

ECONOMÍA CIRCULAR EN LA PRÁCTICA: ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE COCINA USADO

CIRCULAR ECONOMY IN PRACTICE: COST ANALYSIS OF BIODIESEL PRODUCTION FROM USED COOKING OIL

Yesica Ramirez Flores ¹; Raquel Guidetti Vendruscolo ²; Cicero Urbanetto Nogueira ³;
Roger Wagner ⁴; Sérgio Luiz Jahn ⁵; Antonio Luiz Fantinel ⁶

RESUMEN

El uso de aceite de cocina usado como materia prima para biodiesel sigue los principios de la economía circular, al reducir costos y aumentar la eficiencia de la producción, aprovechando residuos y disminuyendo la dependencia de aceites vírgenes. Este estudio analiza los costos de producción de biodiesel utilizando la metodología de Custeo Basado en Actividades (ABC), con tres procesos de transesterificación alcalina realizados en una biorrefinería a pequeña escala. La viabilidad económica y financiera de la biorrefinería, con una capacidad de 540 toneladas por año en Santa María, se evaluó utilizando indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el payback descontado. El costo de producción fue de US \$ 0,25 por litro, con la transesterificación representando el 60% de los costos. El aceite de cocina usado representó solo el 21% del costo total. El análisis indicó viabilidad económica para cooperativas y empresas del sector energético, ofreciendo una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de desperdicios y al uso de recursos no alimentarios.

Palabras clave: Análisis de costos. Biocombustibles. Energía. Medio ambiente.

ABSTRACT

The use of used cooking oil as a raw material for biodiesel follows the principles of circular economy by reducing costs and increasing production efficiency, utilizing waste and decreasing the reliance on virgin oils. This study analyzes the production costs of biodiesel using the Activity-Based Costing (ABC) methodology, with three alkaline transesterification processes conducted in a small-scale biorefinery. The economic and financial viability of the biorefinery, with a capacity of 540 tons per year in Santa Maria, was assessed using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and discounted payback. The production cost was US\$ 0.25 per liter, with transesterification accounting for 60% of the costs. Used cooking oil represented only 21% of the total production cost. The analysis indicated economic viability for cooperatives and companies in the energy sector, offering a

¹ Tecnóloga em Geoprocessamento, Profa. Me. da Universidad Tecnológica del Uruguay. E-mail: yesica.ramirez@utec.edu.uy

² Tecnóloga em Alimentos, Profa. Dra. da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. E-mail: raquelgvendruscolo@gmail.com

³ Matemático, Prof. Dr. no Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: ciceronogueira4@gmail.com

⁴ Farmacêutico Bioquímico, Prof. Dr. da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: rogerwag@gmail.com

⁵ Engenheiro Químico, Prof. Dr. da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: jahn@smaail.ufsm.br

⁶ Tecnólogo em Agronegócio, Pós-doutorando na Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: tonifantinel@gmail.com

sustainable alternative that contributes to waste reduction and the use of non-food resources.

Keywords: Cost analysis. Biofuels. Energy. Environment.

1 INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un combustible biodegradable derivado de fuentes renovables, como aceites vegetales vírgenes (KARMAKAR *et al.*, 2010; MOSER *et al.*, 2012; ERYILMAZ *et al.*, 2016; ARUMUGAM *et al.*, 2019), grasas animales (ENCINAR *et al.*, 2011; BANKOVIĆ-ILIĆ *et al.*, 2014; ALAJMI *et al.*, 2018) y aceite de cocina usado (CALDEIRA *et al.*, 2015; SAHAR *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2018; NAWAZ *et al.*, 2023). Generalmente se sintetiza mediante una reacción orgánica conocida como transesterificación (BAJAJ *et al.*, 2010; HO *et al.*, 2016; XIE *et al.*, 2023; XIA *et al.*, 2023; MIYURANGA *et al.*, 2023).

En Brasil, la principal materia prima para la producción de biodiésel es el aceite de soja (BERGMANN *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2018), responsable de la mayor parte de la producción nacional (ANP, 2015; SOUZA *et al.*, 2018; SILVA CÉSAR *et al.*, 2019). Investigadores argumentan que esta dependencia dificulta la comercialización del biodiésel debido a los altos costos de producción, especialmente el costo de la materia prima, que puede representar hasta el 80% del total (ZHANG *et al.*, 2003; LEUNG *et al.*, 2006; SHARMA *et al.*, 2009; ONG *et al.*, 2012).

Naylor y Higgins (2017), observaron que el aumento en la producción de biodiésel no habría ocurrido sin subsidios y políticas comerciales destinadas a apoyar intereses agrícolas, desarrollo económico rural, seguridad energética y metas climáticas. Además, los principales países productores de biodiésel prefieren materias primas disponibles localmente y excedentes de la oferta de alimentos (ZHANG *et al.*, 2003; SANLI *et al.*, 2018), impactando directamente la seguridad alimentaria (PERALTA-YAHYA *et al.*, 2012; KOIZUMI, 2014; TOMEI *et al.*, 2016) y el uso de la tierra (CARLSON *et al.*, 2012; TOMEI *et al.*, 2016).

Una forma de reducir los costos de producción es utilizar materias primas de bajo costo, como el aceite de cocina usado (SAHAR *et al.*, 2018; XIAO *et al.*, 2018; YAAKOB *et al.*, 2013; MILANO *et al.*, 2018; ABOELAZAYEM *et al.*, 2017). Sin embargo, esta materia prima aún no es explotada en la misma medida que otros aceites vírgenes comestibles y no comestibles (TAN *et al.*, 2019; JOSHI *et al.*, 2019) debido a factores económicos (MOECKE *et al.*, 2016). Aproximadamente 9 millones de toneladas de aceites vegetales se producen anualmente en Brasil, pero menos del 2% se reutiliza en la producción de biodiésel (DEMIRBAS *et al.*, 2007).

La dependencia del aceite de soja virgen en la producción de biodiésel genera altos costos y compite con la cadena alimentaria, mientras que el aceite de cocina usado es un residuo subutilizado con potencial para reducir costos e impactos ambientales. La bioeconomía circular ofrece un camino para transformar este pasivo ambiental en un recurso energético, alineándose con las demandas de combustibles renovables y la Agenda 2030. Considerando el crecimiento proyectado de los biocombustibles en los próximos años, con metas del 15% de biodiésel en la composición del diésel hasta 2026, es esencial consolidar el uso del aceite de cocina usado (AGARWAL *et al.*, 2017; AGARWAL, GUPTA; DHAR, 2017) como un medio real y eficaz para reducir costos y disminuir la dependencia del aceite virgen.

Además del enfoque técnico-económico, es fundamental considerar el marco conceptual de la Economía Circular, un modelo que busca redefinir el crecimiento, desvinculándolo del consumo de recursos finitos, y que se basa en tres principios: eliminar los residuos y la contaminación, mantener los productos y materiales en uso, y regenerar los

sistemas naturales (VELENTURF *et al.*, 2021; KIRCHHERR *et al.*, 2023). En contraposición al modelo lineal tradicional de "producir, usar y desechar", la economía circular promueve la reutilización y valorización de residuos como insumos para nuevos procesos productivos, fomentando la eficiencia de recursos y la sostenibilidad a largo plazo (KANDPAL *et al.*, 2024; MITSI *et al.*, 2023). En este contexto, la reutilización del aceite de cocina usado no solo representa una alternativa económicamente viable, sino también una estrategia ambientalmente responsable (YANG *et al.*, 2023; NCUBE *et al.*, 2024). El desecho inadecuado de este residuo en redes de alcantarillado, suelos o cuerpos de agua puede causar obstrucciones, contaminación hídrica y afectar la biodiversidad acuática (RAJAK *et al.*, 2024). Transformar este residuo en biodiesel, por tanto, permite mitigar estos impactos negativos y contribuir a un sistema energético más limpio y sostenible (FOO *et al.*, 2021; SINGH *et al.*, 2021).

Al integrar el aceite de cocina usado en un modelo de economía circular, se reduce la presión sobre recursos naturales vírgenes, como el aceite de soja, y se avanza hacia una matriz energética menos dependiente de materias primas que compiten con la cadena alimentaria (SURYAN *et al.*, 2024; TULASHIE *et al.*, 2025; KUMAR *et al.*, 2025).

De esta manera, se busca promover la sostenibilidad en la producción de biodiesel mediante la bioeconomía circular, sustituyendo el aceite de soja virgen por aceite de cocina usado como materia prima principal, con el objetivo de reducir costos, disminuir la presión sobre los recursos naturales y fomentar una cadena productiva de bajo impacto ambiental. Para ello, se evaluó la viabilidad técnico-económica de la producción de biodiesel a partir de aceite de fritura usado en comparación con el aceite de soja virgen, utilizando metodologías de costeo basado en actividades (*Activity-Based Costing* - ABC). Posteriormente, se propone un modelo de negocio sostenible para pequeñas biorrefinerías, incluyendo cooperativas y empresas de transporte público, basado en la economía circular y la valorización de residuos. Para este análisis, se utilizaron el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el *payback* descontado. Estas unidades podrían servir como alternativas para cooperativas y empresas de transporte público.

2 METODOLOGIA

El experimento se realizó en la planta de reciclaje ubicada en el parque de exposiciones de la Asociación de Fumicultores de Brasil (AFUBRA), en Rio Pardo, RS - Brasil, donde opera una unidad industrial de producción de biodiesel. El aceite de cocina usado fue proporcionado por el proyecto Coleta de Óleo Saturado (Recolección de Aceite Saturado), desarrollado por AFUBRA.

La Tabla 1 presenta las propiedades fisicoquímicas y la composición de ácidos grasos de esta materia prima. Dado que el contenido de ácidos grasos libres de la materia prima es inferior al 1%, indicando baja acidez, las reacciones de transesterificación alcalina se iniciaron directamente, sin necesidad de una reacción de pretratamiento (KNOTHE, 2006; RAMOS *et al.*, 2009). Los demás insumos para el proceso de transesterificación, metanol (pureza del 99.9%) y metilato de sodio (CH₃NaO), fueron adquiridos de la empresa Quimicamar.

Tabla 1 – Composición del aceite de cocina usado

Propiedad	Composición (% en masa)
Contenido de agua	10
Residuos sólidos	5
Ácidos grasos libres	0,9
Aceite	84,1
Ácido graso	Composición (% en masa)
C4:0 (Butírico)	1
C16:0 (Palmítico)	14
C18:0 (Estearico)	4
C18:1 n9c (Oleico cis)	25
C18:1 n9t (Oleico trans)	1
C18:3n3 (Linolénico)	48
C20:0 (Araquídico)	5
Otros	2

Fuente: Autores, 2025.

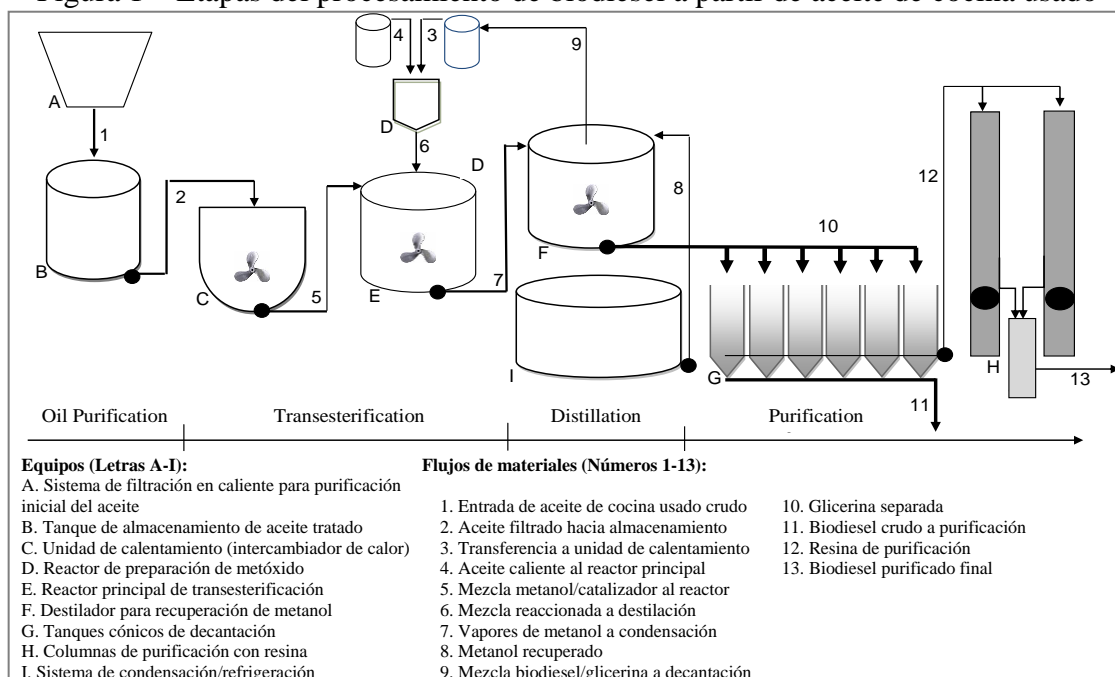
2.1. PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

Se llevaron a cabo tres procesos de transesterificación independientes, utilizando en cada caso 200 litros (558,6 kg) de aceite de cocina usado como materia prima. La producción de biodiesel mediante transesterificación alcalina siguió un protocolo estandarizado en la planta piloto de AFUBRA, la cual cuenta con una capacidad instalada de 475,20 toneladas anuales operando en régimen continuo las 24 horas del día.

El diagrama (Figura 1) evidencia el flujo secuencial del proceso, destacando la integración entre unidades operativas y la circulación de materiales. Es particularmente notable el circuito cerrado para recuperación y reutilización de metanol (flujos 6-8), que representa un aspecto clave de la sostenibilidad económica y ambiental del proceso. La disposición de los equipos refleja un diseño optimizado para producción continua, donde cada etapa cumple una función específica en la transformación del aceite residual en combustible de calidad.

El proceso inició con la purificación del aceite usado mediante filtración en caliente (Equipo A) para eliminar impurezas sólidas y humedad residual. El aceite tratado se almacenó temporalmente en un tanque de reserva (Equipo B) antes de su procesamiento. Previo a la reacción principal, el aceite se calentó hasta alcanzar 60°C en un intercambiador de calor (Equipo C), temperatura óptima para la transesterificación. Paralelamente, se preparó la solución catalítica mezclando metanol (relación molar 4:1 respecto al aceite) con metilato de sodio (3% p/p) en un reactor de acero inoxidable AISI 304 (Equipo D). Esta solución de metóxido se incorporó al aceite caliente en el reactor principal (Equipo E), donde la mezcla reaccionó bajo agitación intensa durante 45 minutos. La corriente resultante, compuesta por biodiesel crudo, glicerina y exceso de metanol, se derivó a una unidad de destilación (Equipo F) para recuperar el alcohol mediante evaporación y posterior condensación (Equipo I), permitiendo su reutilización en ciclos posteriores. La separación de fases se realizó en tanques cónicos de decantación (Equipo G), donde la glicerina (fase densa) se separó por gravedad y se almacenó para su valorización. Finalmente, el biodiesel se sometió a un proceso de purificación en columnas con lecho de resina Amberlite BD10DRY (Equipo H) operando a 200 L/h, eliminando trazas de catalizador y otros contaminantes para cumplir con las especificaciones de calidad del combustible. Este diseño de proceso integrado permite una producción eficiente con mínima generación de residuos.

Figura 1 – Etapas del procesamiento de biodiesel a partir de aceite de cocina usado



Fuente: Autores, 2025.

2.2. CUANTIFICACIÓN DEL PROCESO

Los insumos iniciales de cada proceso fueron convertidos de volumen a peso según sus respectivas densidades: aceite de cocina usado, metanol y metilato de sodio. Los productos de biodiesel y glicerol fueron cuantificados mediante pesaje directo. El metanol fue cuantificado indirectamente, basado en el cálculo de la cantidad de aceite utilizado por lote. En la reacción de transesterificación, por cada molécula de glicerol liberada (peso molecular de 96,09 g/mol), se incorporan tres moléculas de metanol (peso molecular total de 92,12 g, calculado como $3 \times 32,04$ g) a la cadena de ácidos grasos. En consecuencia, la masa de biodiesel producido debería aproximarse a la masa de aceite utilizada en el proceso. El rendimiento de biodiesel fue calculado utilizando la relación mostrada en la Ecuación (1). Todas las propiedades fisicoquímicas del biodiesel y las materias primas fueron determinadas en el LAQUIA (Laboratorio de Química Analítica) y en el Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la UFSM (Universidad Federal de Santa María).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Cantidad de biodiesel producido}}{\text{Cantidad de aceite utilizado}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

2.3. ANÁLISIS DE COSTOS – COSTEO BASADO EN ACTIVIDADES

La metodología de Costeo Basado en Actividades (ABC) desarrollada tiene como principal ventaja mejorar la precisión de los datos de costos de cada producto. Permite el control y la asignación de costos mediante la identificación de procesos y actividades en diferentes sectores, lo que facilita la identificación, el análisis y el control de los costos involucrados (COOPER *et al.*, 1991). La metodología ABC requiere cuatro pasos de análisis: a) mapeo de actividades; b) asignación de costos a las actividades; c) redistribución de los costos de las actividades indirectas y directas; y d) cálculo de los costos del producto

(BORNIA, 2010). En cada actividad, se cuantificaron los factores de costo según las diferentes actividades de producción.

Se cuantificaron los costos de tres procesos. Cada proceso requiere seis actividades (Figura 1), purificación y calentamiento de la materia prima, proceso de transesterificación, destilación, separación de fases (ligera y pesada) y purificación del biodiésel. Para cada actividad, se cuantificaron los factores de costo según las diferentes actividades de producción. Los costos se estipularon para veinticuatro horas de trabajo (6.336 h/año). En la Tabla 2, los rubros de gastos se separaron en costos directos e indirectos con sus respectivos montos. Todos los costos mostrados están en dólares estadounidenses. El tipo de cambio utilizado para la conversión fue de 0,285 dólares estadounidenses.

Los costos directos (Tabla 2), son el catalizador, el aceite de cocina usado, el alcohol metílico, la resina de pulido y la mano de obra. Los costos del catalizador y del metanol se calcularon con base en la utilización del producto (litros). El costo de los utensilios de purificación se estimó con base en la vida útil de la resina Amberlite BD10DRY, que es de 80.000 litros de biodiésel procesado. La cantidad requerida de resina es de 40 kg para las dos columnas de purificación. El costo unitario de esta resina es de 12,79 dólares estadounidenses/kg. Los costos del aceite de cocina usado incluyen los costos de transporte. El costo de la mano de obra por hora del operador se definió con base en el salario mínimo regional de 2018 en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil. En el decimotercer caso, las vacaciones, el FGTS y la seguridad social (INSS) totalizaron US\$ 497,04. Se consideraron 44 horas semanales, lo que generó un costo por hora de US\$ 2,82. Los costos indirectos se definieron como electricidad y depreciación de equipos e instalaciones. El costo de la energía eléctrica (kW/h) se estimó para la categoría de red eléctrica trifásica, a una tarifa de US\$ 0,14, valor vigente en 2018. A través de los datos, fue posible identificar el consumo unitario de energía eléctrica para cada actividad según el equipo utilizado. El costo del edificio de mampostería de 100 m², calculado con base en el mes CUB/RS de julio de 2018 (<http://www.sindusconrs.com.br>), más el costo de la instalación eléctrica, totalizó US\$ 27.059,04. El costo del equipo asciende a US\$ 75.669,24 (Tabla 2).

Tabla 2 – Resumen de ítems de gasto y sus costos respectivos por unidad

Costos Directos	Unidad	Costo/Unidad (US\$)
Metanol	L	0.58
Metilato de sodio (CH ₃ NaO)	L	1.41
Resina Amberlite BD10DRY	L	0.01
Mano de obra	h	2.83
Energía eléctrica	kW/h	0.14
Costos Indirectos	Unidad	Costo (US\$)
Infraestructura (Edificio)	150 m ²	27,059.04
Mesa de filtración	Equipo	9,365.85
Tanque de calentamiento	Equipo	7,424.15
Reactor	Equipo	17,018.44
Destilador	Equipo	13,706.13
Tanque de decantación	Equipo	7,995.24
Columnas de purificación	Equipo	20,159.43

Notas: Los costos directos representan insumos variables asociados directamente a la producción. Los costos indirectos corresponden a inversiones en infraestructura y equipos con vida útil prolongada. El costo de la resina Amberlite BD10DRY refleja su distribución proporcional por litro de biodiesel procesado. Todos los valores monetarios utilizan el tipo de cambio de 2018 (US\$ 0.285 por real brasileño). La mano de obra incluye cargas sociales según la legislación laboral brasileña.

Fuente: Autores, 2025.

La depreciación de equipos y obras civiles siguió la Instrucción Normativa RFB N° 1700 del 14 de marzo de 2017 (<http://normas.receita.fazenda.gov.br>). Para la construcción civil, se consideraron veinticinco años (25) para la depreciación. Los costos de cada actividad se calcularon en tres etapas. Primero, el costo total del edificio se dividió entre veinticinco años (Ecuación 2). Luego, el costo anual del edificio se dividió entre 264 días (Ecuación 3), obteniendo el costo diario de depreciación. Finalmente, se determinó el costo por actividad: el costo diario se dividió entre 100 m² y se multiplicó por el área utilizada para cada actividad (Ecuación 4).

$$\text{Depreciación anual (U S\$)} = \frac{\text{Valor del edificio (U S\$)}}{\text{Años}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\text{Depreciación día (U S \$)} = \frac{\text{año de depreciación (U S\$)}}{\text{día/año}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$\text{Costo de la actividad (U S\$)} = \frac{\text{día de depreciación (U S \$)}}{\text{superficie del edificio (m}^2\text{)}} * \text{Superficie/actividad} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Para la depreciación de los equipos, se consideraron diez años (10) y 6,336 horas/año. Primero, se calculó el costo anual de depreciación del equipo (Ecuación 5). Posteriormente, se determinó el costo diario de depreciación, basado en el tiempo de uso del equipo en cada actividad (Ecuación 6).

$$\text{Depreciación (US$/año)} = \frac{\text{Valor del equipo (U S\$)}}{\text{Año}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$\text{Costo de la actividad (U S\$)} = \frac{\text{Depreciación (US$/año)}}{\text{Hora/Año}} * \text{hora/actividad} \quad \text{Ecuación (6)}$$

2.4. DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

El costo de procesamiento se obtuvo sumando los costos individuales de cada actividad requerida para producir biodiésel (Ecuación 7). El costo total de producción se determinó sumando los costos de procesamiento y los costos de materia prima (Ecuación 8). Para calcular el costo por unidad producida (por litro), se dividió el costo total de producción entre el volumen total de biodiésel generado en los procesos (por lote) (Ecuación 9).

$$CP = \sum \text{ativ}.n \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$CT = \sum CP + CM \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$C_{\text{litro}} = \frac{CT}{VB} + \text{impuestos} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde: *CP* es el costo de procesamiento, $\sum \text{ativ}.n$ es la suma de los costos de la actividad, *CT* es el costo total, *CM* es el costo de la materia prima, *C_{litro}* es el costo por litro, *VB* es el volumen de biodiésel producido e impuestos (Pis/Cofins, ICMS).

2.5. PROYECTOS DE BIORREFINERÍA

Simulamos dos pequeñas biorrefinerías de biodiésel con capacidades de producción anual de 517,000 kg y 258,500 kg, operando 24 horas al día, 264 días al año. Como referencia, utilizamos el municipio de Santa Maria, RS (Brasil), que cuenta con

aproximadamente 280.505 habitantes, según estimaciones de 2018 (IBGE, 2010). Para estimar la producción de materia prima destinada a la fabricación de biodiesel, aplicamos la metodología propuesta por Castellaneli y Cunha (2015). Con una población de 280.000 habitantes, el potencial de generación de aceite de cocina usado en Santa Maria es de 66.885 litros por mes. En el municipio, los vehículos diésel representan alrededor del 20% de la flota automotriz. En los últimos años, el precio del diésel ha experimentado un aumento significativo, alcanzando US\$ 1,05 por litro en 2023 (ANP, 2018). Por ello, este trabajo se centra en estudios técnico-económicos de una pequeña biorrefinería de biodiesel que utiliza aceite de cocina usado, dirigida a empresas, cooperativas y organizaciones gubernamentales del municipio y la región. La producción anual del subproducto glicerol crudo es de 60.000 kg y 30.000 kg, respectivamente, y se incluye en el análisis. El proceso de producción de biodiesel simulado en este estudio se representa en la Figura 1, presentada al inicio de esta sección.

2.6. COSTOS DE CAPITAL ESTIMADOS

La Tabla 3 presenta los costos iniciales de implementación de la biorrefinería. El tipo de cambio utilizado para la conversión fue de US\$ 0,285. La inversión total del proyecto incluye los costos de los equipos, utensilios (galones), infraestructura, terreno y capital de trabajo. El conjunto completo de equipos de la biorrefinería se estima en US\$ 120.669,24. Los costos de instalación ya están incluidos en el valor estimado de los equipos. El costo de infraestructura asciende a US\$ 27.059,03 e incluye el edificio, la red eléctrica y el sistema de abastecimiento de agua para la biorrefinería. El área requerida para la instalación es de 1 hectárea, con un costo total del terreno de US\$ 20.000,00. Los costos de galones y utensilios (incluyendo equipos de protección personal – EPP) suman US\$ 3.870,00. Se asumió un costo de contingencia del 10% sobre el valor de los equipos. El capital de trabajo se estimó como el 10% del costo combinado de los equipos e infraestructura. Como resultado, el capital de trabajo y la inversión total de capital se estimaron en US\$ 17.120,82 y US\$ 200.767,33, respectivamente. Se consideró que la biorrefinería sería financiada al 100% con capital propio.

Tabla 3 – Análisis de costos de capital para la biorrefinería

Especificaciones	Unidad	Costo total, (US\$)
Infraestructura (Edificio 150 m ²)	1	27.059,03
Mesa de filtración	1	9.365,85
Tanque de calentamiento	1	7.424,15
Reactor	1	17.018,44
Destilador	1	13.706,13
Tanque de decantación	6	7.995,24
Columnas de purificación	1	20.159,43
Tanque de combustible (20.000 L)	1	40.000,00
Bomba de suministro	1	5.000,00
Terreno	1 ha	20.000,00
Galones (60 L)	90	3.300,00
Utensilios (máscaras, guantes, lentes, botas)	-	570
Costo de contingencia (10%)	-	12.066,24
Capital de trabajo (10%)	-	17.102,82
Total (US\$)		200.767,33

Nota: Todos los valores están expresados en dólares estadounidenses (US), utilizando una tasa de cambio de R\$ = US\$0,285. El costo total incluye equipos, infraestructura, terreno, contingencia y capital de trabajo. La biorrefinería se considera 100% financiada con capital propio.

Fuente: Autores, 2025.

2.7. COSTO ANUAL DE PRODUCCIÓN

El costo operativo y de depreciación anual de la biorrefinería para los primeros cinco años se muestra en la Tabla 4. Los costos operativos variables incluyen materia prima (aceite de cocina), insumos (metanol, metilato de sodio y resina), agua, electricidad, recolección de aceite e impuestos. La mano de obra y el mantenimiento constituyen los costos operativos fijos. Los costos de la materia prima, catalizadores y resinas se calcularon en función del precio unitario utilizado en el proceso. Los costos del aceite de cocina usado no se incluyeron en la contabilidad de costos, ya que se realizó un análisis de sensibilidad en el que los costos variaron entre US\$ 0,05 y US\$ 0,60/L. Los costos de recolección de aceite se establecieron de acuerdo con proveedores locales en 2018, e incluyen combustible y alquiler. La biorrefinería requiere seis empleados. El costo de la mano de obra se definió con base en el salario mínimo regional vigente en 2018 en el estado de Rio Grande do Sul (US \$ 497,04) (Tabla 4).

Tabla 4 – Costo anual de producción para los primeros cinco años (US\$)

Concepto	Cantidad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Mano de obra	2	35.258,28	37.532,44	39.953,28	42.530,27	45.273,47
Depreciación	10 %/año	8.649,29	8.649,29	8.649,29	8.649,29	8.649,29
Mantenimiento	5 %	15.090,67	16.064,02	17.100,15	18.203,11	19.377,21
Costos Fijos (US\$)		58.998,24	62.245,75	65.702,72	69.382,66	73.299,97
Metanol	39.491 L	33.431,20	35.587,51	37.882,91	40.326,35	42.927,40
Energía eléctrica		10.034,20	10.681,41	11.370,36	12.103,74	12.884,44
Catalizador	13.780 L	22.334,40	23.774,96	25.308,45	26.940,85	28.678,53
Resina purificación		5.429,60	5.779,81	6.152,61	6.549,45	6.971,89
Recolección de aceite		12.816,00	13.642,63	14.522,58	15.459,29	16.456,41
Agua		1.293,60	1.377,04	1.465,86	1.560,40	1.661,05
Impuestos		40.777,40	43.407,55	46.207,33	49.187,71	52.360,31
Total (US\$)		126.116,40	134.250,91	142.910,1	152.127,80	161.940,04

Fuente: Autores, 2025.

Se asumió que los costos de mantenimiento equivalen al 10% del costo operativo. La depreciación de equipos e instalaciones siguió la Instrucción Normativa SRF N° 162 del 31 de diciembre de 1998, para determinar la vida útil y la tasa anual de depreciación. A partir del segundo año, los gastos aumentaron un 6,45% con respecto al valor del año anterior (Tabla 4).

2.8. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y CRITERIOS DE RENTABILIDAD

Se utilizaron cuatro indicadores financieros para determinar la viabilidad económica y financiera de la biorrefinería de biodiésel (VLYSIDIS; BINNS, 2011; GLISIC *et al.*, 2016). El valor presente neto (VPN) es un análisis de sensibilidad del flujo de caja futuro de una inversión o de la rentabilidad del proyecto, como se muestra en la siguiente ecuación 10:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde: R_t representa los ingresos por la venta de biodiésel, C_t representa los costos de producción, i es la tasa de descuento y t es el período durante el cual se utilizará la tecnología. El proyecto se considera rentable si el $VPN > 0$.

También se calcularon otros criterios, como la tasa interna de retorno (TIR), el período de recuperación descontado (PRD) y la relación beneficio-costos (RBC). Para evaluar la rentabilidad de los diferentes escenarios, se consideró una vida útil de la planta de 10 años. Se asumió que la construcción de la planta se completaría al final del primer año y que

comenzaría a operar a plena capacidad de inmediato. La tasa de interés *i* utilizada en este estudio fue del 9,75%, reflejando la tasa de interés Selic vigente (BANCO DO BRASIL, 2015).

2.9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizaron análisis de sensibilidad para capacidades de producción del 100% y del 50% de la biorrefinería de biodiésel con el fin de investigar la sensibilidad de los indicadores de previsión económica: valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), período de recuperación descontado (PRD) y relación beneficio-costos (RBC). Se evaluaron siete parámetros, y el costo de la materia prima varió entre US\$ 0,05 y US\$ 0,60 por litro de aceite de fritura usado. Los ingresos en efectivo se calcularon a partir de la venta de biodiésel, considerando un precio promedio de US\$ 0,92 por litro.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. BALANCE DE MASA DEL PROCESO

La Tabla 5 muestra el balance de masa promedio de los tres procesos. En cada proceso se produjeron 181,42 kg de biodiésel, lo que corresponde a un rendimiento del 97,4%. En total, se generaron 544,26 kg de biodiésel en los tres procesos. Considerando la densidad del biodiésel de 0,882 g/cm³ obtenida en nuestros análisis, el volumen correspondiente de biodiésel fue de 617 litros ($V. B100 = 544,26 \text{ kg} / 0,882 \text{ kg/L}$).

En cuanto a la recuperación del metanol, se observó un reciclaje de 6,47 kg (Tabla 5). Con base en la estequiometría de la reacción, donde se utilizó una relación metanol/aceite de 4:1, teóricamente se requieren tres moles de metanol por cada mol de aceite. Según los cálculos, la cantidad de metanol residual después de la reacción debería ser de 6,7 kg. Esta información sugiere que casi la totalidad del metanol residual se recupera durante el proceso de destilación, donde se evapora.

Tabla 5 – Balance promedio de masa de los tres procesos

Productos	Entradas (kg)	Salidas (kg)
Aceite vegetal usado	186.20	-
Metanol	23.70	6.47
CH ₃ NaO (Catalizador)	5.80	-
Glicerina	-	27.37
Corriente de biodiesel	-	181.42
Total	215.70	215.26

Fuente: Resultados de la investigación.

Para la caracterización del biodiésel, se determinaron los siguientes parámetros: contenido de ésteres (%), densidad, viscosidad, contenido de agua, acidez, contenido de sedimentos, pH y concentraciones de metales (Ca, K, Mg, Na), así como fósforo (P) y azufre (S) (Tabla 6). Mediante cromatografía de gases, se verificó una tasa de conversión del 99% a ésteres en el biodiésel producido, valor superior al 96,5% exigido por la Resolución N° 45 de 2014 (ANP, 2014). Con excepción del contenido de agua, los parámetros cumplen con los estándares de calidad exigidos, destacando: Alta pureza en ésteres (99%, superior al mínimo del 96,5%). Viscosidad y densidad dentro de los rangos óptimos para uso en motores. Bajísimo contenido de metales (Ca, Mg, K, Na), lo que garantiza menor corrosión y mayor estabilidad del combustible. El pH neutro (6,5) y el bajo índice de acidez (0,34 mg KOH/g)

indican un biodiesel con mínima degradación oxidativa. Los trazos de P y S (azufre) están muy por debajo de los límites, reduciendo emisiones contaminantes. Y se encuentran dentro de las especificaciones establecidas por dicha resolución (Tabla 6). En una jornada de ocho horas, es posible completar tres procesos, cada uno procesando 200 litros de aceite de freír usado y generando 617 litros de biodiésel. Por lo tanto, presentamos a continuación los costos asociados a estos tres procesos en la secuencia del trabajo.

Tabla 6 – Caracterización del biodiesel

Análisis	Límite/Norma	Resultado
Contenido de ésteres	≥96,5% (masa)	99%
Densidad a 20°C	850-900 kg/m ³	0,882 kg/m ³
Viscosidad (mm ² /s)	3,0-6,0	4,9
pH	-	6,5
Contenido de agua	≤200,0 mg/kg	0,16 mg/kg
Índice de acidez	≤0,5 mg KOH/g	0,34 mg KOH/g
Calcio (Ca)	≤5 mg/kg	<2,2*
Magnesio (Mg)	≤5 mg/kg	<0,2*
Potasio (K)	≤5 mg/kg	<1,3*
Sodio (Na)	≤5 mg/kg	<1,3*
Fósforo (P)	≤10 mg/kg	<18*
Azufre (S)	≤10 mg/kg	<35*

Notas: Los valores marcados con (*) están por debajo del límite de cuantificación del método utilizado.

Fuente: Resultados de la investigación.

3.2. DETERMINACIÓN DE COSTOS POR ACTIVIDAD

Tabla 7 – Costos por actividad para los tres procesos según rubros de gasto (US\$)

Actividades	Mano de obra	Energía eléctrica	Equipos	Catalizador	Metanol	Resina	Instalaciones	Total (US\$)
Purificación de aceite	8,49	2,52	0,44	-	-	-	2,21	13,67
Calentamiento de aceite	0,85	2,83	0,21	-	-	-	0,28	4,17
Transesterificación	1,06	0,35	0,6	25,38	37,99	-	0,32	65,7
Evaporación de metanol	1,41	4,22	0,65	-	-	-	0,32	6,6
Separación de fases	6,49	0,47	0,57	-	-	-	0,64	8,17
Purificación de biodiesel	4,33	0,16	0,95	-	-	6,17	0,28	11,89
Total (US\$)	22,63	10,56	3,43	25,38	37,99	6,17	4,05	110,21

Notas: Los valores marcados con (*) están por debajo del límite de cuantificación del método utilizado.

Fuente: Resultados de la investigación.

Considerando el rendimiento del 97,4% de biodiésel en los tres procesos, la Tabla 7 presenta los costos de procesamiento (CP) para cada una de las seis actividades, utilizando el método de costos ABC. La producción de 617 litros de biodiésel implicó un costo total de procesamiento de US\$ 110,21, lo que resulta en un costo por litro de biodiésel de US\$ 0,18 (dieciocho centavos). Entre las actividades, la transesterificación fue la que más recursos demandaron, con un costo de US\$ 61,82, lo que representa aproximadamente el 60% del costo total de procesamiento (Tabla 7). El mayor gasto dentro de esta actividad fue el metanol, que representó el 58% del costo. El consumo efectivo en los tres procesos fue de 65,5 litros (Tabla 5), con un costo de US\$ 37,99. El consumo de catalizador (metilato de

sodio, CH_3NaO) en los tres procesos fue de 18 litros (17,5 kg), con un gasto de US\$ 25,38, equivalente al 39% de los costos de esta actividad. El segundo costo más significativo fue la purificación del aceite de freír usado, que representó el 12% del costo total de procesamiento, con un monto de US\$ 13,67. Los principales componentes de este costo fueron la mano de obra (62%), la electricidad (18%) y la depreciación de instalaciones (16%). La purificación del biodiésel fue la tercera actividad más costosa, con un costo de US\$ 2,00. El gasto más relevante en esta actividad fue la resina (27%), seguido por la mano de obra (36%). En esta etapa, el biodiésel se hace pasar por dos columnas que contienen resina Amberlite BD10DRY, con una velocidad de percolación de 200 L/h.

Otras actividades con costos notables fueron la separación de fases (7%), la evaporación del metanol (6%) y el calentamiento del aceite usado de cocina (4%) para el proceso de transesterificación. En el análisis de la distribución de costos por elementos de gasto (Tabla 7), el metanol representó el 34% del costo total, seguido por el catalizador (23%), la mano de obra (21%), la electricidad (10%), la resina de purificación (6%), la depreciación de instalaciones (4%) y la depreciación de equipos (3%).

3.3. DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

Después de calcular el costo de procesamiento, se agregó el costo del aceite de cocina usado al costo de producción (Tabla 8). El consumo real de esta materia prima fue de 600 litros. Con un costo de US\$ 0,05 por litro de aceite usado, más ICMS, el costo total de producción fue de US\$ 0,25 por litro de biodiésel. A medida que aumenta el costo del aceite de cocina usado, su participación en el costo total también se incrementa, reduciendo así la proporción correspondiente al procesamiento. Para efectos comparativos, también se proyectó el costo de producción utilizando aceite de soya y sebo bovino, que representan aproximadamente el 95% de la producción de biodiésel en Brasil. Los precios del aceite de soya y del sebo bovino se obtuvieron del sitio web Biomercado (<http://biomercado.com.br/>).

Tabla 8 – Producción de biodiesel usando aceite usado, aceite de soya y sebo bovino

Matéria prima	Precio aceite/l (US\$)	Costo materia prima (US\$)	Costo total (US\$)	Costo B100/litro (US\$)	% Materia prima	% Procesamiento
Aceite usado	0,05	30	140,21	0,25	21%	79%
Aceite usado	0,10	60	170,21	0,31	35%	65%
Aceite usado	0,20	120	230,21	0,42	52%	48%
Aceite usado	0,30	180	290,21	0,53	62%	38%
Aceite usado	0,40	240	350,21	0,64	69%	31%
Aceite usado	0,50	300	410,21	0,74	73%	27%
Aceite usado	0,60	360	470,21	0,85	77%	23%
Aceite de soya	0,68	408	518,21	0,94	79%	21%
Sebo bovino	0,62	372	482,21	0,88	77%	23%

Fuente: Resultados de la investigación.

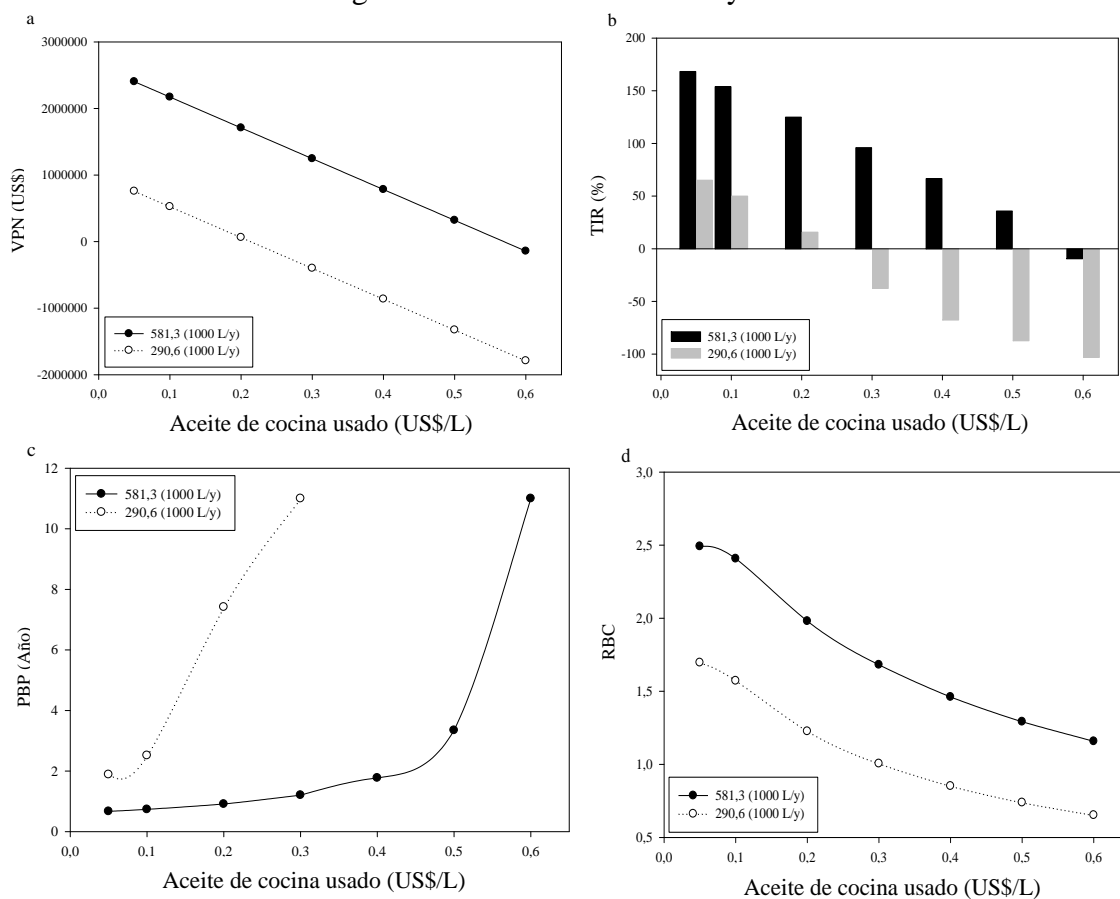
Cuando se utiliza aceite de soya desgomado a un costo promedio de US\$ 0,68 por litro, el costo de producción del biodiésel se eleva a US\$ 0,86 por litro, con un 79% del costo atribuido al aceite de soya y un 21% al procesamiento. De manera similar, cuando se utiliza sebo bovino como materia prima, el costo final de producción asciende a US\$ 0,80 por litro,

con un 77% del costo atribuido al sebo y un 23% al procesamiento (Tabla 8). El uso de aceite usado ofrece ventajas económicas significativas. Existe un punto de equilibrio alrededor de US\$ 0.20/l donde materia prima y procesamiento tienen pesos similares. Las materias primas convencionales (soja, sebo) incrementan el costo final en 50 y 70% versus aceite usado de bajo costo.

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Para el análisis de sensibilidad económico-financiera, se consideraron dos capacidades de producción para la biorrefinería: 100% (517.000 kg de B100/año) y 50% (258.500 kg de B100/año). Se consideró un rendimiento del 97,4% en masa de biodiésel. El valor de densidad utilizado para el biodiésel es de 0,98 kg/L. Los resultados del análisis de sensibilidad para el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Período de Recuperación de la Inversión (PBP) y la Relación Beneficio-Costo (RBC) para la producción de 581.300 litros (517.000 kg/0,988) y 290.600 litros (258.500 kg/0,988) de biodiésel por año, respectivamente, se presentan en la Figura 2.

Figura 2 – Análisis económico y financiero



Notas: (a) Valor Presente Neto (VPN); (b) Tasa Interna de Retorno (TIR); (c) Período de Recuperación de la Inversión (PBP); y (d) Relación Beneficio-Costo (RBC) para 581,3 y 290,6 (mil L/año) de biodiésel.

Fuente: Resultados de la investigación.

A medida que el costo del aceite de cocina usado aumenta de US\$ 0,05 a US\$ 0,60 por litro, el VPN, la TIR y la relación beneficio-costo disminuyen progresivamente, mientras que se observa un aumento en el PBP para ambas capacidades de producción. El VPN de

ambas capacidades se ve significativamente afectado por los cambios en los costos de materia prima. Los resultados muestran que, para una capacidad del 100%, el VPN se vuelve negativo cuando el costo de la materia prima alcanza los US\$ 0,60 por litro, como se muestra en la Figura 2a. La misma tendencia se observa en los otros indicadores de sensibilidad TIR (Figura 2b), PBP (Figura 2c) y RBC (Figura 2d). Esto sugiere que, con un costo superior a US\$ 0,50 por litro de aceite usado, manteniéndose constantes las demás variables, la biorrefinería no es económicamente viable. También se proyectó una reducción del 50% en la capacidad de procesamiento de la biorrefinería. La Figura 2 muestra que la biorrefinería se vuelve económicamente inviable (VPN, TIR y PBP negativos) cuando el costo de la materia prima supera los US\$ 0,30 por litro. Precios más altos de la materia prima resultan en menores retornos sobre la inversión y mayores períodos de recuperación (payback descontado). Por lo tanto, los resultados demuestran que el retorno de inversión de la biorrefinería es altamente sensible tanto al costo de la materia prima como a su capacidad de producción.

4 CONSIDERACIONES FINALES

Este estudio demuestra cómo la sustitución de materias primas convencionales (aceite de soja virgen y sebo bovino) por aceite de cocina usado en la producción de biodiésel puede impulsar la economía circular, generando beneficios ambientales y económicos significativos. Al transformar un residuo urbano en recurso energético, este modelo reduce la dependencia de cultivos agrícolas dedicados, minimiza los impactos ambientales y crea nuevas cadenas de valor a partir de recursos subutilizados. El uso de aceite residual como materia prima presenta un doble beneficio ambiental: (1) evita el vertido inadecuado de este contaminante en redes de alcantarillado y cuerpos de agua; y (2) reduce la presión sobre las tierras agrícolas destinadas a la producción de aceite de soja.

Técnicamente, el proceso demostró una eficiencia comparable o superior a las rutas convencionales. El proceso de transesterificación continua mostró una alta eficiencia, con una conversión en ésteres del 99%, superando los resultados obtenidos con materias primas convencionales en estudios anteriores (VICENTE *et al.*, 2004; HOQUE *et al.*, 2011; SILVA FILHO *et al.*, 2018), que también utilizaron materias primas de bajo costo. Además, el sistema permite la recuperación del 98% del metanol utilizado, cerrando el ciclo de materiales y reduciendo el consumo de insumos vírgenes. Los análisis fisicoquímicos confirmaron que el biodiésel producido cumple con los parámetros de la Resolución ANP n° 45/2014, excepto en cuanto al contenido de humedad, limitación atribuida a la eficiencia de la resina Amberlite en la eliminación de agua (BERRIOS *et al.*, 2008; ATADASHI *et al.*, 2011). No obstante, el producto se mostró viable para su uso en motores diésel, sin perjuicio operativo.

Económicamente, los beneficios son aún más expresivos. La aplicación del método de Costeo Basado en Actividades (ABC) permitió identificar con precisión la contribución de cada etapa del proceso al costo final. El aceite de cocina usado resultó ser una alternativa viable, con costos de producción inferiores a los del aceite de soja y el sebo bovino. Mientras que el aceite de soja y el sebo representan hasta el 78% del costo total de producción en sistemas convencionales, el aceite residual representa solo el 21% de los costos en el modelo circular, resultando en un costo final de US\$ 0,25 por litro, aproximadamente un 40% más bajo que las alternativas tradicionales. Esta ventaja competitiva se debe no solo al menor costo de la materia prima, sino también a la exención de diversos costos agrícolas asociados a la producción de soja. Estos valores son consistentes con los encontrados por Haas *et al.* (2006) y Apostolakou *et al.* (2009) en producciones a pequeña escala. Por lo tanto, queda evidente que la materia prima es el factor más crítico en los costos de fabricación,

corroborando estudios como los de Zhang *et al.* (2003), Nelson *et al.* (2006) y Van Kasteren *et al.* (2007). Además, el análisis mediante el método ABC reveló que la transesterificación concentra el 60% de los costos, principalmente debido al metanol (58%) y al catalizador (39%), lo que destaca oportunidades para futuras optimizaciones. Las etapas de purificación del aceite y del biodiésel también presentaron un impacto financiero relevante, especialmente por la demanda de mano de obra intensiva y equipos especializados.

La viabilidad del modelo fue comprobada a escala piloto, con proyecciones alentadoras para su implementación a nivel municipal. El estudio de caso desarrollado para Santa Maria (RS), ciudad con potencial para generar 66.885 litros/mes de aceite residual, mostró que una biorrefinería con capacidad anual de 540 toneladas podría operar con rentabilidad, siempre que el costo del aceite no supere los US\$ 0,50/L. Los indicadores financieros, incluido el payback, confirman el potencial de replicación del modelo, especialmente en regiones con alta densidad poblacional donde la recolección de aceite usado puede ser más eficiente.

Las implicancias de este modelo circular se extienden más allá de los aspectos técnicos y económicos. Al descentralizar la producción de biodiésel y vincularla a la gestión de residuos urbanos, se genera una oportunidad para desarrollar cadenas productivas locales, generando empleo en las etapas de recolección, transporte y procesamiento del aceite residual. Desde el punto de vista político, el modelo se alinea con las agendas de descarbonización y economía circular, pudiendo ser incorporado en políticas públicas municipales de gestión de residuos y desarrollo económico sostenible. La reducción del 60% en la huella de carbono en comparación con las rutas convencionales representa un argumento adicional para su adopción en el contexto de las metas climáticas globales.

Finalmente, la producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado materializa los principios de la economía circular al transformar un residuo problemático en recurso energético, con ventajas ambientales medibles y una atractiva rentabilidad económica. Este modelo no solo ofrece una alternativa sostenible a los sistemas convencionales de producción de biodiésel, sino que también crea nuevas oportunidades de negocio basadas en la valorización de residuos, contribuyendo a la transición hacia una economía baja en carbono y con mayor eficiencia en el uso de recursos. Los resultados de este estudio sugieren que la ampliación de este enfoque puede representar un paso importante en la construcción de sistemas energéticos más sostenibles y resilientes, particularmente en contextos urbanos donde la generación de aceite residual es significativa y la demanda por soluciones circulares es creciente.

Para ampliar la adopción de esta tecnología, se recomienda:

1. el desarrollo de arreglos institucionales que faciliten la recolección y comercialización del aceite residual;
2. la creación de instrumentos económicos que reconozcan los beneficios ambientales del proceso; y
3. la integración de esta solución con otras rutas de valorización de residuos urbanos.

Futuras investigaciones podrán explorar sinergias con la producción de otros bioproductos a partir del aceite residual, maximizando aún más los beneficios del enfoque circular.

REFERÊNCIAS

ABOELAZAYEM, O.; GADALLA, M.; SAHA, B. An experimental-based energy integrated process for Biodiesel production from waste cooking oil using supercritical methanol. **Chemical Engineering Transactions**, 61, 2017.

AGARWAL, A.K.; AGARWAL, R.A.; GUPTA, T.; GURJAR, B.R. Introduction to Biofuels. In: **Green Energy and Technology**, 2017.

AGARWAL, A.K.; GUPTA, J.G.; DHAR, A. Potential and challenges for large-scale application of biodiesel in automotive sector. **Progress in Energy and Combustion Science**, 61, 113-149, 2017.

ALAJMI, F.S.M.D.A.; HAIRUDDIN, A.A.; ADAM, N.M.; ABDULLAH, L.C. Recent trends in biodiesel production from commonly used animal fats. **International Journal of Energy Research**, 42(3), 885-902, 2018.

ANP: **Anuário Estatístico 2018**. Anuário estatístico ANP, 2018.

ANP: **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015**. Anp/Mme. (2015)

ANP: **Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014**, 2014.

APOSTOLAKOU, A.A.; KOOKOS, I.K.; MARAZIOTI, C.; ANGELOPOULOS, K.C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. **Fuel Processing Technology**, 90 (7-8), 1023-1031, 2009.

ARUMUGAM, A.; PONNUSAMI, V. Biodiesel production from Calophyllum inophyllum oil a potential non-edible feedstock: An overview. **Renewable energy**, 131, 459-471, 2019.

ATADASHI, I.M.; AROUA, M.K.; AZIZ, A.R.A.; SULAIMAN, N.M.N. Refining technologies for the purification of crude biodiesel. **Applied energy**, 88 (12), 4239-4251, 2011.

BAJAJ, A.; LOHAN, P.; JHA, P.N.; MEHROTRA, R. Biodiesel production through lipase catalyzed transesterification. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 62(1), 9-14, 2010.

BANKOVIĆ-ILIĆ, I.B.; STOJKOVIĆ, I.J.; STAMENKOVIĆ, O.S.; VELJKOVIC, V.B.; HUNG, Y.T. Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. **Renewable and sustainable energy reviews**, 32, 238-254, 2014.

BERGMANN, J.C.; TUPINAMBÁ, D.D.; COSTA, O.Y.A.; ALMEIDA, J.R.M., BARRETO, C.C.; QUIRINO, B.F. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 21, 411-420, 2013.

BERRIOS, M.; SKELTON, R.L. Comparison of purification methods for biodiesel. **Chemical Engineering Journal**, 144 (3), 459-465, 2008.

BORNIA, A.C. **Análise Gerencial de Custos Aplicação Em Empresas Modernas**. 2017.

CALDEIRA, C.; QUEIRÓS, J.; FREIRE, F. Biodiesel from Waste Cooking Oils in Portugal: Alternative Collection Systems. **Waste and biomass valorization**, 6(5), 771-779, 2015.

CARLSON, K.M.; CURRAN, L.M.; RATNASARI, D.; PITTMAN, A.M.; SOARES FILHO, B.S.; ASNER, G.P.; TRIGG, S.N.; GAVEAU, D.A.; LAWRENCE, D.; RODRIGUES, H.O. Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion in West Kalimantan, Indonesia. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 109 (19), 7559-7564, 2012.

CASTELLANELLI, C.A.; CUNHA, L.M. Utilização de biodiesel em veículos diesel: Análise de viabilidade de um projeto de pequena escala. **Espacios**, vol. 36, nº 18, 2015.

COOPER, R.; KAPLAN, R.S. Profit Priorities from Activity-Based Costing. **Harvard business review**, 69(3), 130-135, 1991.

DEMIRBAS, A.; KARSLIOGLU, S. Biodiesel production facilities from vegetable oils and animal fats. **Energy Sources**, Part A29 (2), 133-141, 2007.

ENCINAR, J.M.; GONZÁLEZ, J.F.; RODRÍGUEZ-REINARES, A. Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 44(15), 5491-5499, 2005.

ENCINAR, J.M.; SÁNCHEZ, N.; MARTÍNEZ, G.; GARCÍA, L. Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. **Bioresource Technology**, 102(23), 10907-10914, 2011.

ERYILMAZ, T.; YESILYURT, M.K.; CESUR, C.; GOKDOGAN, O. Biodiesel production potential from oil seeds in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 58 , 842-851, 2016.

FOO, W.H.; CHIA, W.Y.; TANG, D.Y.Y.; KOAY, S.S.N.; LIM, S.S.; CHEW, K.W. The conundrum of waste cooking oil: Transforming hazard into energy. **Journal of hazardous materials**, v. 417, p. 126129, 2021.

GLISIC, S.B.; PAJNIK, J.M.; ORLOVIĆ, A.M. Process and techno-economic analysis of green diesel production from waste vegetable oil and the comparison with ester type biodiesel production. **Applied energy**, 170, 176-185, 2016.

HAAS, M.J.; MCALOON, A.J.; YEE, W.C.; FOGLIA, T.A. A process model to estimate biodiesel production costs. **Bioresource Technology**, 97(4), 671-678, 2006.

HO, W.W.S.; NG, H.K.; GAN, S. Advances in ultrasound-assisted transesterification for biodiesel production. **Applied thermal engineering**, 100, 553-563, 2016.

HOQUE, M.E.; SINGH, A.; CHUAN, Y.L. Biodiesel from low cost feedstocks: The effects of process parameters on the biodiesel yield. **Biomass and Bioenergy**, 35(4), 1582-1587, 2011.

IBGE: **Censo Demográfico 2010. Características da População e dos Domicílios**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

IBGE: **IBGE Cidades (2019)**. <https://cidades.ibge.gov.br/>

JOSHI, S.; GOGATE, P.R.; MOREIRA, P.F.; GIUDICI, R. Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer. **Ultrasonics sonochemistry**, 39, 645-653, 2017.

JOSHI, S.; HADIYA, P.; SHAH, M.; SIRCAR, A. Techno-economical and Experimental Analysis of Biodiesel Production from Used Cooking Oil. **Biophysical Economics and Resource Quality**, 4(1), 2, 2019.

KANDPAL, V.; JASWAL, A.; GONZALEZ, E.D.R.S.; AGARWAL, N. Circular economy principles: shifting towards sustainable prosperity. In: **Sustainable energy transition: Circular economy and sustainable financing for environmental, social and governance (ESG) practices**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 125-165.

KARMAKAR, A.; KARMAKAR, S.; MUKHERJEE, S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. **Bioresource technology**. vol. 101, no 19, p. 7201-7210, 2010.

KIRCHHERR, J.; YAHG, N.N.; SCHULZE-SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M.J.; HARTLEY, K. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 194, p. 107001, 2023.

KNOTHE, G. Analyzing biodiesel: Standards and other methods. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 83(10), 823-833, 2006.

KOIZUMI, T. Biofuels and food security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 52, p. 829-841, 2014.

KUMAR, A.; BHAYANA, S.; SINGH, P.K.; TRIPATHI, A.D.; PAUL, V.; BALODI, V.; AGARWAL, A. Valorization of used cooking oil: challenges, current developments, life cycle assessment and future prospects. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1-31, 2025.

LEUNG, D.Y.C.; GUO, Y. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. **Fuel Processing Technology**, 87(10), 883-890, 2006.

LEUNG, D.Y.C.; WU, X.; LEUNG, M.K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied energy**, 87(4), 1083-1095, 2010.

MILANO, J.; ONG, H.C.; MASJUKI, H.H.; SILITONGA, A.S.; CHEN, W.; KUSUMO, F.; DHARMA, S.; SEBAYANG, A.H. Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-Calophyllum inophyllum oil via response surface methodology. **Energy conversion and management**, 158, 400-415 (2018).

MITSI, D. Towards a sustainable future: the cyclical economy. **International Journal of Education**, v. 3, 2023.

MIYURANGA, K. V.; ARACHCHIGE, U. S., MARSO, T. M. M., & SAMARAKOON, G. Biodiesel production through the transesterification of waste cooking oil over typical heterogeneous base or acid catalysts. **Catalysts**, 13 (3), 546, 2023.

MOECKE, E.H.S.; FELLER, R.; SANTOS, H.A.dos; MACHADO, M.deM.; CUBAS, A.L.V.; DUTRA, A.R.deA.; SANTOS, L.L.V.; SOARES, S.R. Biodiesel production from waste cooking oil for use as fuel in artisanal fishing boats: Integrating environmental, economic and social aspects. **Journal of Cleaner Production**, 135, 679-688, 2016.

MOSER, B.R. Preparation of fatty acid methyl esters from hazelnut, high-oleic peanut and walnut oils and evaluation as biodiesel. **Fuel**, 92(1), 231-238, 2012.

NAWAZ, K.; NISAR, J.; ANWAR, F.; MUMTAZ, M.W.; ALI, G.; REHMAN, N.U.; ULLAH, R. Optimised transesterification of used frying oils: production and characterisation of biodiesel. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, 103 (7), 1615-1632, 2023.

NAYLOR, R.L.; HIGGINS, M.M. The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 77, 695-705, 2017.

NCUBE, A.; FIORENTINO, G.; PANFILO, C.; FALCO, M.de; ULGIATI, S. Circular economy paths in the olive oil industry: a Life Cycle Assessment look into environmental performance and benefits. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 29, n. 8, p. 1541-1561, 2024.

ONG, H.C.; MAHLIA, T.M.I.; MASJUKI, H.H.; HONNERY, D. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. **Fuel**, 98, 131-139, 2012.

PERALTA-YAHYA, P.P.; ZHANG, F.; DEL CARDAYRE, S.B.; KEASLING, J.D. Microbial engineering for the production of advanced biofuels. **Nature**, 488, 320-328, 2012.

RAJAK, P.; GANGULY, A.; NANDA, S.; MANDI, M.; GHANTY, S.; DAS, K.; BISWAS, G.; SARKAR, S. Toxic contaminants and their impacts on aquatic ecology and habitats. In: **Spatial Modeling of Environmental Pollution and Ecological Risk**. Woodhead Publishing, 2024. p. 255-273.

RAMOS, M.J.; FERNÁNDEZ, C.M.; CASAS, A.; RODRÍGUEZ, L.; PÉREZ, Á. Influence of fatty acid composition of feedstock on biodiesel properties. **Bioresource technology**, 100(1), 261-268, 2009.

SAHAR, SADAF, S.; IQBAL, J., ULLAH, I.; BHATTI, H.N.; NOUREN, S.; HABIB-UR-REHMAN, NISAR, J.; IQBAL, M. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. **Sustainable Cities and Society**, 41, 220-226, 2018.

SANLI, H.; ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Production of Fuel Quality Ethyl Ester Biodiesel: 1. Laboratory-Scale Optimization of Waste Frying Oil Ethanolysis, 2. Pilot-Scale Production with the Optimal Reaction Conditions. **Waste and Biomass Valorization**, 10(7), 1889-1898, 2018.

SHARMA, Y.C.; SINGH, B. Development of biodiesel: Current scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13(6-7), 1646-1651, 2009.

SILVA CÉSAR, A.; CONEJERO, M.A.; BARROS RIBEIRO, E.C.; BATALHA, M.O.

Competitiveness analysis of “social soybeans” in biodiesel production in Brazil. **Renewable Energy**, 133, 1147-1157, 2019.

SILVA FILHO, S.C.; DA, MIRANDA, A.C.; SILVA, T.A.F.; CALARGE, F.A., SOUZA, R.R.; DE, SANTANA, J.C.C.; TAMBOURGI, E.B. Environmental and techno-economic considerations on biodiesel production from waste frying oil in São Paulo city. **Journal of Cleaner Production**, 183, 1034-1042, 2018.

SINGH, D.; SHARMA, D.; SONI, S.L.; INDA, C.S.; SHARMA, D.; SHARMA, P.K.; JHALANI, A. A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127299, 2021.

SOUZA, S.P.; SEABRA, J.E.A.; NOGUEIRA, L.A.H. Feedstocks for biodiesel production: Brazilian and global perspectives. **Biofuels**, 9(4), 455-478, 2018.
doi:10.1080/17597269.2017.1278931

SURYANI, A.S.; TAMBUNAN, T.T.; SANTOSA, B.; HARYANTO, J.T. Circular Economy Approach to the Management of Used Cooking Oil for Biofuel Production. **Journal of Economics, Management, Entrepreneurship, and Business (JEMEB)**, v. 4, n. 2, p. 98-105, 2024.

TAN, Y.H.; ABDULLAH, M.O.; KANSEDO, J.; MUBARAK, N.M.; CHAN, Y.S., NOLASCO-HIPOLITO, C. Biodiesel production from used cooking oil using green solid catalyst derived from calcined fusion waste chicken and fish bones. **Renewable Energy**, 139, 696-706, 2019.

TOMEI, J.; HELLIWELL, R. Food versus fuel? Going beyond biofuels. **Land use policy**, 56, 320-326, 2016.

TULASHIE, S.K.; ALALE, E.M.; AGUDAH, P.Q.; OSEI, C.A.; MUNUMKUM, C.A.; GAH, B.K.; BAIDOO, E.B. A review on the production of biodiesel from waste cooking oil: a circular economy approach. **Biofuels**, v. 16, n. 1, p. 99-119, 2025.

VELENTURF, A.P.M.; PURNELL, P. Principles for a sustainable circular economy. **Sustainable production and consumption**, v. 27, p. 1437-1457, 2021.

VICENTE, G.; MARTÍNEZ, M.; ARACIL, J. Integrated biodiesel production: A comparison of different homogeneous catalysts systems. **Bioresource Technology**, 92(3), 297-305, 2004.

VLYSIDIS, A.; BINNS, M., WEBB, C.; THEODOROPOULOS, C. A techno-economic analysis of biodiesel biorefineries: Assessment of integrated designs for the co-production of fuels and chemicals. **Energy**, 36(8), 4671-4683, 2011.

XIA, S.; LI, J.; CHEN, G.; TAO, J.; LI, W.; ZHU, G.; ; ZHAO, K. Sustainable biodiesel production via transesterification of vegetable oils and waste frying oil over reusable magnetic Ca₂Fe₂O₅/CaO@ MgFe₂O₄-Fe₂O₃ catalyst. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 45(3), 8047-8061, 2023.

Flores *et al.* (2025)

XIAO, M.; LIN, D.; LI, Z.; ZHAO, J.; LONG, X.; WU, Z. Synthesis of Biodiesel from Waste Cooking Oil by One-step Esterification and Its Structural Characterization. **Waste and Biomass Valorization**, 1-14, 2018.

XIE, Y.; WANG, D.; ALMOJIL, S.F.; ALMOHANA, A.I.; ALALI, A.F.; ZHOU, Y.; RAISE, A. CaO-MgFe₂O₄@ K₂CO₃ as a novel and retrievable nanocatalyst for two-step transesterification of used frying oils to biodiesel. **Process Safety and Environmental Protection**, 172, 195-210, 2023.

YAAKOB, Z.; MOHAMMAD, M., ALHERBAWI, M., ALAM, Z., SOPIAN, K. Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. **Renewable and sustainable energy reviews**, 18, 184-193, 2013.

YANG, M.; CHEN, L.; WANG, J.; MSIGWA, G.; OSMAN, A.I.; FAWZY, S.; ROONEY, D.W.; YAP, P. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 1, p. 55-80, 2023.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource technology**, 89(1), 1-16, 2003.