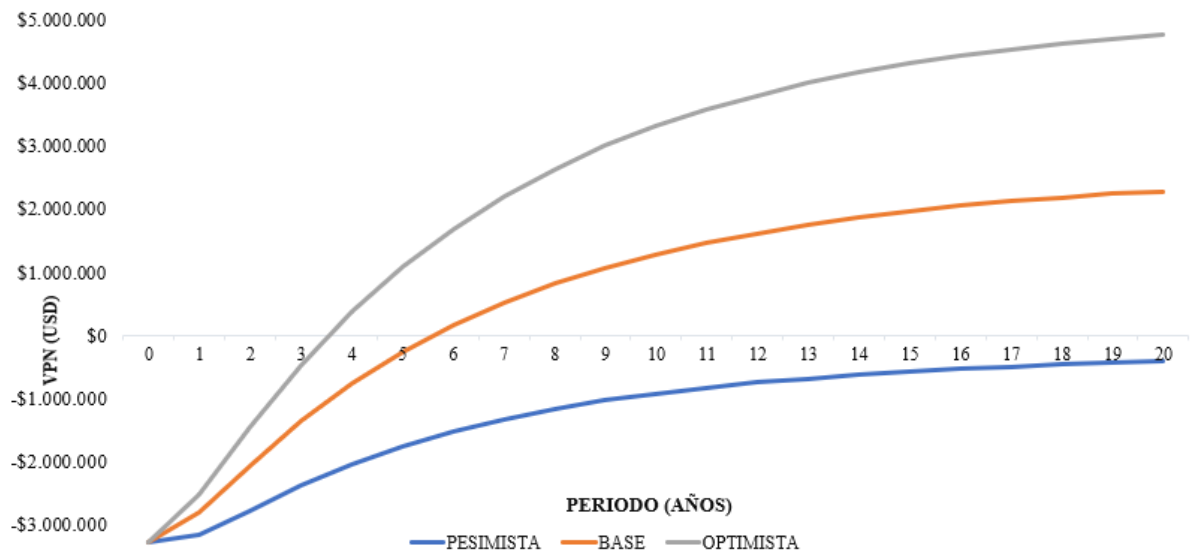


Figura 19. Diagrama de flujo de caja descontado en posibles escenarios.

La Figura 19 muestra las proyecciones del Valor Presente Neto (VPN) bajo tres escenarios de mercado —pesimista, base y optimista— para evaluar la robustez económica del proceso de

producción de PHB a partir de vinaza.

El escenario optimista presenta el mejor desempeño financiero, con una recuperación de la inversión en el tercer año y un VPN acumulado cercano a los 5 millones de USD al final del horizonte evaluado (20 años). Este comportamiento refleja un entorno con condiciones favorables: mayores precios de venta y menores costos operativos, lo cual impulsa la rentabilidad y permite una estrategia más agresiva de reinversión de capital y expansión de capacidad productiva.

En el escenario base, que representa las condiciones actuales de mercado sin variaciones significativas, la inversión se recupera alrededor del quinto año, con un VPN de aproximadamente 2 millones de USD. Este resultado confirma que, bajo parámetros conservadores, el proyecto es económicamente viable, aunque con márgenes y retornos más moderados respecto al escenario optimista.

Por el contrario, el escenario pesimista revela una situación crítica. Con una caída del 10 % en el precio de venta y un aumento del 10 % en costos de insumos y energía, el proyecto no logra recuperar la inversión dentro de los 20 años, y el VPN se mantiene en valores negativos. Este resultado pone de manifiesto la vulnerabilidad financiera del proceso ante condiciones desfavorables y subraya la necesidad de garantizar estabilidad en los precios de insumos clave y asegurar un posicionamiento competitivo del PHB en el mercado.

A partir de los resultados anteriores, se identificaron dos variables críticas con mayor impacto sobre la rentabilidad: el precio de venta del PHB y el costo de los insumos. Se procedió a realizar un análisis de sensibilidad univariado, en el cual se modificó una variable a la vez, manteniendo constante el resto del sistema. Para el precio de venta, se evaluó una reducción del 15 % y un incremento del 10 % respecto al valor base de 408 USD/kg. En cuanto a los insumos, se modeló una sobreestimación del 25 % y una subestimación del 25%.

3.4.3 Análisis de sensibilidad: impacto del precio de insumos y del PHB en la rentabilidad

Estas simulaciones permiten comprender el efecto directo de fluctuaciones del mercado y los costos productivos sobre la viabilidad económica. Los resultados obtenidos se visualizan a continuación, en dos gráficos comparativos que muestran el comportamiento del VPN bajo variación aislada de cada parámetro.

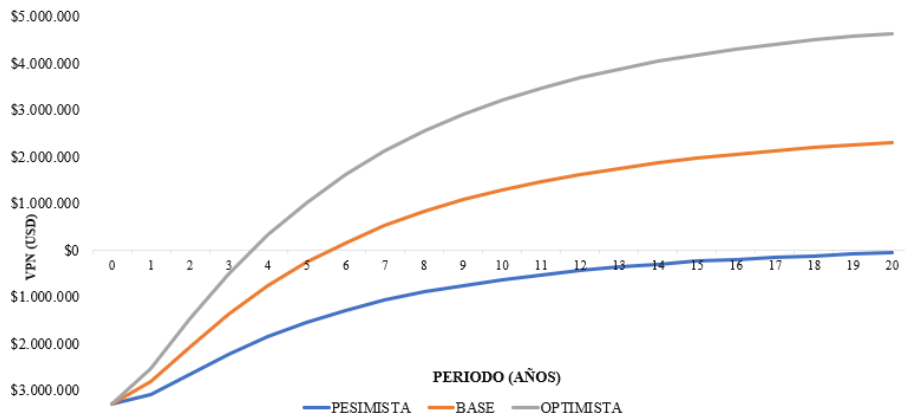


Figura 20. Diagrama de flujo de caja variando el precio de los insumos.

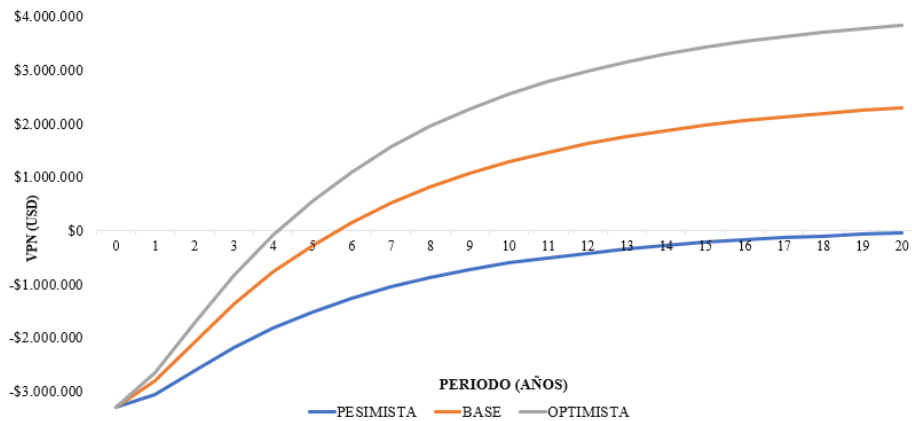


Figura 21. Diagrama de flujo de caja variando el precio del PHB.

El análisis de sensibilidad univariado presentado en las Figuras 20 y 21 permite identificar con claridad el efecto que tienen las variaciones en el precio de los insumos y en el precio de venta del PHB sobre la viabilidad económica del proyecto. Ambos factores son relevantes y afectan directamente el comportamiento del Valor Presente Neto (VPN) y el tiempo de recuperación de la inversión. Sin embargo, su impacto no es equivalente.

En el caso del precio de los insumos (Figura 20), se observa que un incremento del 25 % en los costos reduce de forma significativa el VPN y retrasa la recuperación de la inversión, aunque el proyecto logra mantenerse rentable en los escenarios base y optimista. Estos resultados indican que el sistema tiene capacidad de absorber incrementos moderados en los costos de insumos, gracias a eficiencias internas y recirculación de materiales, sin comprometer la rentabilidad general del proyecto.

Dado que este estudio se basa en simulación y no incluye una caracterización experimental del PHB obtenido, se asumió que el biopolímero producido cumple con los parámetros de calidad típicos reportados en la literatura para PHB de alta pureza. Entre estos se incluyen una pureza

superior al 90 %, peso molecular medio de 500–1000 kDa, cristalinidad cercana al 70 %, y propiedades mecánicas similares al polipropileno. Esta suposición permite establecer un precio de venta de 408 USD/kg. Para una validación completa del modelo económico, será necesario realizar ensayos de caracterización del PHB obtenido a escala piloto.

Por otro lado, la variación en el precio de venta del PHB (Figura 21) tiene un impacto mucho más marcado. En el escenario pesimista, una reducción del 15 % respecto al valor base (408 USD/kg) impide totalmente la recuperación de la inversión en los 20 años proyectados. El flujo de caja se mantiene negativo durante todo el horizonte, lo cual evidencia una alta sensibilidad del modelo financiero a los ingresos por unidad vendida. Esto se debe a que el precio del producto afecta directamente la generación de ingresos brutos, mientras que los insumos impactan el costo de producción, permitiendo aún cierto margen de maniobra en el control de gastos.

Desde una perspectiva de ingeniería económica, se concluye que el precio de venta del PHB es la variable más crítica en la rentabilidad del proyecto. La sostenibilidad financiera depende en gran medida de asegurar una posición competitiva del producto en el mercado, con un precio que no solo cubra los costos operativos, sino que también garantice un retorno atractivo sobre la inversión. Los indicadores financieros calculados permiten establecer con claridad la viabilidad económica del proyecto de producción de PHB a partir de vinaza. En particular, se evaluaron el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para los tres escenarios considerados: pesimista, base y optimista.

Los resultados se resumen en la tabla 14:

Tabla 14. Resultados de los escenarios evaluados

Escenario	VPN (USD)	TIR (%)	Payback (años)
Pesimista	-409.376,51	21,9	No recupera
Base	2.289.411	35,7	5
Optimista	4.781.128	48,30	3

El escenario optimista evidencia una excelente rentabilidad: el proyecto alcanza un VPN de casi 5 millones de USD, una TIR superior al 48%, y un periodo de recuperación alrededor de 3 años. Esto demuestra que, bajo condiciones de mercado favorables (alta demanda de PHB, reducción de costos de insumos y energía), el proceso no solo es viable, sino también altamente atractivo desde el punto de vista financiero e inversionista.

En el escenario base, correspondiente a las condiciones actuales de precios y costos, el proyecto mantiene una TIR del 35,7 %, ligeramente inferior al costo de capital ponderado estimado (aproximadamente 23,2 %). Si bien el VPN es positivo (2 millones USD aprox) y se recupera la inversión en el quinto año, el margen de rentabilidad es moderado, lo que sugiere que se requieren medidas de control de costos o mejoras tecnológicas para fortalecer la competitividad del modelo.

Finalmente, en el escenario pesimista, la TIR cae por debajo del umbral mínimo de aceptación

(incluso es negativa), y el VPN permanece negativo durante los 20 años analizados. La inversión no se recupera en el horizonte de evaluación, lo cual revela una condición de inviabilidad económica bajo entornos adversos, tales como una caída significativa del precio del PHB o aumentos sustanciales en los costos operativos. Esto subraya la necesidad de diseñar estrategias de mitigación de riesgo —por ejemplo, contratos de precio fijo, diversificación de productos o sustitución de insumos críticos—.

El análisis conjunto de estos indicadores revela que el proyecto es viable y rentable siempre que se mantengan márgenes adecuados entre precio de venta y costos operativos, y que el volumen de producción se mantenga cerca de su capacidad de diseño. Además, la TIR es especialmente sensible al precio de venta del PHB, como se corroboró en el análisis de sensibilidad.

3.4.4 Análisis de sensibilidad: impacto del rendimiento de producción de PHB en la viabilidad

Adicionalmente, se examinó la influencia del rendimiento de conversión de sustrato en la viabilidad económica del proceso. En la literatura se reportan valores de acumulación de PHB en biomasa seca en rangos de 70–80 % en cultivos bien adaptados [27, 28]. En contraste, en el presente trabajo se obtuvo una acumulación del 51 % de PHB con respecto al peso seco de la biomasa, lo cual representa un valor inferior a los reportados en estudios previos. A partir de este resultado se planteó un análisis de sensibilidad en el cual la acumulación se varió en un rango de 40-80%, con el fin de identificar el efecto directo sobre el VPN y el precio mínimo de venta del PHB. Este estudio permite determinar el umbral de eficiencia requerido para que el proceso planteado pueda acercarse a las condiciones de referencia en la literatura y resalta la necesidad de optimizar la acumulación de PHB en la etapa fermentativa.

Tabla 13. Producción anual de PHB estimada en función del rendimiento de acumulación.

ACUMULACIÓN	PRODUCCION PHB (kg/año)	TIR (%)
40%	8497	28,8
51% (C. <i>Necator</i>-Vinaza)	10834	35,7
60%	12746	41,1
70%	14870	46,8
80%	16995	52,3

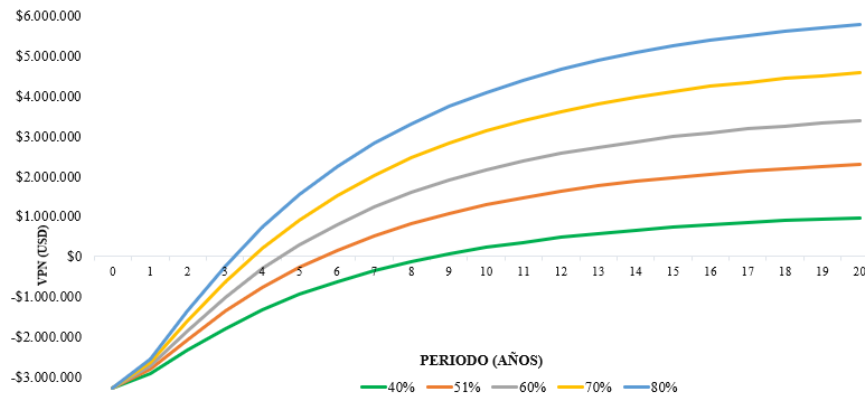


Figura 22. Variación del VPN en función del rendimiento de acumulación de PHB.

Los resultados del análisis de sensibilidad respecto a la acumulación de PHB evidencian una relación directa entre la acumulación del biopolímero, la producción anual y la rentabilidad del proyecto. Con una acumulación del 40 %, la producción se reduce a 8.497 kg/año y la TIR cae a 28,8 %, valor que se encuentra en el límite de viabilidad para proyectos de bioprocesos a gran escala. El escenario base, correspondiente al 51 % de acumulación obtenido experimentalmente con la cepa *Cupriavidus necator* y vinaza como sustrato, arroja una producción de 10.834 kg/año y una TIR de 35,7 %, lo cual resulta atractivo, aunque aún por debajo de los valores reportados en la literatura. Al incrementar la acumulación a 60–70 %, la TIR se eleva a 41,1–46,8 % y el VPN alcanza valores positivos de manera más temprana en el horizonte de evaluación, lo que refleja un proceso más robusto y competitivo. Finalmente, el escenario de 80 % de acumulación, consistente con reportes de cultivos optimizados en la literatura, permite alcanzar 16.995 kg/año de PHB y una TIR del 52,3 %, consolidando al proyecto como altamente rentable. En conjunto, estos resultados confirman que el aumento en la acumulación de PHB constituye una de las variables críticas para garantizar la competitividad del proceso.

3.4.5 Análisis económico: comparación de insumos grado laboratorio vs. grado industrial

En esta etapa se evaluó el efecto del costo de los insumos sobre la viabilidad económica del proceso, considerando dos escenarios de cotización: precios de grado industrial y precios de grado laboratorio. El primer caso representa la producción de un biopolímero de menor pureza, orientado a aplicaciones generales y con el beneficio de un costo de producción más bajo gracias a la recirculación más efectiva de reactivos. El segundo caso, correspondiente a los reactivos de grado laboratorio, refleja un escenario de alta pureza, en el cual se incrementa significativamente el costo de producción, pero que permite proyectar la entrada del PHB a un nicho de mercado especializado con mayor valor agregado. Para cada escenario se recalcularon los costos de operación (OPEX) y se estimó el costo unitario de producción del PHB. Los resultados se resumen en una tabla comparativa que contrasta los escenarios propuestos, grado industrial y grado laboratorio, esto con el fin de visualizar las diferencias en términos de costos de insumos y OPEX unitario.

Tabla 13. Costos asociados a mano de obra y reactivos grado industrial.

ITEM	COSTO	UNIDAD
SALARIO INGENIEROS	\$ 10.000.000,00	COP/mensual
SALARIO OPERARIOS	\$ 30.000.000,00	COP/mensual
SALARIO SUPERVISORES	\$ 9.000.000,00	COP/mensual
DEXTROSA	\$0.50	USD/kg
FOSFATO DE SODIO	\$1.51	USD/kg
FOSFATO MONOPOTÁSICO	\$4.69	USD/kg
SULFATO DE AMONIO	\$3.13	USD/kg
SULFATO DE MAGNESIO	\$11.47	USD/kg
CITRATO DE SODIO	\$3.13	USD/kg
SULFATO FERROSO	\$3.34	USD/kg
CLORURO DE CALCIO	\$0.19	USD/kg
CLOROFORMO	\$1.9	USD/kg
HIPOCLORITO DE SODIO	\$0.357	USD/kg
ISOPROPIL	\$1.054	USD/L
AGUA	\$0.006	USD/L

Tabla 14. Comparación del OPEX utilizando reactivos grado analítico vs industrial.

Reactivos	OPEX unitario 7.5% (USD/kg)	OPEX unitario 5% (USD/kg)	OPEX unitario 2.5% (USD/kg)	OPEX (USD/Anual)
Analítico	\$ 257.38	\$ 399.44	\$ 488.27	\$ 2.824.253
Industrial	\$ 25.40	\$ 39.42	\$ 48.19	\$ 275.205

Se observa que el uso de reactivos grado analítico conduce a costos de producción extremadamente altos, con un OPEX unitario superior a 250 USD/kg incluso en la mejor condición (7,5 % vinaza). En contraste, al emplear reactivos de grado industrial, el OPEX unitario disminuye en más del 90 %, alcanzando valores de 25–48 USD/kg según la composición de vinaza. Esta reducción refleja la diferencia esperada entre precios de laboratorio y precios de escala industrial, y evidencia que únicamente el escenario industrial resulta viable en términos de competitividad. Cabe resaltar que, si estos costos se acompañan de un incremento en los rendimientos fermentativos del PHB, el proceso podría aproximarse a los rangos reportados en la literatura para el mercado (7–15 USD/kg), lo cual abre la posibilidad de competir en aplicaciones comerciales de biopolímeros.

CONCLUSIONES

Viabilidad técnica y análisis integral de escenarios

La simulación del proceso en Aspen Plus demostró que la producción de poli(3-hidroxibutirato) (PHB) a partir de vinaza es factible, siempre que se emplee una concentración de vinaza del 7,5 % v/v, la cual maximiza el rendimiento de biopolímero (1,25 kg/h) y minimiza el costo unitario de producción. Este escenario alcanzó la recuperación de la inversión en 5 años, un VPN positivo cercano a 2 millones USD y una TIR de 35,7 %, superando al escenario del 5 % (recuperación en 15 años, VPN marginal) y al del 2,5 % (inviable). No obstante, el rendimiento de

acumulación de PHB considerado (51 %) se encuentra por debajo de lo reportado en la literatura (70–80 %). El análisis de sensibilidad evidenció que un incremento en este parámetro tendría un efecto decisivo en la viabilidad: a 80 % de acumulación, la producción anual se elevaría a 16.995 kg y la TIR superaría el 52 %, consolidando al proceso como altamente competitivo.

Sostenibilidad ambiental

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) identificó que la producción de enzimas contribuye de forma dominante a las categorías de Global Warming, Fossil Resource Scarcity y Freshwater Eutrophication. No obstante, la recirculación de reactivos (cloroformo, isopropanol, hipoclorito) propuesta en el diseño contribuye a disminuir el consumo de solventes y a alinear el proceso con principios de economía circular, aunque se requiere una cuantificación futura del beneficio obtenido. Se recomienda optimizar la selección de biocatalizadores y explorar fuentes de energías renovables en etapas térmicas para mitigar aún más la huella de carbono.

Eficiencia económica operacional

El análisis económico mostró que el OPEX unitario disminuyó de 488,27 USD/kg (2,5 %) y 399,44 USD/kg (5 %) hasta 257,38 USD/kg en el escenario 7,5 %, confirmando que a bajas concentraciones de vinaza el efecto dilución incrementa significativamente los costos. Al comparar insumos de grado laboratorio frente a grado industrial, se evidenció una reducción superior al 80 % en el OPEX unitario, lo que acerca los costos de producción al rango reportado de mercado (7–15 USD/kg de PHB). Esto sugiere la posibilidad de orientar el proceso hacia dos nichos diferenciados: un producto de alta pureza, con mayores costos pero de valor agregado, y otro de menor pureza, más competitivo en términos de volumen y precio.

Recomendaciones para trabajos futuros

Validación experimental a escala piloto, para ajustar los modelos estequiométricos y cinéticos y verificar la estabilidad microbiológica en biorreactores de mayor volumen.

Optimización de pretratamientos de vinaza, evaluando variables de pH, temperatura y dilución, así como estrategias de detoxificación de compuestos inhibitorios.

Profundizar en estrategias de mejora genética y de operación de *Cupriavidus necator* u otras cepas, con el fin de incrementar la acumulación de PHB hacia valores cercanos al 70–80 %.

Análisis de incertidumbre mediante simulaciones Monte Carlo y evaluaciones de riesgo, incorporando fluctuaciones de precios de insumos, tasas de cambio y demanda de mercado.

Desarrollo de rutas alternativas de extracción que reduzcan aún más la dependencia de solventes petroquímicos y evalúen técnicas de separación de membranas avanzadas.

Comparar de forma experimental la producción con insumos de grado laboratorio e industrial, para determinar la pureza real alcanzable del polímero y el costo efectivo de producción en cada caso.

REFERENCIAS

1. Dorado, I., Pineda, L., Ascencio-Galván, M. L., López-Agudelo, V. A., Caicedo, J. C., Gómez-Ríos, D., & Ramírez-Malule, H. (2024). Valorization of dextrose from cassava starch and sugarcane vinasse as polyhydroxyalkanoates by submerged cultures of *Cupriavidus necator*: A physicochemical–biotechnological approach. *ChemEngineering*, 8(4), 73. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8040073>
2. Ospina León, L. J., Manotas-Duque, D., & Ramírez-Malule, H. (2023). Desafíos y oportunidades de la vinaza de caña de azúcar: Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), 93–100. <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.12009>
3. Stublić, K., Ranilović, J., Ocelić Bulatović, V., & Kučić Grgić, D. (2024). Advancing Sustainability: Utilizing Bacterial Polyhydroxyalkanoate for Food Packaging. *Processes*, 12(9), 1886. <https://doi.org/10.3390/pr12091886>
4. Chico, M., & Sampedro, T. (2022). Producción de bioplásticos y sus aplicaciones como empaque de alimentos: PLA y PHB. *Revista Alimentos, Ciencia e Ingeniería*, 29(2), 31–38. <https://revistas.uta.edu.ec/erevista/index.php/aci/article/view/1858/2271>
5. Alancay Rojas, N. D., Domínguez, F. G., & Pajot, H. F. (2023). Estudio de la vinaza para su empleo como medio de cultivo para la producción de inoculante agrícola. En *Compendio de resúmenes de las 30va Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Asociación de Universidades del Grupo Montevideo - Universidad Nacional de Asunción* (p. 34). Asociación de Universidades del Grupo Montevideo. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/235767>
6. Dalsasso, R. R., Pavan, F. A., Bordignon, S., Aragão, G. M. F., & Kalil, S. J. (2019). Polyhydroxybutyrate (PHB) production by *Cupriavidus necator* from sugarcane vinasse and molasses as mixed substrate. *Process Biochemistry*, 85, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.07.007>
7. Trapé, D. V., Ramos, F. D., López, O. V., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2023). Sustainable biopolymers production using a bioethanol residue as raw material. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(2), 804–811. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02639-3>
8. Christofoletti, C. A., Pedro-Escher, J., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
9. Moreno Sarmiento, N., Malagón Romero, D., Cortázar, J., & Espinosa Hernández, A. (2006). Recuperación de poli-b-hidroxialcanoato sintetizado por *Pseudomonas putida* mediante el uso de dispersiones hipoclorito-cloroformo. *Universitas Scientiarum*, 11(1), 41–48.
10. Narayanan, M., et al. (2020). Revisiting the Single Cell Protein Application of *Cupriavidus necator* H16 and Recovering Bioplastic Granules Simultaneously. PMC.
11. Wesner, D. A. (2016). Advanced Treatment Reuse. CA-NV AWWA.

12. Ramírez, M. (2014). Producción de polihidroxibutirato a partir de residuos agroindustriales. Academia.edu.
13. Huijbregts, M. A. J., et al. (2017). ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
14. ISO 14040. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization.
15. Christoforetti, C. A., et al. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
16. Huijbregts, M. A. J., et al. (2017). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
17. Sala, S., Benini, L., Castellani, V., & Pant, R. (2017). *Environmental footprint: Assessment of methods for industry and policy makers*. European Commission JRC Science for Policy Report.
18. Christoforetti, C. A., Pedro-Escher, J., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
19. Xu, J., & Guo, B. H. (2010). Microbial production of polyhydroxyalkanoates: From synthesis to applications. *Chemical Society Reviews*, 39(11), 3358–3370. <https://doi.org/10.1039/B903499K>
20. Towler, G., & Sinnott, R. (2022). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (3rd ed.). Elsevier.
21. Banco de la República de Colombia. (2023). Tasa Representativa del Mercado – Histórico. Recuperado de: <https://suameca.banrep.gov.co/graficador-series/#/grafica/1>
22. Turton, R., et al. (2018). Analysis, synthesis, and design of chemical processes, 5th Edition. Pearson. Chapter 8. 194-198
23. Gerencie.com. (2022, octubre 31). *IPC histórico*. Recuperado de <https://www.gerencie.com/ipc-historico.html>
24. Merck (Sigma-Aldrich). (2024). *Poly(3-hydroxybutyric acid) – Product search results*. Recuperado de [https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/search/poly\(3-hydroxybutyric-acid\)?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=Poly%283-hydroxybutyric%20acid%29&type=product](https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/search/poly(3-hydroxybutyric-acid)?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=Poly%283-hydroxybutyric%20acid%29&type=product)
25. Cameron, C. A., & Muñoz, R. S. (1998). *Process for producing isopropanol and diisopropyl ether by hydration of propylene* (U.S. Patent No. 5,808,161). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US5808161A/en>

26. Chen, Q.-B., Zhao, Y.-Y., Shi, W.-W., Ma, J.-X., & Wang, Y.-N. (2022). Near-zero liquid discharge and reclamation process based on electrodialysis metathesis for high-salinity wastewater with high scaling potential. *Desalination*, 525, 115390. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916421004616?via%3Dihub>
27. Latha, D., Sandya, S., Shahina, S., & Rekha, R. (2013). Biopolymer production using *Pseudomonas* sp. (MTCC) and its application in agriculture. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 3(3), 293–303. <https://doi.org/10.3923/ajbmb.2013.293.303>
28. Yu, J. (2007). *Pseudomonas oleovorans* – an overview. In *ScienceDirect Topics*. Elsevier. Retrieved March 30, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/pseudomonas-oleovorans>