

Evaluación del cumplimiento del estándar de sustentabilidad de la
producción de biodiésel a partir de aceite de insectos

I.Q. Angelica Avila
Anguis

2024



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación del cumplimiento del estándar de
sustentabilidad de la producción de biodiésel a partir de
aceite de insectos

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ingeniería en Calidad y Productividad

Presenta

Ing. Química Angelica Avila Anguis

Dirige:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Querétaro, Qro. a 1 de Octubre de 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



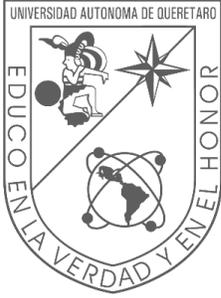
SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Evaluación del cumplimiento del estándar de sustentabilidad de la producción de biodiésel a partir de aceite de insectos

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta

Angelica Avila Anguis

Dirigido por:

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Sínodo

Secretario: Dr. Sergio Iván Martínez Guido

Vocal: M. en C. Valeria Caltzontzin Rabell

Suplente: M.A.P. José Agustín Martínez Rodríguez

Suplente: M.I. Javier García Pérez

DEDICATORIA

A mi mamá Nidia, mi papá Arturo, mi Hermana Esthela y mi sobrino Elías, las personas más importantes en mi vida y a las que más quiero.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi mamá y a mi papá por siempre apoyarme en mis decisiones y nunca cortarme las alas, sobre todo muchas gracias por soportarme cuando estoy estresada y brindarme palabras de aliento para poder seguir. A mi hermana Esthela que su alegría, aliento y complicidad han sido de los mejores regalos en mi vida. Gracias a ustedes tres por estar siempre a mi lado sin importar la distancia, gracias por comprender las ausencias y celebrar mis triunfos.

También, agradezco a la Dra. Claudia Gutiérrez Antonio cuya orientación y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de esta tesis. Su experiencia, su apoyo brindado y el amor con el que desarrolla su trabajo han sido una fuente constante de motivación.

Al Dr. Sergio Iván, Mtra. Valeria Caltzontzin, M.I. Javier García y M.A.P Agustín Martínez les agradezco sus enseñanzas, tiempo y consejos que han enriquecido mi comprensión en diferentes temas y han influido positivamente en mi formación académica.

A mis compañeros de clase gracias por compartir este viaje conmigo, por las discusiones enriquecedoras y el compañerismo. Pero sobre todo muchas gracias por apoyarme a seguir mis intereses. Fueron un pilar muy importante en este proceso.

Finalmente, agradezco a CONAHCYT, por su generoso respaldo económico y recursos que han hecho posible la realización de este trabajo.

RESUMEN

Actualmente, la humanidad se encuentra enfrentándose a diversos retos, los cuales incluyen el cambio climático, la escasez de agua, la desigualdad, el hambre, entre otros. Debido a esto, la Organización de las Naciones Unidas en el 2015 aprobó la agenda 2030 que contiene los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); lo anterior con la finalidad de proteger al planeta y garantizar el bienestar de todos. Dentro de estos objetivos se encuentra el ODS7, el cual tiene como meta para el 2030 contar con energía asequible y no contaminante; una alternativa para lograr este objetivo es el cambio del diésel fósil por el biodiésel producido a partir de diversas materias primas. Entre los diferentes tipos de materias primas destacan los residuos por su bajo costo, alta disponibilidad, aunado a que su revalorización permite resolver el problema de contaminación asociado a su acumulación e inadecuada disposición.

Por otra parte, en los últimos años se ha estudiado el impacto ambiental de los procesos de producción de biocombustibles mediante la evaluación del ciclo de vida; ésta es una metodología que permite, de manera objetiva, estimar y evaluar los impactos que un producto o servicio puede tener sobre el medio ambiente durante todas las etapas de su vida. El objetivo de la investigación a desarrollar es evaluar el cumplimiento del estándar de sustentabilidad RSB-STD-01-011 mediante la metodología del análisis del ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir del aceite de insectos mediante el uso del software GREET. El uso de esta materia prima recientemente ha sido reportado para la producción de biodiésel; no obstante, no se ha determinado si esta ruta de conversión es sustentable.

ABSTRACT

Currently, humanity is facing various challenges, which include climate change, water scarcity, inequality, hunger, among others. Due to this, the United Nations Organization in 2015 approved the 2030 agenda that contains the Sustainable Development Goals (SDGs); the above in order to protect the planet and guarantee the well-being of all. Among these objectives is SDG7, which aims to have affordable and non-polluting energy by 2030; An alternative to achieve this objective is to change fossil diesel for biodiesel produced from various raw materials. Among the different types of raw materials, waste stands out for its low cost, high availability, coupled with the fact that its revaluation allows solving the pollution problem associated with its accumulation and inadequate disposal.

On the other hand, in recent years the environmental impact of biofuel production processes has been studied through life cycle assessment; This is a methodology that allows, objectively, to estimate and evaluate the impacts that a product or service can have on the environment during all stages of its life. The objective of the research to be developed is to evaluate compliance with the sustainability standard RSB-STD-01-011 through the methodology of life cycle analysis of biodiesel production from insect oil using the GREET software. The use of this raw material has recently been reported for the production of biodiesel; however, it has not been determined whether this conversion route is sustainable.

ÍNDICE

	Dedicatoria	3
	Agradecimientos	4
	Resumen	5
	Abstract	6
I.	Introducción	12
II.	Antecedentes.....	12
2.1	Cambio climático y los objetivos del desarrollo sostenible	14
2.2	Biodiésel	16
2.2.1	Proceso de producción de biodiésel	16
2.2.2	Materias primas	18
2.2.2.1	Materias primas de primera generación	18
2.2.2.2	Materias primas de segunda generación	19
2.2.2.3	Materias primas de tercera generación	19
2.2.2.4	Materias primas de cuarta generación	19
2.2.2.5	Materias primas residuales	20
2.3	Aceite de insectos para biodiésel	22
2.4	Larva de mosca soldado negra	23
2.5	Estándar ASTM D6751	25
2.6	ISO 14000	26
2.7	Análisis de ciclo de vida	27
2.7.1	Definición de objetivo y alcance	27
2.7.2	Análisis de inventario de ciclo de vida	28
2.7.3	Evaluación de los impactos potenciales del ciclo de vida	29
2.7.4	Interpretación de resultados	29
2.8	La Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles	29
2.9	GREET	31
2.10	Eco Indicador 99	32
III.	Justificación	33
IV.	Descripción del problema	33
V.	Hipótesis	34
VI.	Objetivos	34

6.1	Objetivo general	34
6.2	Objetivos específicos	34
VII.	Metodología	34
7.1	Obtención del biodiésel	35
7.1.1	Obtención de BSFL	36
7.1.2	Extracción de aceite	36
7.1.3	Rendimiento de conversión a biodiésel	38
7.2	Análisis de ciclo de vida	38
7.2.1	Definición de objetivo y alcance	38
7.2.2	Análisis del inventario de ciclo de vida	39
7.2.3	Evaluación de los impactos potenciales del ciclo de vida	39
7.2.4	Interpretación de resultados	39
7.3	Cumplimiento del estándar RSB-001-010	40
7.3.1	Recolección de datos de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL	40
7.3.2	Cálculo de emisiones evitadas	40
7.3.3	Conversión de emisiones	40
7.3.4	Sumatoria de emisiones e integración de emisiones evitadas	40
7.3.5	Verificación del cumplimiento	40
VIII.	Resultados y discusión	41
8.1	Proceso de producción de biodiésel	41
8.1.1	Contenido de aceite	41
8.1.2	Rendimiento de conversión del biodiésel	41
8.2	Análisis de ciclo de vida	42
8.2.1	Definición de objetivo y alcance	42
8.2.2	Análisis del inventario de ciclo de vida (AICV)	44
8.2.2.1	AICV de la obtención y acondicionamiento de la materia prima	44
8.2.2.2	AICV de la producción del combustible	47
8.2.2.3	AICV del transporte de la materia prima y distribución del combustible...	51
8.2.2.4	AICV del uso del combustible	52
8.2.3	Evaluación de los impactos potenciales del ciclo de vida (EICV)	53
8.2.3.1	Categoría de daños a la salud humana	54
8.2.3.2	Categoría de daños a la calidad de los ecosistemas	56

8.2.3.3	Categoría de daños a los recursos	58
8.2.4	Interpretación de resultados	60
8.3	Cumplimiento del estándar RSB-STD-001-010	64
8.3.1	Recolección de datos de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL	64
8.3.2	Cálculo de emisiones evitadas	65
8.3.3	Conversión de emisiones	66
8.3.4	Sumatoria de emisiones e integración de emisiones evitadas	67
8.3.5	Verificación del cumplimiento	68
IX	Conclusiones	69
X	Referencias	70

Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las diferentes generaciones de materias primas para la producción de biodiésel, obtenido de Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2021).	20
Tabla 2 Materias primas residuales estudiadas para la producción de biodiésel.....	21
Tabla 3 Contenido de aceite de diferentes variedades de larvas de insectos	22
Tabla 4 Perfil de ácidos grasos (FAME) contenidos en diferentes variedades de larvas de insectos	23
Tabla 5 Condiciones de operación utilizadas para la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL.....	24
Tabla 6 Requisitos detallados para componentes de biodiésel de acuerdo al estándar ASTM D6751	25
Tabla 7 Contenido de aceite extraído de BSFL utilizando el método Soxhlet.....	41
Tabla 8 Inventario para la obtención y acondicionamiento de la materia prima.....	45
Tabla 9 Inventario para la producción de biodiésel.	49
Tabla 10 Emisiones producidas por las etapas de transporte y distribución.....	51
Tabla 11 Impacto ambiental de diferentes mezclas de biodiésel a partir BSFL en comparación con diésel convencional.....	62
Tabla 12 Recolección de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL establecidas por el estándar RSB-STD-01-10.....	65
Tabla 13 Emisiones liberadas por la revalorización de suero de queso como alimento de BSFL	66
Tabla 14 Factores de conversión de emisiones a kgCO ₂	66
Tabla 15 kg de CO _{2e} emitido por la producción de una tonelada de biodiésel a partir de aceite de BSFL	67

Índice de figuras

Figura 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible.	15
Figura 2 Etapas del análisis del ciclo de vida.	27
Figura 3 Diagrama de los límites del sistema del ACV.	28
Figura 4 Diagrama de flujo de la metodología realizada	35
Figura 5 Trituración de BSFL seca. a) BSFL antes de la trituración. b) BSFL triturada	36
Figura 6 Extracción de aceite mediante soxhlet.....	37
Figura 7 Límites del sistema del ACV para la producción de biodiésel a partir de larvas BSFL.	42
Figura 8 Etapas consideradas para la producción de biodiésel de segunda generación.....	43
Figura 9. Etapas consideradas para la producción del diésel a partir de petróleo	43
Figura 10 Esquema de entradas y salidas en la sección de obtención y acondicionamiento de materia prima para el biodiésel de BSFL.	44
Figura 11. Emisiones generadas de la obtención y acondicionamiento de la materia prima.	46
Figura 12 Esquema de entradas y salidas en la sección de producción de biodiésel.....	48
Figura 13 Emisiones generadas por la producción del combustible	50
Figura 14 Esquema de las distancias a recorrer en el proceso de producción de biodiésel	51
Figura 15 Emisiones generadas por el transporte de la materia prima y distribución del combustible	52
Figura 16. Emisiones generadas por el uso del combustible.....	53
Figura 17 Evaluación de los daños a la salud ocasionados por el proceso de producción del combustible.	56
Figura 18 Evaluación de daños a la calidad de los ecosistemas.....	58
Figura 19 Evaluación de daños a los recursos.....	59
Figura 20 Comparación de los impactos potenciales del ciclo de vida del biodiésel y diésel.....	61
Figura 21 Gráfico de tendencias para cada categoría de impacto obtenida mediante R studio.	63

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se enfrenta a una serie de desafíos; uno de los principales es el cambio climático, el cual, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés UNFCCC) se define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana; el cambio climático altera la composición de la atmósfera mundial, y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante los últimos años (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992). Desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas; esto conlleva a la emisión de gases de efecto invernadero que al incrementar su concentración en la atmósfera terrestre ocasionan una elevación de la temperatura (Rodríguez Becerra y Mance, 2009).

La humanidad, para satisfacer sus necesidades energéticas, utiliza grandes cantidades de combustibles fósiles; los sectores con mayor consumo energético corresponden al sector industrial y de transporte (Gómez-Castro et al., 2015; Quiroz-Pérez et al., 2019). En particular, la energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático, y representa alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2022). Las emisiones asociadas al empleo de la energía comprenden la liberación de varios gases, tales como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), entre otros (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992).

El uso de los combustibles fósiles, además de ser un motor para el cambio climático, también presenta la desventaja de ser un recurso no renovable; por lo tanto, el crecimiento de la población mundial y el desarrollo económico provocan que el consumo de energía y su demanda aumente en todo el mundo. Lo anterior ocasiona que las reservas de los combustibles fósiles disminuyan progresivamente, y se espera que se agoten en un futuro próximo (Zheng et al., 2012).

Una de las estrategias para mitigar los problemas mencionados anteriormente contempla la producción y uso de biocombustibles, los cuales se refieren a la biomasa vegetal y los productos refinados que se queman para obtener energía (Guo et al., 2015); éstos, a diferencia de los productos derivados del petróleo, son renovables, biodegradables y respetuosos con el medio ambiente (Zabermawi et al., 2022).

Entre los diferentes biocombustibles comerciales, el biodiésel es una prometedora alternativa al diésel de petróleo, y recientemente ha atraído una gran atención en el sector de transporte (terrestre, marino, aéreo) de todo el mundo (Rajaeifar et al., 2019). Además de su uso en el transporte, el biodiésel también encuentra aplicación como combustible sustituto en la generación de electricidad, donde actualmente el combustible usado es petrodiesel. Además, el biodiésel es un candidato favorable para ser utilizado en maquinaria de construcción y tanques militares como combustible alternativo (Akram et al., 2022).

El biodiésel, comúnmente, se compone de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena extensa, que se pueden obtener a partir de lípidos renovables (Chowdhury et al., 2021). Las materias primas utilizadas para la producción de biodiésel generalmente se clasifican en cuatro grupos diferentes, los cuales son materias primas de primera, segunda, tercera y cuarta generación.

Las materias primas mencionadas anteriormente presentan desventajas en la producción de biodiésel. Por ejemplo, la producción de biodiésel a partir de materias primas de primera generación provienen de cultivos alimentarios, pudiendo provocar una escasez de las fuentes de alimentos, aumentando así los costos de ellos y afectando la seguridad alimentaria (Raksasat et al., 2021). Además, el área de cultivo necesaria para producir materias primas de primera y segunda generación es grande, comprometiendo el área destinada de producción de alimentos (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2021). Por último, la viabilidad económica de la comercialización de biocombustibles de tercera y cuarta generación se ve limitada por algunos obstáculos, como el alto costo de producción debido a las composiciones lipídicas y la tecnología que requiere para su producción (Feng et al., 2019).

Para resolver los problemas mencionados anteriormente se ha prestado atención a la utilización de grasas de insecto como materia prima para la producción de biodiésel; lo anterior debido a que el contenido de grasa de los insectos puede oscilar entre el 2 % y el 50 % por peso seco de insectos. Algunas especies de insectos que se han estudiado como materia prima en la producción de biodiésel son la larva de la mosca doméstica, la larva de la mosca soldado negra, y el escarabajo amarillo del gusano de la harina (Akram et al., 2022).

En particular, se ha encontrado que el biodiésel que se produce a partir de lípidos de la larva de la mosca soldado negra (por sus siglas en inglés BSFL) es sostenible; lo anterior dado que no necesita una gran área de cultivo ni fertilizantes para apoyar su crecimiento. La BSFL puede crecer fácilmente en los desechos de alimentos, estiércol animal, desechos agrícolas, e incluso

heces humanas, asumiendo el papel de la gestión de desechos simultáneamente (Seng Liew et al., 2023). Debido a que el campo de investigación del uso de insectos como materia prima para la producción de biodiésel es relativamente nuevo, aún se requieren estudios detallados para analizar el rendimiento e impacto ambiental del biodiésel obtenido a partir de este tipo de materias primas (Mathew et al., 2021).

Por lo tanto, es importante demostrar que la producción de biodiésel a partir del aceite de la BFSL es ambientalmente viable (Toldrá-Reig et al., 2020); esto se puede llevar a cabo realizando un análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es una metodología utilizada para evaluar el impacto ambiental que se atribuye al proceso de producción de un bien, en este caso biodiésel (Chung et al., 2019). Existen varios softwares para llevar a cabo este análisis tales como GREET, SimaPro, Open LCA. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar el cumplimiento del estándar de sustentabilidad RSB-STD-01-011 mediante la metodología del análisis del ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir del aceite de insectos mediante el uso del software GREET.

II. ANTECEDENTES

2.1 Cambio climático y los Objetivos del Desarrollo Sostenible

Actualmente, el mundo se encuentra enfrentándose a una serie de desafíos; uno de los principales es el cambio climático. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés UNFCCC), el cambio climático se define como la variación de clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana. El cambio climático altera la composición de la atmósfera mundial, y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992). Desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas; esto conlleva la emisión de gases de efecto invernadero que al incrementar su concentración en la atmósfera terrestre ocasionan una elevación de la temperatura (Rodríguez Becerra y Mance, 2009).

Con la finalidad de mitigar el cambio climático se han creado acuerdos globales, entre los que destacan los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). En la Figura 1 se pueden observar los 17 ODS, los cuales incluyen la eliminación de la pobreza, el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente. En particular, la energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático, y representa alrededor del 60% de todas

las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2022); por ello, el ODS 7 se refiere a la generación de energía asequible y no contaminante, en donde se tiene como meta garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.



Figura 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En particular, el ODS 7 tiene como metas para el 2030 garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, así como aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas. También se incluyen como metas incrementar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles. Finalmente se considera promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.

Una de las estrategias para lograr lo mencionado anteriormente contempla la producción y uso de biocombustibles, los cuales se refieren a la biomasa vegetal y los productos refinados que se queman para obtener energía (Guo et al., 2015); éstos, a diferencia de los productos derivados del petróleo, son biodegradables y respetuosos con el medio ambiente (Zabermawi et al., 2022).

2.2 Biodiésel

Los biocombustibles, al igual que los combustibles fósiles, se pueden encontrar en diferentes estados, incluyendo líquido (bioetanol, biodiésel, bioturbosina), gaseoso (biogás) y sólido (pellets, briquetas) (Shahid et al., 2021). Entre los diferentes biocombustibles comerciales, el biodiésel es una alternativa prometedora al diésel de petróleo, y recientemente ha atraído una gran atención en el sector de transporte (terrestre, marino, aéreo) de todo el mundo (Rajaeifar et al., 2019). Además de su uso en el transporte, el biodiésel también encuentra aplicación como combustible sustituto en la generación de electricidad, donde actualmente el combustible usado es petrodiésel. Además, el biodiésel es un candidato favorable para ser utilizado en maquinaria de construcción y tanques militares como combustible alternativo (Akram et al., 2022).

El biodiésel es un biocombustible líquido de color amarillo, el cual se compone de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga C14-C20 (Guo et al., 2015; Krishnasamy y Bukkarapu, 2021; Babadi et al., 2022; Priya et al., 2023); el biodiésel se obtiene de materia prima rica en triglicéridos así como aceites vegetales o grasas de animales mediante la reacción de transesterificación (Gasca-González et al., 2018; Sosa-Rodríguez y Vazquez-Arenas, 2021). Los principales ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) que mayormente se encuentran en el biodiésel son miristato de metilo, palmitato, estearato, oleato, linoleato y linolenato, los cuales varían en el rango de 0 a 17%, 6 a 38%, 2 a 35%, 6–72%, 2–53% y 0–55%, respectivamente (Krishnasamy y Bukkarapu, 2021).

En general, el biodiésel tiene propiedades de aceite únicas; por ejemplo, valores más altos de números de cetano, mayor eficiencia en la combustión (Hamza et al., 2021). Entre las principales ventajas del biodiésel frente al diésel de petróleo se pueden mencionar que es un recurso renovable, genera menores emisiones de gases de efecto invernadero y no es tóxico (Gómez-Castro et al., 2015).

2.2.1 Proceso de producción de biodiésel

Existen cuatro métodos principales mediante los cuales se puede obtener biodiésel: 1) uso directo de aceites mezclados (dilución), 2) micro emulsión de aceites, 3) craqueo térmico de aceites (pirólisis), y 4) transesterificación. A continuación, las tres primeras técnicas son descritas brevemente, mientras que el método de transesterificación se describe a detalle.

En el método de mezcla directa de aceites, la materia prima de aceite se diluye con diésel de petróleo para mejorar la viscosidad. Esto se debe a que la viscosidad del aceite vegetal crudo es

de 10 a 17 veces mayor que la del diésel de petróleo (Babadi et al., 2022). Por otra parte, la micro emulsión se lleva a cabo utilizando disolventes como metanol, etanol, hexanol, octanol y 1-butanol. Las micro emulsiones de aceites vegetales con tales solventes pueden cumplir con los requisitos de viscosidad de la norma del combustible diésel. Sin embargo, el biocombustible producido por dicho método provoca grandes depósitos de carbono, emisiones de ruido y productos de combustión incompleta (Gürü y Keskın, 2016). En contraparte, la pirólisis transforma un material en otro usando calor o con la ayuda de catalizadores en ausencia de oxígeno; este proceso es obsoleto y por lo tanto se utilizan nuevos procesos para la obtención de biodiésel (Maheshwari et al., 2022).

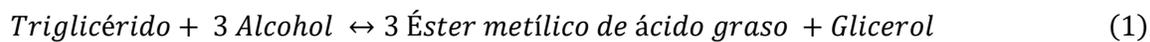
Convencionalmente, el biodiésel se produce a través del proceso de transesterificación, también conocido como “alcoholisis”. En este proceso, la ruptura de las moléculas de grasa/aceite (triglicéridos) se lleva a cabo mediante el uso de un catalizador y alcohol como disolvente para producir éster metílico de ácido graso (FAME), es decir, biodiésel y glicerina como subproducto (Hamza et al., 2021). El metanol, el etanol, el propanol, el butanol y el alcohol amílico son los alcoholes más comunes que se usan en este proceso (Babadi et al., 2022).

La reacción de transesterificación utiliza catalizadores con la finalidad de acelerar la tasa de conversión de los aceites/grasas a biodiésel; estos catalizadores pueden ser de varios tipos:

- Catalizador ácido homogéneo (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fosfórico)
- Catalizador ácido heterogéneo (zeolitas, resinas sulfónicas, etc.)
- Catalizador básico homogéneo (hidróxido sódico, hidróxido potásico)
- Catalizador básico heterogéneo (óxidos de calcio, óxidos de magnesio)
- Catalizador enzimático

El catalizador básico homogéneo es el catalizador más utilizado para la producción industrial de biodiésel. Esto se debe a la alta velocidad de reacción del proceso catalizado; además, la transesterificación catalizada por bases es aproximadamente 4,000 veces más rápida que la transesterificación catalizada por ácidos (Mohiddin et al., 2021).

El proceso de transesterificación se completa en tres pasos. En la primera etapa tiene lugar la conversión de triglicéridos a diglicéridos. En la segunda etapa, los diglicéridos se convierten en monoglicéridos; y, en el tercer paso se produce la conversión de monoglicéridos en FAME (Maheshwari et al., 2022). La ecuación general de la transesterificación se muestra a continuación.



En el proceso de producción de biodiésel, se tiene un subproducto de valor que es el glicerol, y aproximadamente, se puede producir un mol de glicerol ($C_3H_8O_3$) a partir de 3 moles de FAME, que aproximadamente tiene un peso molecular de 250 g/gmol, lo que equivale aproximadamente al 10% del peso del producto obtenido (Pirzadi y Meshkani, 2022). Este subproducto se utiliza en varias industrias; por ejemplo, en farmacéutica, éste actúa como excipiente en medicamentos y jarabes, mientras que en cosmética se emplea como hidratante en cremas y lociones. También en la industria alimentaria, el glicerol sirve como humectante y edulcorante, y se usa en la producción de productos químicos, fertilizantes, detergentes, así como materia prima para otros compuestos industriales (Monteiro et al., 2018; Liu et al., 2022).

Es importante mencionar que las especificaciones técnicas del biodiésel, así como sus mezclas, se establecen en la norma ASTM D6751 para Estados Unidos, y EN14214 para los países europeos (Guo et al., 2015; Sosa-Rodríguez y Vazquez-Arenas, 2021).

2.2.2 Materias primas

El biodiésel se puede producir a partir de diferentes materias primas para diversas aplicaciones, con el objetivo general de contribuir a satisfacer la demanda mundial de energía y minimizar los impactos ambientales (Priya et al., 2023). El paso principal para la producción de biodiésel es la selección de la materia prima, la cual tiene influencia en varios factores, como la pureza del biodiésel, el costo, la composición y el rendimiento (Mathew et al., 2021; Singh et al., 2020). Dependiendo de la fuente de materia prima, éstas se pueden clasificar en cuatro categorías diferentes, las cuales son primera, segunda, tercera y cuarta generación (Mohiddin et al., 2021; Bashir et al., 2022).

2.2.2.1 Materias primas de primera generación

Las materias primas de primera generación se extraen principalmente del aceite de cultivos comestibles. Algunos ejemplos de este tipo de materia prima son el aceite de colza, palma, girasol y soja. Las materias primas de primera generación son las más utilizadas debido a su disponibilidad para respaldar suficientemente la demanda de biodiésel (Mohiddin et al., 2021). En comparación con otras materias primas, la ventaja más destacada de los biocombustibles de primera generación es la alta eficiencia de conversión; estos biocombustibles tienen un alto rendimiento energético y, por lo tanto, son económicamente rentables (Mathew et al., 2021). Sin embargo, la principal desventaja de usar estas materias primas es la reducción del suministro de

alimentos, lo que podría aumentar sus precios; además, este tipo de materia prima requiere una cantidad trascendental de fertilizantes, agua y tierra de cultivo, para cubrir ambas necesidades (Singh et al., 2020, Bashir et al., 2022).

2.2.2.2 Materias primas de segunda generación

Para reducir la demanda de aceites comestibles, el biodiésel se puede producir a partir de cultivos que son fuentes de aceite no comestible como material lignocelulósico, paja de cereal, bagazo de caña de azúcar, residuos forestales, desechos agrícolas, aceite residual de cocina, desechos sólidos municipales, pastos vegetativos, jatropha, madera; a éstas se les denominan materias primas de segunda generación (Mathimani y Pugazhendhi, 2019). Esta fuente se vuelve más atractiva y prometedora para la producción sustentable de biodiésel. Las materias primas de segunda generación se pueden cultivar en terrenos marginales, baldíos o áridos que requieren menos agua (Dewangan et al., 2018). Sin embargo, la producción de biocombustibles de segunda generación presenta sus propios desafíos debido a la complejidad de la biomasa y los problemas asociados con su producción, transporte, cosecha y tratamiento antes de la producción de biocombustibles (Kargbo et al., 2021).

2.2.2.3. Materias primas de tercera generación

El biodiésel de tercera generación se obtiene partir de microalgas; en la actualidad, se cree que es una opción plausible como fuente de energía sostenible para la producción de biocombustibles, al superar las debilidades de las biomásas de primera y segunda generación. Este tipo de materia prima puede producir hasta 20 veces más bio-aceite que los cultivos tradicionales por área, y no se requiere tierra agraria de alta calidad para la producción de biomasa de microalgas (Chowdhury et al., 2019). Sin embargo, la materia prima de tercera generación tiene limitaciones, como los altos costos de producción a escala industrial. Además, el biodiésel derivado de algas marinas es menos estable que los biocombustibles producidos a partir de otras fuentes. El aceite generado por las algas es altamente insaturado, lo que afecta negativamente la estabilidad oxidativa del biodiésel resultante, especialmente en climas cálidos (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2021).

2.2.2.4 Materia prima de cuarta generación

Microorganismos modificados genéticamente, como las cianobacterias, las levaduras, y los hongos se utilizan como fuente de materias primas de cuarta generación para producir biodiésel. El objetivo principal de las modificaciones de microorganismos es crear un sumidero de carbono

sintético para eliminar o minimizar el carbono, y mejorar el rendimiento de los hidrocarburos (Osman et al., 2021).

Las ventajas y desventajas de las diferentes generaciones de materias primas para la producción de biodiésel se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las diferentes generaciones de materias primas para la producción de biodiésel, obtenido de Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2021).

Materia prima	Ventajas	Desventajas
Primera generación	La materia prima se puede producir rápidamente mediante la infraestructura y la tecnología ya existentes.	Reducción en suministro de alimentos. Requiere muchos insumos en fertilizantes, agua y área de tierra.
Segunda generación	La materia prima se puede producir rápidamente mediante la infraestructura y la tecnología ya existentes. El uso de plantas enteras en lugar de sólo semillas o granos y residuos significa más energía producida por hectárea de tierra. Las tierras marginales se pueden utilizar para plantar materia prima.	La tierra necesaria para producir materia prima de segunda generación es considerable. El uso de residuos agrícolas y forestales degrada la calidad del suelo, y también induce la erosión del suelo.
Tercera generación	Las algas utilizadas en este tipo de biocombustible son completamente renovables. Se prevé que las algas produzcan más energía por acre que los cultivos convencionales. Las algas se pueden cultivar utilizando tierra y agua no aptas para la producción de alimentos, lo que reduce la presión sobre los recursos hídricos que ya están bajo presión. Mejora el rendimiento de los biocombustibles de primera y segunda generación cuando se emplean en biocombustibles integrados.	Requiere nuevas tecnologías desde la producción de materia prima hasta el procesamiento en el producto final de biocombustible.
Cuarta generación	Se prevé que las algas produzcan más energía por acre que los cultivos convencionales. Las materias primas sintéticas para producir biocombustibles son una posibilidad.	Requiere nuevas tecnologías desde la producción de materia prima hasta el procesamiento en el producto final de biocombustible.

2.2.2.5 Materias primas residuales

Con base en los datos de la Tabla 1 se observa que el principal obstáculo para la comercialización del biodiésel es el costo de producción, el cual se debe principalmente a dos aspectos: materia prima y el procesamiento (Manzano-Agugliaro et al., 2012). El costo de producción se puede reducir utilizando materias primas que no requieran tierra cultivable, que no dependan de las temporadas de cultivo y que den valor agregado a los residuos, ayudando también a su reuso. Para lograr lo mencionado anteriormente, en los últimos años se ha estudiado el uso de aceites

residuales como materia prima, por ser una alternativa más económica. La Tabla 2 muestra una revisión de las materias primas residuales que se han estudiado para la producción de biodiésel.

Tabla 2 Materias primas residuales estudiadas para la producción de biodiésel

Autor	Materia prima residual
Morais et al. (2010)	Aceite vegetal residual
Dufour and Iribarren (2012)	Aceite residual de cocina, sebo de res, grasa de ave, y lodos residuales
Mu et al. (2016)	Lodos de agua residual
Chung et al. (2019)	Aceite residual de cocina
Aghbashlo et al. (2020)	Aceite residual de cocina
Foteinis et al. (2020)	Aceite residual de cocina
Al-Mawali et al. (2021)	Aceite de semilla de dátil de desecho
Al-Muhtaseb et al. (2022)	Semillas de <i>Prunus Armeniaca</i> de desecho
Bhonsle et al. (2022)	Aceite residual de cocina
Corral-Bobadilla et al. (2022)	Aceite residual de cocina
Kiehbardroudezhad et al. (2023)	Desechos de pescado
Vargas-Ibáñez et al. (2020)	Sebo de res
Al-Muhtaseb et al. (2021)	Residuos de aceite de semilla de níspero
Tu and McDonnell (2016)	Aceites y grasas contenidas en trampa de grasa
Sajid et al. (2016)	Aceite residual de cocina
Xu et al. (2022)	Aceite de residual de cocina y sebo de cerdo
Vionery-Portillo et al. (2020)	Aceite residual de cocina
Forcina et al. (2023)	Café molido gastado
Seng Liew et al. (2023)	Larva de mosca soldado negra

De la Tabla 2 se puede observar que materia prima residual más estudiada en la literatura es el aceite de cocina usado (por sus siglas en inglés WCO) que corresponde al 41.7% de los trabajos revisados; posteriormente, se encontraron estudios que utilizan grasas animales como materia prima residual lo que corresponde al 20.83% de los estudios revisados. Finalmente se encontraron reportes con otras materias primas residuales poco estudiadas que son desechos agrícolas, aceite usado obtenido del tratamiento de aguas residuales, grasas y aceites contenidos en trampas de grasa, residuos de café molido usado y aceite de insectos (larva de mosca soldado) que corresponden al 16.66%, 8.33%, 4.16%, 4.16%, y 4.16% respectivamente.

En particular, recientemente ha aumentado el interés por el uso del aceite de insectos como una materia prima alternativa para la industria del biodiésel, ya que cumple con todos los requisitos anteriores (Leiva-Candia y Dorado, 2014). Varios autores han afirmado que los insectos, a lo largo de su ciclo de vida, pueden ser alimentados con subproductos agrícolas, industriales o urbanos para acumular grandes cantidades de grasas con propiedades físicas y químicas deseables; algunas de estas propiedades incluyen viscosidad cinemática, poder calorífico, estabilidad a la oxidación (ácidos grasos en el rango C16-C18), las cuales facilitan su conversión a biodiésel. Además, la proteína resultante también se puede utilizar como insumo para la alimentación animal (Pinzi et al., 2014).

2.3 Aceite de insectos para biodiésel

Recientemente, para solucionar los problemas mencionados anteriormente, las larvas de los insectos han atraído mucha atención como fuente de materia prima para producir biodiésel; lo anterior, debido a su alto contenido de grasa, ciclos de vida cortos y altas tasas de producción (Nguyen et al., 2018).

Los insectos almacenan energía en forma de triglicéridos (lípidos) en la célula principal de su cuerpo. Dado que los desechos de alimentos y subproductos agrícolas, industriales o urbanos son un alimento para los insectos, una variedad de componentes químicos de los desechos pueden transformarse en lípidos en las células grasas de los insectos mediante su metabolismo (Pinzi et al., 2014; Park et al., 2022). Por lo tanto, el uso de este tipo de materias primas tiene la ventaja de contribuir con el manejo y eliminación de residuos.

Para la producción de biodiésel se ha estudiado una variedad de especies de larvas de insectos que incluyen a las moscas de la carne, termita macro terma, escarabajos gusanos de la harina, moscas domésticas, moscas azules, y moscas soldado negras (Mohan et al., 2023; Sitepu et al., 2023). El contenido de aceite para cada tipo de larva de insecto mencionados anteriormente se incluye en la Tabla 3.

Tabla 3 Contenido de aceite de diferentes variedades de larvas de insectos

Especie de larva de insecto	Contenido de aceite (%)	Referencia
Gusanos de la harina (<i>Zophobas morio</i>)	33.1	Leung et al. (2012)
Mosca de la carne (<i>Boettcherisca peregrine</i>)	31.1	Yang et al. (2012)
Mosca azul (<i>C. megacephala</i>)	24.4-26.29	Yang et al. (2012)
Termita macroterma (<i>Macrotermes nigreriensis</i>)	28.37	Mbah y Elekima (2007)
Mosca doméstica	21.6	Wong et al. (2018)
Mosca soldado negra (<i>Hermetia illucens</i>)	30-40	Kaczor et al. (2023)

La BSFL destaca en la producción de biodiésel no sólo por su alto contenido de aceite, sino también se puede observar en la Tabla 4 que destaca por el perfil de ácidos grasos. El aceite de este insecto contiene un elevado porcentaje de ácido láurico (C12:0) con un 23.6%, lo que mejora la estabilidad del biodiésel al reducir la tendencia a la oxidación. Además, presenta un competitivo 23.2% de ácido oleico (C18:1), que contribuye a un equilibrio favorable en el perfil de ácidos grasos, mejorando la fluidez y el rendimiento a bajas temperaturas. Aunque el contenido de ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico (C18:2) y el ácido linolénico (C18:3) es relativamente bajo, la combinación de ácidos grasos saturados y monoinsaturados en la BSFL

resulta en un perfil atractivo que puede optimizar la estabilidad, la combustión eficiente y el comportamiento en condiciones extremas del biodiésel.

Tabla 4 Perfil de ácidos grasos (FAME) contenidos en diferentes variedades de larvas de insectos

	Contenido FAME en %					
	BSFL	<i>Zophobas morio</i>	<i>B. Peregrine</i>	<i>C. megacephala</i>	<i>Macrotermes nigrieriensis</i>	Mosca doméstica
C12:0	23.6	-	-	-	-	0.35
C14:0	5	-	1.4	3.9	2.58	5.15
C15:0	-	-	1.6	0.3	-	0.33
C16:0	20.36	32.74	18.9	35.5	34.7	28.59
C17:0	-	0.58	0.4	0.3	-	1.25
C18:0	4.6	9.36	0.2	2.8	10.04	6.55
C16:1	2.7	2.16	18.3	13	5.68	18.93
C18:1	23.2	29.43	44.5	24.4	45.88	23.11
C18:2	15.9	22.53	4.1	15.3	-	11.38
C18:3	-	0.85	7.6	1.3	-	

2.4 Larva de mosca soldado negra

Entre los estudios utilizando larvas de insectos, se ha observado que las larvas de la mosca soldado negra (por sus siglas en inglés BSFL) destacan debido a que su contenido de lípidos puede llegar hasta el 40% (Kaczor et al., 2023); este porcentaje está directamente influenciado por el tipo de medio de alimentación utilizado (Wong et al., 2021). Se ha encontrado que el perfil de ácidos grasos de este tipo de lípidos comprende principalmente C12, C16 y C14. Este tipo de grasas presentan propiedades físicas y químicas deseables; algunas de estas propiedades incluyen viscosidad cinemática, la estabilidad a la oxidación y el poder calorífico que conducen a una mayor conversión en biodiésel (Manzano-Agugliaro et al., 2012; Pinzi et al., 2014; Kim et al., 2021; Raksasat et al., 2021). Es importante mencionar que estas propiedades se ven influenciadas por el residuo empleado para alimentar a las larvas de mosca; por ende, esto afecta también las propiedades y rendimientos del proceso de producción de biodiésel.

La Tabla 5 presenta las condiciones de operación encontradas en la literatura sobre la producción de biodiésel a partir del aceite extraído de las BSFL. Se observa que el sustrato más estudiado para alimentar a las larvas son los desperdicios alimenticios, representando el 46.68% de los estudios seleccionados. Estos desperdicios incluyen restos de cocinas o de restaurantes, como verduras, pollo, ternera, cerdo, arroz, fideos, frutas, entre otros. Además, se identificó el uso de salvado de trigo fermentado y estiércol animal como alimento para las larvas, cada uno representando el 26.66% de los estudios revisados. En cuanto al tiempo de vida o período de

alimentación de las larvas, se encontraron variaciones que van de 8 a 33 días; sin embargo, el periodo más común, encontrado en el 35.71% de los estudios, fue de 20 días.

Por otro lado, se observó que el rendimiento de lípidos extraídos de las BSFL varía entre 22.9% y 56%. Estos porcentajes dependen del tipo de alimento suministrado, el tiempo de vida de la larva, y el método utilizado para la extracción de los lípidos. Los lípidos son una materia prima clave para la producción de biodiésel, y la transformación a biodiésel se realiza mayormente mediante la reacción de transesterificación. Según la literatura, el 42.85% de los estudios realizaron la transesterificación en dos etapas. En este proceso, debido al alto índice de acidez de la grasa de las larvas, primero se debe realizar una esterificación con un catalizador ácido, seguida de una transesterificación con un catalizador alcalino.

El 35.71% de los estudios revisados sobre la conversión de lípidos a biodiésel realizaron una transesterificación directa, en la cual la extracción de lípidos y la transesterificación ocurren al mismo tiempo en un solo paso; esto disminuye el consumo de energía y reduce el tiempo de procesamiento. Otros métodos de transesterificación que recibieron menos atención fueron la transesterificación enzimática y la transesterificación asistida por ultrasonido, las cuales representaron el 14.28% y el 7.16% de los estudios, respectivamente.

Tabla 5 Condiciones de operación utilizadas para la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL

Referencia	Tipo de alimento	Extracción de aceite	rendimiento de lípidos extraído	Proceso de producción biodiésel	Catalizador	Alcohol	Temperatura	Tiempo reacción	Rendimiento
Jung et al. (2022)	Desperdicios alimenticios	Extracción líquido-líquido con n-hexano	42.8%	Transesterificación	KOH	CH ₃ OH	65 °C	8 h	93.80%
Nguyen et al. (2018b)	Salvado de trigo fermentado	n-hexano	ND	Transesterificación directa	H ₂ SO ₄	CH ₃ OH	120 °C	90 min	94.14%
Kathumbi et al. (2022)	Desperdicios de cocina	Extracción por solvente n-hexano	ND	Transesterificación en dos pasos	E. H ₂ SO ₄ T. NaOH sintetizado con ácido cítrico	CH ₃ OH	ND	ND	93.08%
Ishak y Kamari (2019)	Desperdicios de restaurante	Soxhlet con éter de petróleo	56%	Transesterificación en dos pasos	E. H ₂ SO ₄ T. NaOH	CH ₃ OH	50 °C	41 min	97%
Zheng et al. (2012)	Fración sólida de residuos de restaurante después de la extracción de grasa	Extracción con éter de petróleo	39.2%	Transesterificación en dos pasos	E. H ₂ SO ₄ T. NaOH	CH ₃ OH	75 °C	1 h	93.1%
Li et al. (2011a)	Estiércol de ganado Gallinaza Estiércol de cerdo	Extracción con éter de petróleo	29.9% 30.1% 29.1	Transesterificación en dos pasos	E. H ₂ SO ₄ T. NaOH	CH ₃ OH	75 °C	1 h	93%
Nguyen et al. (2017)	Salvado de trigo fermentado	Extracción con n-hexano	ND	Transesterificación enzimática	Lipasa Novozim 435	CH ₃ OH	26 °C	9.48 h	96.18%

Sitepu et al. (2023)	Residuos de endospermo de coco	Extracción Soxhlet con hexano	38.5%	Transesterificación directa a 3000 rpm		NaOH	CH ₃ OH	Temperatura ambiente	20 min	93.8%
Park et al. (2022)	Residuos de comida	Extracción líquida-líquida con hexano	ND	Transesterificación		H ₂ SO ₄	CH ₃ OH	70 °C	6 h	86.51%
Li et al. (2011b)	Estiércol de ganado	Método de inmersión a temperatura ambiente	22.9%	Transesterificación en dos pasos	E T	H ₂ SO ₄ NaOH	CH ₃ OH	73 °C 65 °C	2 h 30 min	ND
Nguyen et al. (2020)	Salvado de trigo fermentado	Disolvente de polaridad conmutable	24.97%	Transesterificación directa		DBU (1,8-diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene)	CH ₃ OH	110 °C	60 min	96.20
Nguyen et al. (2018a)	Salvado de trigo fermentado	Método de inmersión con n-hexano	30.2%	Transesterificación enzimática con acetato de metilo		Novozym 435	NA	39.5 °C	12 h	96.97
Su et al. (2019)	ND	Extracción con solvente asistida por enzimas	36.06%	Transesterificación en dos pasos	E T	H ₂ SO ₄ NaOH	CH ₃ OH	75 °C 65 °C	60 min 30 min	ND
Leong y Kutty (2020)	Desperdicio de fruta y comida	ND	ND	Transesterificación por ultra sonido		H ₂ SO ₄	CH ₃ OH	50 °C	4.25 h	ND

2.5 Estándar ASTM D6751

El estándar ASTM D6751, desarrollado por la American Society for Testing and Materials, define las características del biodiésel B100 y sus mezclas; además, incluye los estándares de los procedimientos de prueba a seguir para evaluar las propiedades tanto del biodiésel B100 como de sus mezclas. La Tabla 6 muestra las características que debe cumplir el biodiésel para que sea apto su uso.

Tabla 6 Requisitos detallados para componentes de biodiésel de acuerdo al estándar ASTM D6751

Propiedad	Unidad	Método de prueba	Valor
Contenido de metanol	% en masa, máx.	EN 14110	0.2
Punto de inflamación	°C, mín.	D93	130
Agua y sedimentos	% en volumen, máx.	D2709	0.05
Viscosidad cinemática	mm ² /s, 40 °C	D445	1.9 a 6
Ceniza sulfatada	% masa, máx.	D874	0.020
Corrosión de tira de cobre	máx.	D130	N°3
Número de cetano	Mín	D613	45
Residuos de carbono	% en masa, máx.	D4530	0.05
Índice de acidez	mg KOH/g máx.	D664	0.5
Glicerina libre	% en masa, máx.	D6584	0.02
Glicerina total	% en masa, máx.	D6584	0.240
Contenido de fósforo	% en masa, máx.	D4951	0.001
Temperatura de destilación	°C máx.	D1160	360
Estabilidad de oxidación	Horas, mín	EN 15751	3

Este estándar es reconocido y utilizado en muchos países como una referencia para asegurar la calidad del biodiésel. En México, los lineamientos que se deben cumplir para permitir el uso del biodiésel se encuentran en el documento titulado “Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros”, en el cual las características de calidad coinciden con el ASTM D6751. (Diario Oficial de la Federación, 2018). Además, en este lineamiento se establece que el biodiésel B100 debe ser mezclado con diésel convencional que cumpla con las especificaciones de la NOM-016-CRE-2016 “Especificación de calidad de petrolíferos” (Diario Oficial de la Federación, 2016).

Esta mezcla asegura que el combustible final tenga la calidad y propiedades necesarias para su uso eficiente y seguro en motores diésel, cumpliendo con los estándares de rendimiento y emisión requeridos. Cabe resaltar que en México no existe una norma que establezca un porcentaje obligatorio para la mezcla de biodiésel; sin embargo, los fabricantes de motores y bombas inyectoras de América Latina, típicamente recomiendan utilizar mezclas con diésel convencional que contengan hasta un 20% de biodiésel (B20) (Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura, 2013).

2.6 ISO 14000

La ISO 14000 es una serie de estándares internacionales desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que proporcionan un marco para la gestión ambiental de las organizaciones. Esta serie de normas está diseñada para ayudar a las organizaciones a minimizar sus impactos negativos en el medio ambiente, cumplir con las regulaciones legales, y mejorar continuamente su desempeño ambiental. Las normas de la serie ISO 14000 son aplicables a cualquier tipo de organización, independientemente de su tamaño, tipo o sector (ISO 14000).

Las normas más utilizadas de esta serie incluyen:

- ISO 14001: Requisitos para un Sistema de Gestión Ambiental (SGA).
- ISO 14004: Directrices generales para la implementación de un SGA.
- ISO 14040: Principios y marco para la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA).

Cada una de estas normas juega un papel importante en ayudar a las organizaciones a reducir su impacto ambiental y mejorar continuamente su desempeño en sostenibilidad. Este trabajo, se centra en la ISO 14040 para evaluar el impacto ambiental de la producción de biodiésel a partir del aceite de las BSFL.

2.7 Análisis de ciclo de vida

El Análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología estandarizada bajo la norma ISO 14040 que permite la evaluación del impacto ambiental potencial a lo largo del ciclo de vida de un proceso, producto o servicio. La aplicación de esta norma permite analizar cada etapa del ciclo de vida del proceso de producción, proporcionando una comprensión detallada de los impactos ambientales asociados y facilitando la identificación de oportunidades para mejorar la sostenibilidad del proceso.

Según la metodología que propone la norma, el ACV se puede dividir en cuatro fases, como se muestra en la Figura 2, objetivo y alcance el estudio, análisis del inventario, evaluación de los impactos ambientales potenciales e interpretación, las cuales se describen a continuación.

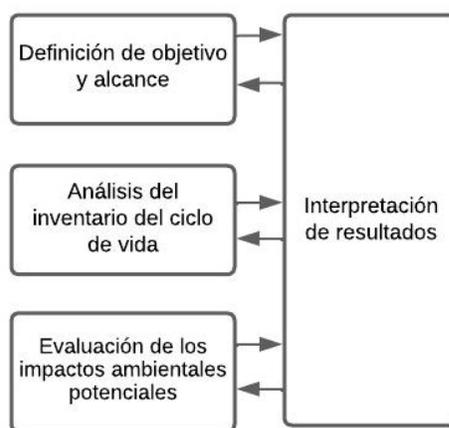


Figura 2 Etapas del análisis del ciclo de vida.

2.7.1 Objetivo y alcance

En la definición del objetivo se deben definir las aplicaciones previstas, las limitaciones, las razones del estudio, el público objetivo, los estudios comparativos y las partes interesadas. La definición del alcance determina qué sistemas de productos se evaluarán, y cómo se llevará a

cabo la evaluación (Vance et al., 2022). Idealmente, un estudio del ACV del proceso de producción de biodiésel debería llevarse a cabo sobre la base de un límite de sistema de ciclo de vida completo; es decir, de la cuna a la tumba el cual incluye la extracción de materias primas y el procesamiento de los materiales necesarios para la producción de componentes y productos, el transporte, el almacenamiento y la distribución, el uso del producto y, finalmente, su reciclaje y/o eliminación de residuo. Sin embargo, debido a limitaciones en términos de tiempo y dinero existen mayor número de estudios en donde se trabaja con el tipo de límite de la cuna a la puerta (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2021); este tipo de estudios abarca el proceso de extracción de la materia prima hasta la producción de biodiésel, y se excluyen las etapas de uso del producto y disposición final (Cárdenas et al., 2022). Otras delimitaciones también utilizadas en la literatura son el límite de puerta a puerta y el límite de cuna a cuna. La Figura 3 muestra las etapas que consideran los diferentes límites del ACV.

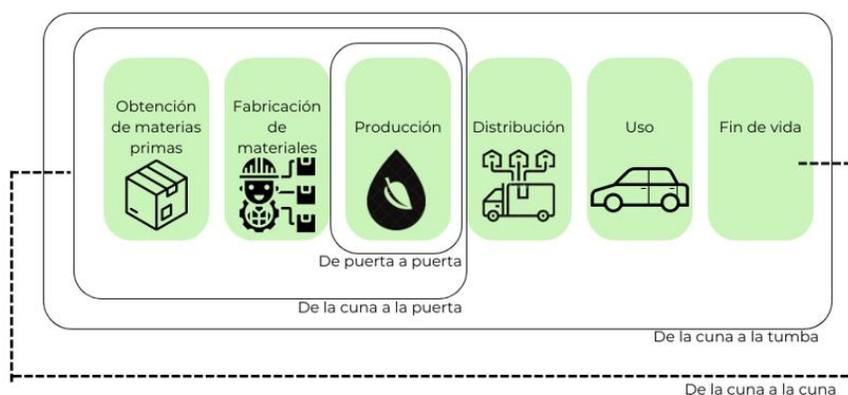


Figura 3 Diagrama de los límites del sistema del ACV.

2.7.2 Análisis del inventario de ciclo de vida

El análisis del inventario es la fase de recopilación y cuantificación tanto de entradas como de salidas, dentro del límite del sistema definido de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Las fuentes de datos, la calidad y su procedimiento de recopilación, así como la metodología aplicada para calcular las emisiones deben presentarse de manera clara e inequívoca; en esta etapa desde el punto de inicio de un ciclo de vida determinado hasta su final (Rajaeifar et al., 2019). Se han desarrollado herramientas que facilitan la cuantificación de los inventarios, tales como SimaPro, ecoinvent, o GREET.

2.7.3 Evaluación de los impactos ambientales potenciales

La evaluación de los impactos ambientales potenciales es un proceso cuantitativo y/o cualitativo, mediante el que se caracterizan y evalúan los efectos de las intervenciones medioambientales identificadas en el inventario. Se debe considerar la salud y seguridad de las personas, así como las cargas ambientales. También se deben identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.

2.7.4 Interpretación de los resultados

En la interpretación de los resultados se incluye la identificación de los aspectos ambientales significativos en el ciclo de vida del producto estudiado. También incluye una evaluación de la confiabilidad del estudio, en términos de integridad, sensibilidad a las incertidumbres en los datos y la metodología, así como consistencia en relación con la definición de la meta y el alcance. Finalmente, esta es la fase en la que se extraen conclusiones, se establecen limitaciones y se hacen recomendaciones (Tillman, 2010).

2.8 La Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles

La Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles (RSB) es una organización global de múltiples partes interesadas independientes que impulsa el desarrollo de una economía circular a escala global, basada en soluciones sostenibles, certificación estándar y asociaciones colaborativas (Russi, 2021). La RSB utiliza esta base para desarrollar proyectos, nuevos conocimientos y soluciones que equipan a los tomadores de decisiones clave para generar impactos positivos netos para las personas y el planeta.

A nivel global, hay un aumento en la demanda de recursos reciclados y biológicos para impulsar una economía circular. Este crecimiento es fundamental para establecer procesos que aseguren la sostenibilidad. El estándar RSB se fundamenta en 12 principios de sostenibilidad y sus criterios subyacentes, diseñados para abordar de manera efectiva los problemas ambientales y sociales cruciales relacionados con el uso de combustibles y productos elaborados a partir de materias primas avanzadas y de base biológica (“RSB Standard Certification System Validation,” 2024).

La producción de biodiésel está cubierta por el estándar RSB-STD-01-010. Este estándar especifica los requisitos para los operadores a lo largo de la cadena de suministro del biocombustible. Algunos de los principios presentes en este estándar son los siguientes:

- Requisito relacionado con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del biocombustible.

Se debe demostrar que las emisiones de GEI del biocombustible producido logra reducir por lo menos un 50%, en comparación con los valores de referencia de las emisiones de GEI del combustible convencional.

- Requisitos relacionados con la conservación de las reservas de carbono.

Se debe demostrar que el biocombustible no fue producido a partir de biomasa obtenida de tierras convertidas después del 1 de enero de 2008 que eran bosques primarios, y/o humedales; esto se debe a que contribuye a la degradación de las reservas, ya que todas estas tierras tienen altas reservas de carbono.

- Requisitos relacionados con la Permanencia de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Cuando el proceso de producción utilice tecnología de captura y secuestro de carbono se debe demostrar que se realizarán actividades para monitorear, mitigar y compensar cualquier incidencia material de no permanencia resultante de las actividades de captura y secuestro de carbono.

- Requisitos relacionados con el uso del agua.

Se debe demostrar que se utilizará el agua de manera eficiente, evitando el agotamiento y/o desperdicio de este recurso.

- Requisito relacionado con el uso del suelo.

Se deben aplicar buenas prácticas en el manejo agrícola y forestal para la producción y obtención de la materia prima o la recolección de residuos, esto con la finalidad de conservar o mejorar la salud del suelo.

- Requisito relacionado con la calidad del aire.

Es de suma importancia comprobar que las emisiones a la atmósfera serán limitadas dentro de su proceso de producción.

- Requisitos relacionados con la conservación.

El biocombustible no se puede producir a partir de biomasa obtenida de áreas que están protegidas por el Estado; se deben seleccionar materias primas de bajo riesgo invasivo para el cultivo. De igual manera, se deben adoptar controles apropiados con la finalidad de evitar la propagación de especies exóticas cultivadas y microorganismos modificados.

- Requisitos relacionados con el manejo de residuos y productos químicos.

Es necesario evidenciar la aplicación de procedimientos operativos que aseguren un manejo responsable del almacenamiento, manipulación y eliminación de los residuos generados durante los procesos de producción, así como de los productos químicos empleados.

- Requisitos relacionados con los derechos humanos y laborales.

Se debe presentar prueba de que la fabricación del biocombustible se llevará a cabo de manera que respete los derechos humanos y laborales.

- Requisito relacionado con los derechos de uso de la tierra.

Se garantizará el respeto de los derechos vigentes sobre la tierra, incluyendo tanto los derechos formales como los informales, como los derechos de los pueblos indígenas, en relación con el uso de la tierra.

- Requisito relacionado con la seguridad alimentaria.

Es necesario evidenciar que la producción de biocombustibles en áreas con inseguridad alimentaria se orientará hacia la mejora de la seguridad alimentaria de las comunidades directamente afectadas.

2.9 GREET

El modelo GREET, desarrollado por el Argonne National Laboratory, es una herramienta de simulación utilizada para analizar el ciclo de vida de los GEI, las emisiones reguladas y el uso de energía de diversas tecnologías y combustibles. El propósito principal de GREET es proporcionar una evaluación integral de los impactos ambientales de diversas fuentes de energía y tecnologías de transporte. La herramienta evalúa desde la extracción de materias primas, el procesamiento de combustibles, hasta el uso final en vehículos, abarcando todas las etapas del ciclo de vida (U.S. Department of Energy, 2019).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés EPA) reconoce su valor y lo utiliza como una herramienta confiable para análisis de emisiones y evaluaciones del ciclo de vida en el sector de transporte (Simpson, 2024). Esta validación por parte de una agencia gubernamental prestigiosa asegura que el modelo utiliza una base de datos confiable y actualizada; esto es fundamental para realizar análisis precisos de emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes regulados y consumo de energía en diferentes tecnologías y combustibles.

Para trabajar con este modelo, el usuario selecciona el proceso a analizar, por ejemplo, el uso de electricidad en un país específico; posteriormente, el usuario ingresa los datos específicos, como el requerimiento energético de una máquina. A partir de estos datos, GREET realiza un análisis para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes del aire y el uso de recursos provenientes del petróleo. El modelo proporciona resultados detallados que muestran el impacto ambiental y el consumo energético a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida del proceso seleccionado.

2.10 Eco Indicador 99

El Eco-indicador 99 es un método de evaluación de impacto ambiental utilizado para cuantificar el daño ambiental causado por productos o procesos a lo largo de su ciclo de vida (Verbitsky y Pushkar, 2018).

Desarrollado por PRé Consultants, el Eco-indicador 99 se centra en tres categorías de daño principales: salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos. Estas categorías permiten evaluar los efectos ambientales desde la extracción de materias primas, la producción, el uso, hasta la disposición final de productos, proporcionando una visión comprensiva del impacto ambiental, facilitando la toma de decisiones para el diseño de productos y estrategias ambientales (PRé Consultants, 2000).

Para utilizar el Eco-indicador 99, el usuario debe seguir un enfoque sistemático tipo manual. Primero, se identifican y cuantifican todas las emisiones y consumos de recursos asociados con cada etapa del ciclo de vida del producto. Posteriormente, el usuario asigna un valor de impacto a cada contaminante o emisión según las categorías de daño definidas en el método. Cada tipo de emisión, como CO₂, NO_x o metales pesados, tiene un coeficiente de impacto específico que se utiliza para calcular su contribución al daño ambiental total. Estos coeficientes son

proporcionados en tablas dentro del manual del Eco-indicador 99, lo que permite a los usuarios determinar el impacto de cada sustancia de manera detallada y precisa.

III. JUSTIFICACIÓN

La sociedad enfrenta serias problemáticas hoy en día, relacionadas con el cambio climático, así como el declive en la producción de los pozos petroleros. Eso ha llevado a la búsqueda de alternativas que permitan satisfacer la demanda energética, pero de manera sostenible. En este contexto, el biodiésel es uno de los biocombustibles que se ha identificado como una alternativa para el transporte terrestre, marítimo, así como para la producción de electricidad en plantas portátiles de generación de electricidad.

En la literatura se han reportado diversos procesos para su producción, incluyendo el análisis de materias primas comestibles, no comestibles y residuales. Las diferentes materias primas, así como procesos de producción, han sido estudiados mediante el análisis de ciclo de vida. No obstante, recientemente se ha reportado el uso de aceite de insectos, en particular de larvas de mosca soldado negra. El proceso de producción de este insumo es más eficiente desde el punto de vista termodinámico, por lo que se esperaría un menor impacto ambiental. De allí es que surge la necesidad de analizar el ciclo de vida completo del proceso de producción, el cual es el objetivo del presente trabajo.

IV. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La producción de biodiésel a partir de aceite de larvas de mosca soldado negra recientemente ha llamado la atención de varios investigadores; esto se debe a que se considera una opción prometedora para abordar los problemas del cambio climático, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionadas por el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, la falta de investigaciones sobre este proceso genera incertidumbres críticas en cuanto a su impacto en el calentamiento global, la gestión eficiente de las materias primas y la evaluación integral de su ciclo de vida.

Por lo tanto, es necesario realizar un análisis completo que aborde estos aspectos de manera integrada, permitiendo así una toma de decisiones informada y orientada a maximizar los beneficios ambientales y económicos de este proceso de producción de biodiésel. Este estudio se vuelve importante porque permitirá impulsar la producción de biocombustibles sustentables generados a partir de la revalorización de residuos.

V. HIPÓTESIS

El biodiésel producido a partir de larvas de la mosca soldado negra (BSFL) genera un menor impacto ambiental en comparación con el diésel y el biodiésel de segunda generación, cumpliendo con los estándares de sustentabilidad establecidos que requieren una reducción mínima del 50% en las emisiones de gases de efecto invernadero.

VI. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el cumplimiento del estándar de sustentabilidad RSB-STD-01-010 de la producción de biodiésel a partir de aceite de insectos mediante el uso del software GREET.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la viabilidad técnica de la producción de biodiésel a partir del aceite obtenido de la mosca soldado negra.
- Evaluar el impacto ambiental de todo el ciclo de vida del biodiésel, desde la cría de las larvas hasta la producción y distribución del combustible, teniendo en cuenta factores como las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales.
- Identificar áreas de mejora en el proceso de producción de biodiésel con el objetivo de reducir su impacto ambiental e incrementar la sostenibilidad.
- Evaluar si la producción de biodiésel a partir del aceite de larvas de mosca soldado negra cumple con los criterios de sostenibilidad establecidos en el estándar RSB-STD-01-011, como la reducción de residuos orgánicos, la eficiencia energética y la minimización del uso de tierras agrícolas.

VII. METODOLOGÍA

Esta sección consta de 3 etapas y describe los procedimientos que se llevaron a cabo y los equipos utilizados para el desarrollo de la presente investigación. La primera etapa la obtención de datos experimentales y la recolección de datos obtenidos de la literatura sobre la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL. Estos datos serán utilizados en las siguientes etapas. La segunda etapa incluye la metodología realizada para evaluar el impacto ambiental de todo el

proceso de producción y uso del biodiésel obtenido. Por último, se incluye el procedimiento realizado para determinar si el producto que se obtuvo cumple con el estándar RSB-STD-01-010. La Figura 4 muestra un diagrama general de las etapas consideradas en la metodología.

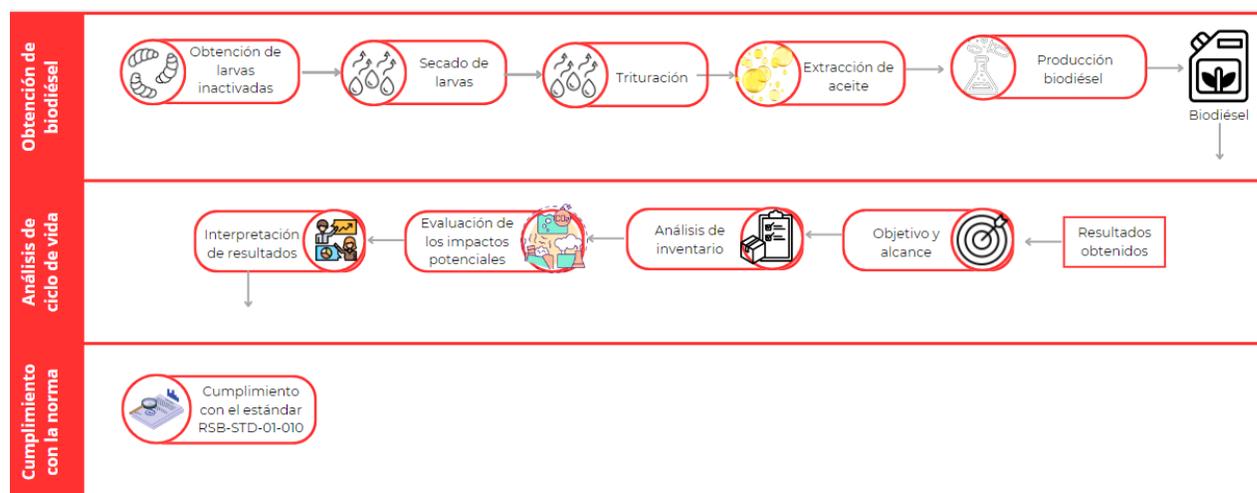


Figura 4 Diagrama de flujo de la metodología realizada

7.1 Obtención del biodiésel a partir del aceite de BSFL

7.1.1 Obtención de BSFL

Las larvas de mosca soldado negras fueron proporcionadas por el programa de Doctorado en Ingeniería en Biosistemas de la Universidad Autónoma de Querétaro ubicada en el Campus Amazcala, El Marqués, Querétaro, México. Anteriormente estas larvas fueron alimentadas con una mezcla de suero de queso y dieta Gainesville. El suero de queso se obtuvo de la Planta Piloto de Lácteos de la Universidad Autónoma de Querétaro en el Campus Amazcala. La relación de sustrato/ larva fue de 3 kg de mezcla (75% suero y 25% mezcla de granos) para 1,500 larvas. Las larvas fueron cultivadas a las condiciones de temperatura entre 30-35 °C y una humedad de 75%. Las larvas se encontraron en estas condiciones durante un ciclo de vida de 11 días (Caltzontzin-Rabell et al., 2024); una vez pasado este periodo de tiempo fueron inactivadas a -20°C (Caltzontzin Rabell et al., 2021). Posteriormente, las BSFL congeladas se sometieron a un proceso de secado durante 72 horas a 60 °C, utilizando un deshidratador con un consumo energético de 500w y una capacidad de procesamiento de 1000 g.

7.1.2 Trituración BSFL

Antes de la extracción de lípidos de BSFL, es necesario pulverizar el BSFL seco para obtener mayor rendimiento en la extracción; para ello, se necesitó un molino marca Hamilton Beach, el cual se muestra en la Figura 5, el consumo energético del molino es de 0.125 kW. Se trituraron 100.003 g de BSFL seca en 57.81 segundos.

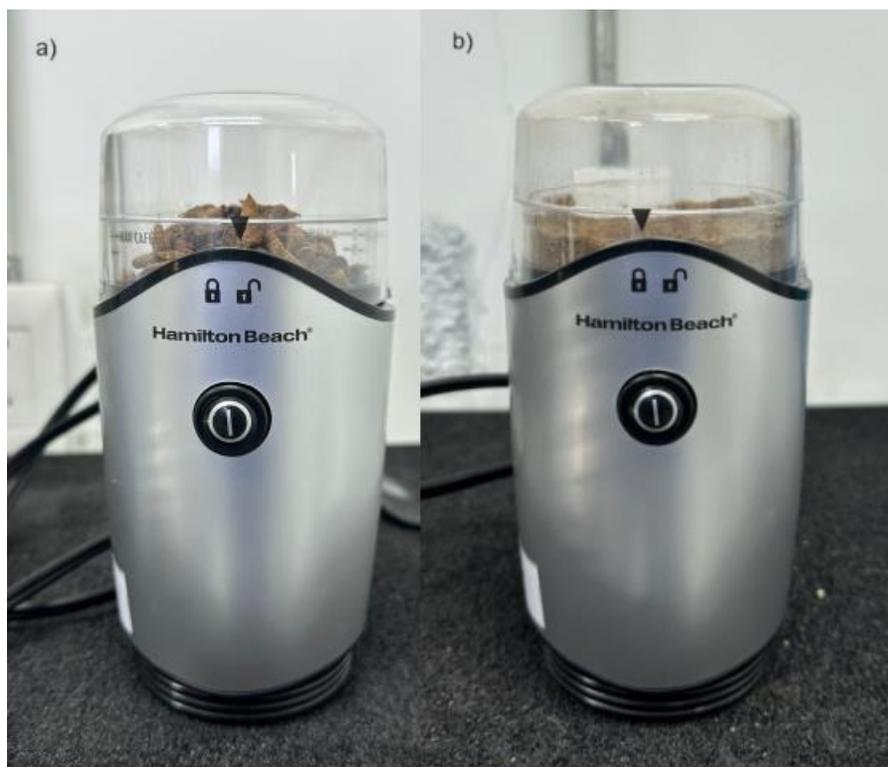


Figura 5 Trituración de BSFL seca. a) BSFL antes de la trituración. b) BSFL triturada

7.1.3 Extracción

Una vez que la larva se encontraba triturada se extrajo el aceite contenido en ellas mediante el método de extracción Soxhlet, el cual es un método químico para separar un compuesto de una muestra sólida; para este paso se modificó el método descrito en el trabajo de (Jung et al., 2022). Se utilizaron 300 ml de hexano como solvente y se introdujeron en un matraz de 500 ml el cual se calentó en una parrilla de calentamiento con un consumo energético de 250 W. El hexano circuló durante aproximadamente 4 h, en un ciclo de evaporación y condensación; para llevar a cabo la condensación fue necesario utilizar una bomba de recirculación con un consumo energético de 5.5 W y 500 ml de agua helada. El equipo utilizado para la extracción del aceite se muestra en la Figura 6.



Figura 6 Extracción de aceite mediante soxhlet

Se utilizaron diferentes cantidades de muestra en cuatro etapas. Inicialmente, se introdujeron 25.003 g de BSFL para extraer el aceite contenido. Posteriormente, se repitió el proceso de extracción con una muestra de 25.001 g de BSFL. Después, se llevó a cabo una tercera extracción utilizando una muestra de 24.385 g de BSFL. Finalmente se repitió el proceso de extracción con una muestra de 25.227 g. Una vez completada la extracción en cada caso, fue necesario separar el aceite extraído de las larvas y el solvente mediante una destilación; posterior a la recolección del aceite obtenido se analizó y evaluó el rendimiento alcanzado haciendo uso de la ecuación 2 descrita en el trabajo de (Raksasat et al., 2021):

$$\text{Rendimiento aceite} = \frac{\text{Peso del aceite}}{\text{Peso de la muestra inicial}} \times 100\% \quad (2)$$

7.1.4 Rendimiento de conversión a biodiésel

Para realizar esta etapa de la metodología, se realizó una revisión de literatura sobre los procesos de producción de biodiésel; lo anterior con la finalidad de encontrar los mejores rendimientos reportados de conversión del aceite de BSFL a biodiésel. Los datos fueron utilizados posteriormente en el ACV. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura disponible.

La revisión de la literatura incluyó la evaluación de las condiciones de reacción, tales como la temperatura, el tiempo, los catalizadores y las proporciones de reactivos, así como la eficiencia de cada método en términos de rendimiento de biodiésel obtenido. También se analizaron los datos sobre la calidad del biodiésel producido, tales como el contenido de ésteres metílicos, la viscosidad, el punto de inflamación y el contenido de glicerol, para garantizar el cumplimiento de los estándares internacionales como ASTM D6751.

7.2 Evaluación del impacto ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental se llevó a cabo un análisis del ciclo de vida basado en la metodología establecida por la norma ISO 14040:2009. Para ello, se utilizó el software GREET y se aplicó la metodología Eco-indicador 99.

Se seleccionó el modelo GREET debido a su amplia aceptación y uso por parte de la EPA. Además, al ser un programa desarrollado y mantenido en los Estados Unidos, los datos y escenarios utilizados en GREET son particularmente relevantes para contextos similares, como el de México, donde las condiciones geográficas, tecnológicas y económicas pueden asemejarse a las de su país vecino. Esto hace que los resultados del modelo GREET sean especialmente útiles y aplicables para el presente estudio.

La metodología Eco-indicador 99 fue seleccionada debido a su amplio reconocimiento y uso en Europa y otros países a nivel internacional. A falta de una metodología de ACV desarrollada específicamente para México, el Eco-indicador 99 ofrece una herramienta estandarizada y validada para evaluar los impactos ambientales de productos y procesos.

7.2.1 Objetivos y alcance

En esta primera etapa del ACV se definieron el objetivo, alcance, los límites del sistema y la unidad funcional con base a lo establecido en el estándar RSB-STD-01-010. Adicionalmente, se estableció una referencia geográfica para asegurar que los resultados sean representativos de las condiciones locales.

7.2.2 Análisis del inventario del ciclo de vida

El análisis del inventario del ciclo de vida (AICV) se realizó recopilando información de todas las entradas y salidas de cada etapa del proceso de la producción de biodiésel que se definieron en el punto anterior. El AICV se realizó haciendo uso de los datos obtenidos de la experimentación, de información obtenida en la revisión de la literatura y haciendo uso del Software GREET.

7.2.3 Evaluación de los impactos potenciales del ciclo de vida

En esta etapa del ACV, los datos obtenidos del AICV se tradujeron en impactos ambientales potenciales utilizando la metodología Eco-indicador 99. Ésta es una metodología que mide los impactos en puntos finales; es decir, se enfoca en los resultados finales de las cadenas de impacto, proporcionando una evaluación más integrada y comprensible de los efectos ambientales totales. Esta metodología abarca tres categorías principales: daños a la salud humana, daños a la calidad de los ecosistemas, y daño a los recursos.

7.2.4 Interpretación de resultados

La etapa de interpretación de resultados es la última etapa del ACV. En esta etapa se analizaron, interpretaron y se comunicaron los resultados obtenidos de las etapas anteriores. Se identificaron las categorías de impacto son las que más contribuyen a los impactos ambientales; lo anterior con la finalidad de identificar las oportunidades de mejoras en el proceso de producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL.

Para profundizar en esta interpretación y evaluar cómo la variación en la mezcla de biodiésel afecta a cada categoría de impacto, se llevó a cabo un análisis de tendencia utilizando R. Este análisis permitió identificar patrones más claros y cuantificar con mayor precisión la relación entre la proporción de biodiésel y los impactos ambientales. Lo anterior facilita la toma de decisiones más informada en cuanto a la adopción de mezclas más sostenibles.

En este análisis, se emplearon las librerías *ggplot2* para la visualización de datos y *stats* para los cálculos estadísticos, como la regresión lineal. La librería *ggplot2* permitió generar gráficos claros y detallados, que facilitaron la identificación de tendencias visuales en las distintas categorías de impacto. La librería *stats* fue esencial para realizar el análisis de regresión lineal, cuantificando con mayor precisión la relación entre la proporción de biodiésel y los impactos ambientales. Este enfoque permitió identificar patrones más claros y facilitó una toma de decisiones más informada en cuanto a la adopción de mezclas más sostenibles

7.3 Cumplimiento del estándar RSB-STD-01-010

Según el estándar RSB-STD-01-010, el biodiésel debe tener una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el diésel convencional. Para que el biodiésel obtenido de la BSFL cumpla con este estándar debe lograr una reducción mínima del 50% en las emisiones de GEI en comparación con el diésel fósil. Para la evaluación del cumplimiento con el estándar RSB-STD-01-011 se realizaron los siguientes pasos.

7.3.1 Recolección de datos de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir de la BSFL

Las emisiones obtenidas a partir del AICV de todas las etapas de producción de biodiésel se utilizaron para verificar el cumplimiento del estándar RSB-STD-01-010.

7.3.2 Cálculo de emisiones evitadas

Se recopilaron datos a través de la literatura disponible sobre las emisiones que se generarían si el suero de queso fuera desechado en lugar de revalorizarlo como sustrato para la BSFL.

7.3.3 Conversión de emisiones

Se convirtieron todas las emisiones a la unidad de kilogramo de CO₂ equivalente por tonelada de biodiésel producido (Kg CO₂e/ton) según lo requerido por el estándar RSB-STD-01-010.

7.3.4 Sumatoria de emisiones e integración de emisiones evitadas

Se sumaron todas las emisiones obtenidas de las diferentes etapas del ciclo de vida del biodiésel a partir del aceite de BSFL, posteriormente se restaron las emisiones evitadas para obtener las emisiones netas.

7.3.5 Verificación del cumplimiento

Se compararon las emisiones netas del biodiésel con las emisiones del diésel convencional; así, se determinó si el biodiésel cumplía con la disminución del 50% de las emisiones en comparación con el diésel convencional.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Proceso de producción de biodiésel

8.1.1 Contenido de aceite

Para la extracción del aceite de las BSFL se empleó el método de extracción Soxhlet para determinar el contenido de aceite que tiene este tipo de larva; este método se escogió debido a

que es ampliamente utilizado por su capacidad de extraer lípidos de manera eficiente y completa. Para calcular el rendimiento de aceite, se utilizó la ecuación 4, previamente descrita en la metodología. Los datos obtenidos de las cuatro muestras de BSFL se detallan en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7 Contenido de aceite extraído de BSFL utilizando el método Soxhlet

muestra	Peso BSFL (g)	Aceite extraído (g)	% de aceite
1	25.003	9.997	39.983202
2	25.001	9.177	36.7065317
3	24.385	8.833	36.223088
4	25.227	9.8763	39.15
D. Estándar	0.362	9.876	0.916

De los datos se observa que el contenido de aceite de las BSFL de las muestras varía entre 36.22% y 39.98%, obteniendo un valor promedio de 38.02%. En conclusión, los datos obtenidos demuestran una extracción eficiente de aceite de las BSFL utilizando el método Soxhlet, con un rendimiento promedio del 38.02%. En comparación, materias primas de segunda generación como la *Jatropha* que contienen entre 20-40% de aceite (Chang et al., 2020; Thapa et al., 2018), y la *Camelina* aproximadamente un 35% (Bernardo et al., 2003).

8.1.2 Rendimiento de conversión de biodiésel

Los datos obtenidos de la revisión de la literatura realizada se encuentran en la Tabla 4. Se seleccionó la metodología de conversión del aceite de BSFL a biodiésel de Zheng et al. (2012) debido a su alto rendimiento y eficiencia reportada en la producción de biodiésel. Esta metodología incluye una esterificación ácida inicial con H_2SO_4 al 1%, utilizando una relación metanol a aceite de 8:1, a 75 °C durante 1 h. Posteriormente, se lleva a cabo una transesterificación básica con NaOH al 0.8%, con una relación metanol a aceite de 6:1, a 65 °C durante 30 min.

La metodología descrita anteriormente muestra que esta combinación de condiciones de reacción permite alcanzar un rendimiento de biodiésel del 93.1%, con una calidad de biodiésel que cumple con el estándar ASTM D675. Estos datos proporcionan una base sólida para realizar el ACV, por lo que serán utilizados para evaluar el impacto ambiental y la sostenibilidad del proceso. Lo anterior permitirá asegurar que la producción de biodiésel a partir de BSFL sea una alternativa viable y eficiente a los combustibles fósiles.

8.2 Análisis de ciclo de vida

8.2.1 Definición del objetivo y alcance

El presente ACV tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales asociados con la producción de biodiésel a partir del aceite extraído de BSFL, previamente alimentadas con suero de queso, un residuo generado durante la producción de queso. Esta evaluación considera diferentes escenarios de mezcla de biodiésel con diésel convencional (B0, B5, B10, B20, B50, B100). Adicionalmente, se busca comparar los impactos ambientales generados en la producción de biodiésel utilizando dos materias primas de segunda generación (aceite de jatropha y camelina). También se incluye una comparación de los impactos ambientales del diésel convencional producido a partir de petróleo.

El ACV adoptará un enfoque de cuna a la tumba, lo que significa que se considerarán todas las etapas del ciclo de vida del biodiésel en sus diferentes escenarios, desde la obtención de las materias primas, pasando por la producción, transporte y uso, hasta la disposición final. Las etapas consideradas se ilustran en la Figura 7. Este enfoque permitirá identificar los procesos específicos que contribuyen significativamente a los impactos ambientales, y proponer estrategias para mejorar la eficiencia y reducir los impactos negativos.

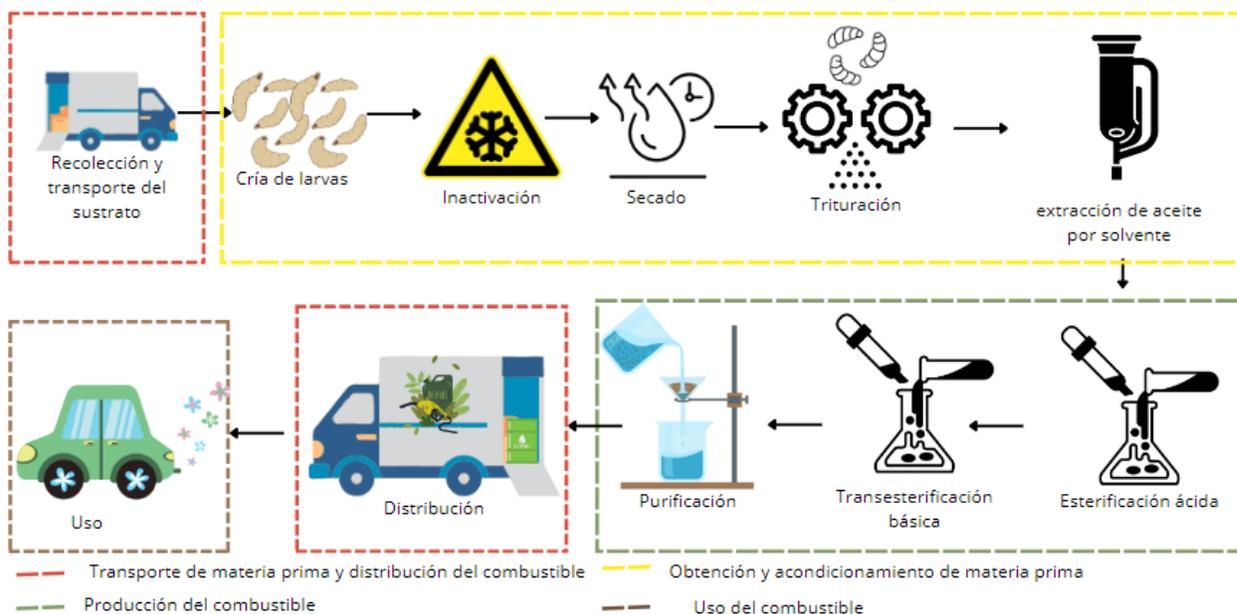


Figura 7 Límites del sistema del ACV para la producción de biodiésel a partir de larvas BSFL.

La región geográfica seleccionada para este estudio es Querétaro, debido a la proximidad de diversas productoras de queso que generan suero como residuo, facilitando así la obtención de

la materia prima. La unidad funcional establecida es la producción de 1 tonelada de biodiésel en sus diferentes mezclas, con el fin de realizar una comparación directa de los impactos ambientales entre el biodiésel de BSFL, el biodiésel a partir de dos materias primas de segunda generación, y el diésel convencional. Las etapas consideradas para la producción de biodiésel de segunda generación y diésel convencional se presentan en las Figuras 8 y 9, respectivamente.

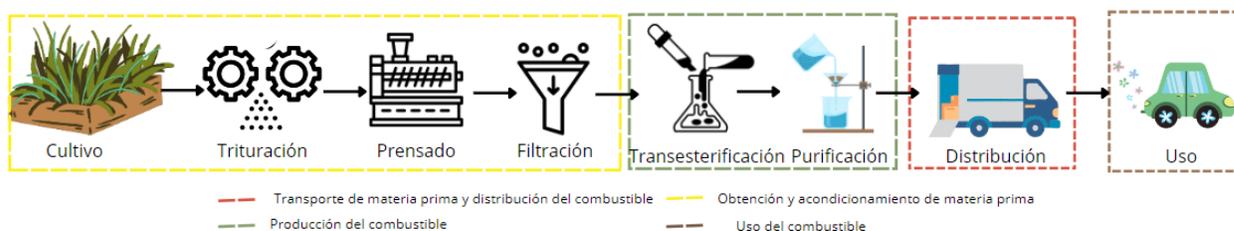


Figura 8 Etapas consideradas para la producción de biodiésel de segunda generación

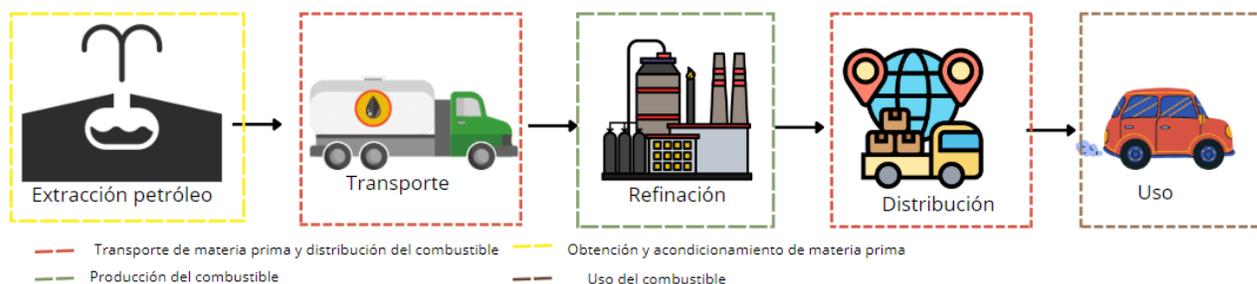


Figura 9. Etapas consideradas para la producción del diésel a partir de petróleo

Esta revisión del ACV permitirá no sólo entender mejor los beneficios y desventajas ambientales del biodiésel de BSFL en comparación con el biodiésel de segunda generación y el diésel tradicional, sino también proponer mejoras para mitigar los impactos negativos identificados.

8.2.2 Análisis del inventario del ciclo de vida (AICV)

Para el desarrollo del inventario se segmentó el proceso de producción de la mezcla biodiésel a partir de aceite de BSFL y a partir de materia prima de segunda generación considerando una mezcla B100 y diésel en 4 secciones diferentes, como se observa en las Figuras 7, 8 y 9 respectivamente. Lo anterior con la finalidad de facilitar la comparación de las emisiones generadas en cada proceso de producción de combustible. Para el caso de la producción de

biodiésel, el inventario se realizó a partir de los datos obtenidos de la experimentación, información de emisiones generadas obtenidas de trabajos publicados en revistas indexadas y haciendo uso del software GREET. Para el inventario del proceso de producción de diésel únicamente se utilizó el software GREET.

8.2.2.1 AICV de la obtención y acondicionamiento de materia prima.

La obtención y acondicionamiento de las materias primas son procesos fundamentales en la producción de un bien o servicio. Las etapas involucradas en esta sección, las entradas requeridas para llevar a cabo cada proceso y salidas de emisiones generadas se visualizan en la Figura 10.

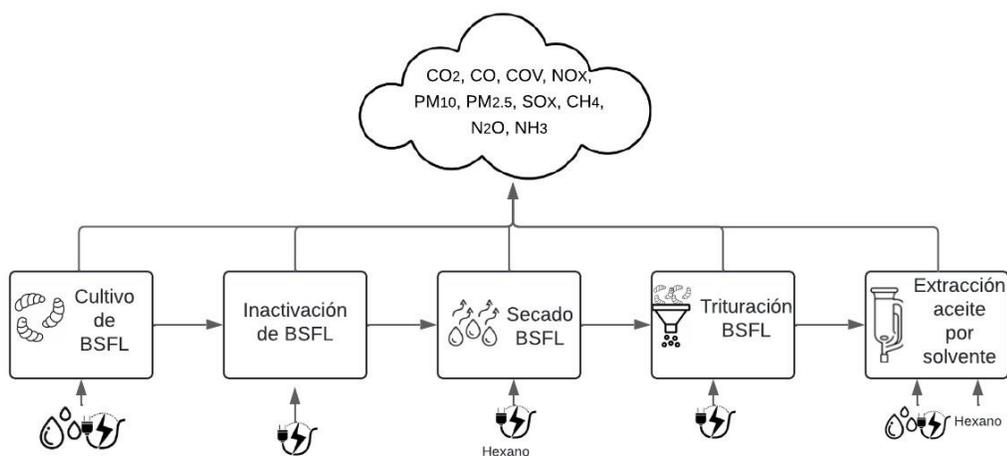


Figura 10 Esquema de entradas y salidas en la sección de obtención y acondicionamiento de materia prima para el biodiésel de BSFL.

Referente a la producción de biodiésel la materia prima es el aceite a partir de larvas BSFL; el proceso de obtención de esta materia prima consiste en cultivar a las larvas. Para ello se requiere un humidificador y calentón para obtener las condiciones óptimas de cría de larvas, las cuales son un tiempo de vida de 11 día con una humedad relativa de 60% y una temperatura de 30 °C. Para la producción de 1 tonelada de biodiésel se necesitan 8.56 toneladas (ton) de larvas, 45.052 ton de suero de queso, y 15.017 ton de dieta Gainesville. El área requerida para llevar a cabo en la etapa de cría es de 243.45 m², un consumo energético de 3,578 kWh, y un consumo de agua de 0.1925 m³. Además, el metabolismo de las larvas genera emisiones al medio ambiente; por

un kilogramo (kg) de larvas, en peso seco, se emiten 0.86 gramos (g) de amoníaco (NH₃) (Chen et al., 2019), 0.00119 g de CH₄, 0.00084 g de N₂O y 0.144 g de CO₂ (Pang et al., 2020).

Una vez pasados los 11 días de cría se procede a la inactivación de BSFL. Para ello, se optó por el método de congelamiento como proceso de inactivación, debido a que es el que mayor se recomienda para llevar a cabo esta etapa; esto se debe a que es la forma en la que estos insectos mueren de manera natural, además, este método no afecta las macromoléculas que pueden ser de interés (Caltzontzin Rabell et al., 2021). Por lo tanto, para llevar a cabo este proceso es necesario congelar las larvas de BSFL durante un día completo; para esta etapa se requiere un área total de 27.63 m² y un consumo energético de 61.32 kWh.

Una vez inactivadas, las larvas se recolectan y se preparan para la siguiente etapa que es el secado. Las larvas se someten a un proceso de secado para eliminar el contenido de agua, el cual equivale al 67% de su peso. Para esta etapa se considera el uso de secadores, los cuales tienen una tasa de eliminación de agua de 15 kg/h, requieren un área de 18.36 m², 26.8 horas, y un consumo energético de 2,010 kWh. Al finalizar el secado, el peso de las larvas es de 2.825 ton. Posterior a este paso se recomienda triturar a las BSFL secas, esto con la finalidad de obtener mayor rendimiento en la extracción de aceite. Para la trituración se consideró una máquina con capacidad de 800 kg/h, tiempo requerido de 3.533 horas, 0.59 m² de espacio requerido y un consumo energético de 38.84 kWh.

La última etapa en la sección de obtención y acondicionamiento de la materia prima es la extracción de aceite utilizando solventes. En este proceso se utiliza hexano como solvente. Una vez completada la extracción, el hexano se evapora y se condensa para su reutilización. Esta etapa se lleva a cabo con un equipo de extracción que consume un total de 2,478 kWh de energía. Como resultado, se obtiene un 38.019% de aceite en relación con el peso del BSFL seco, lo que equivale a 1,074.2 kg de aceite de BSFL.

En la Tabla 8, se muestran las entradas de cada etapa y las salidas de emisiones que se generan en cada proceso de la producción de biodiésel a partir de BSFL. Adicionalmente, se presenta la Figura 11, el cual es un gráfico comparativo de las emisiones que se generan en esta sección de obtención y acondicionamiento de materia prima para biodiésel de BSFL, jatropha, camelina y diésel convencional.

Tabla 8 Inventario para la obtención y acondicionamiento de la materia prima

Unidad	Cría	Inactivación	Secado	Trituración	Extracción aceite
--------	------	--------------	--------	-------------	----------------------

Entrada						
Agua	m ³	1.93E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Área	m ²	2.43E+02	2.76E+01	1.84E+01	5.91E-01	9.12E+00
Consumo energético	kWh	3.58E+03	6.13E+01	2.01E+03	3.88E+01	2.48E+03
Uso de petróleo	MJ	3.34E+03	5.60E+01	1.88E+03	3.60E+01	2.31E+03
Salida						
CO ₂	kg	-3.57E+03	2.61E+01	8.55E+02	1.65E+01	1.05E+03
VOC	kg	2.35E-01	1.32E-01	1.32E-01	2.55E-03	1.63E-01
CO	kg	8.58E-01	4.82E-01	4.82E-01	9.31E-03	5.94E-01
NO _x	kg	2.23E+00	1.25E+00	1.25E+00	2.42E-02	1.55E+00
PM ₁₀	kg	1.62E-01	9.11E-02	9.11E-02	1.76E-03	1.12E-01
PM _{2.5}	kg	1.42E-01	7.98E-02	7.98E-02	1.54E-03	9.84E-02
SO _x	kg	1.15E+00	6.44E-01	6.44E-01	1.24E-02	7.93E-01
CH ₄	kg	3.41E+00	1.91E+00	1.91E+00	3.70E-02	2.36E+00
N ₂ O	kg	2.52E-02	1.41E-02	1.41E-02	2.73E-04	1.74E-02
NH ₃	kg	4.90E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

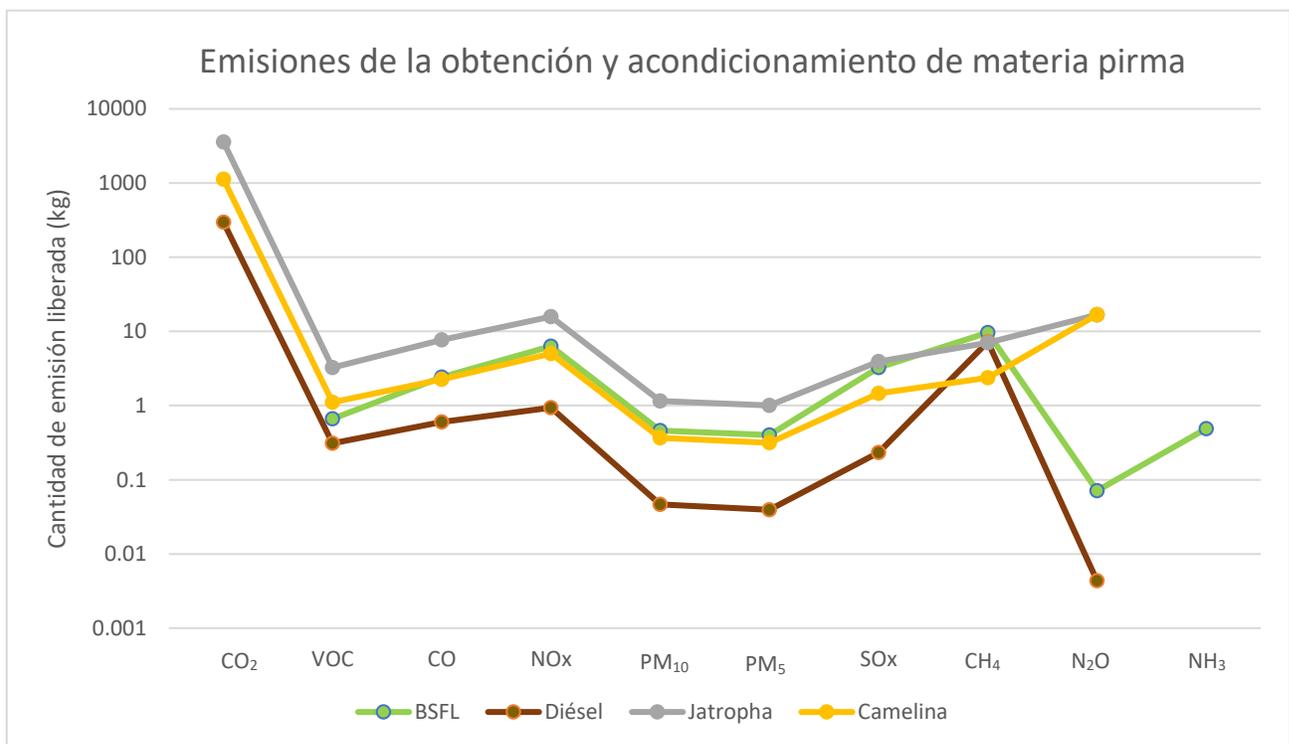


Figura 11. Emisiones generadas de la obtención y acondicionamiento de la materia prima.

En la Figura 11, se observa que las emisiones generadas de Compuestos Volátiles Orgánicos (VOC), CO, NO_x, material particulado con diámetros aerodinámicos de 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}), óxidos de azufre (SO_x), CH₄, y N₂O para la obtención y acondicionamiento de materia prima del biodiésel de jatropha y camelina son mayores que las del diésel convencional. En particular, se observa que el biodiésel derivado de BSFL no genera emisiones directas de CO₂. Sin embargo, debido al metabolismo de las larvas se producen 327.88 kg de CO₂. A pesar de ello, al utilizar residuos como alimento de las larvas, se evitan emisiones significativas. En este caso, se previenen 5416.80 kg de CO₂, lo que resulta en emisiones netas negativas. Esto se debe al uso de suero de queso como alimento, que de otro modo liberaría CO₂ si fuera descargado al agua. Este enfoque no sólo reduce las emisiones netas de CO₂, sino que convierte un residuo contaminante en un recurso valioso.

Además, el biodiésel de BSFL es el único proceso de producción que emite NH₃ a la atmósfera, debido al metabolismo característico de las BSFL, que produce gases durante su desarrollo. Esta misma razón contribuye a las altas emisiones de CH₄ y N₂O observadas en el biodiésel de BSFL; no obstante, se observa mayor emisión de este último compuesto en las materias de segunda generación debido al uso de fertilizantes para su cultivo. En general, se observa que los procesos de producción de biodiésel de jatropha y camelina generan emisiones más altas en comparación con el diésel convencional, debido a las operaciones necesarias para el acondicionamiento de la materia prima.

8.2.2.2 AICV de la producción del combustible

La segunda sección considerada es la producción del combustible. En el caso del biodiésel, el proceso incluye tres etapas, las cuales se pueden observar en la Figura 12. Primero, se tiene una reacción de esterificación ácida como pre-tratamiento del aceite, en donde se tiene una operación de evaporación y recuperación de metanol. Después se lleva a cabo una reacción de transesterificación básica, en donde se obtienen biodiésel y glicerina como productos; en esta etapa también se considera la evaporación y recuperación del metanol. Por último, el biodiésel se envía a una etapa de purificación.

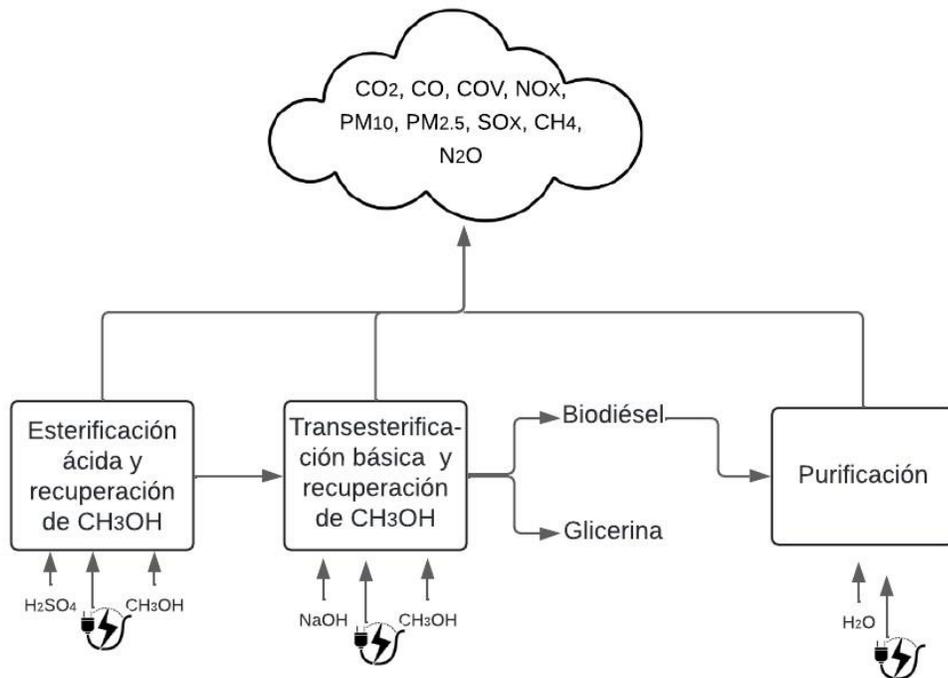


Figura 12 Esquema de entradas y salidas en la sección de producción de biodiésel.

El aceite obtenido de la primera sección se hace reaccionar con metanol (CH_3OH) en una relación (1:8) y con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 1% en peso a 75°C durante 1 hora; una vez finalizado se deja decantar y se obtienen dos capas: la primera contiene a los esteres y biodiésel, la segunda contiene metanol, impurezas y catalizador ácido. Se separa la primera capa y se manda a la transesterificación básica, donde se hace reaccionar con metanol a una relación (1:6), con hidróxido de sodio como catalizador al 0.8% en peso, durante 30 minutos. Al terminar la reacción, se obtiene el biodiésel y la glicerina como subproducto, se deja decantar y la primera capa corresponde al biodiésel; ésta se separa y se manda a un proceso de purificación, el cual consiste en lavar el biodiésel con agua a 50°C . Se agrega 1 g de agua por litro de biodiésel (Zhang et al., 2013). Los consumos energéticos requeridos para la esterificación ácida, transesterificación básica y lavado son 596.33 kWh, 447.09 kWh y 91.88 kWh, respectivamente. Además, la recuperación de metanol consume 625 kW por 1,500 kg/h de metanol recuperado.

En la Tabla 9 se muestran las entradas de cada etapa y las salidas de emisiones que se generan en cada una de ellas. Además, en la Figura 13, se muestra una comparativa de las emisiones que se generan en esta sección en la producción biodiésel a partir de diferentes materias primas y diésel convencional.

Tabla 9 Inventario para la producción de biodiésel.

	Unidad	Esterificación	Recuperación metanol	Transesterificación	Recuperación metanol	Lavado
<i>Entrada</i>						
Agua	L	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.18E+00
Metanol	ton	8.59E+00	0.00E+00	6.19E+00	0.00E+00	0.00E+00
H ₂ SO ₄	L	4.72E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
NaOH	kg	0.00E+00	0.00E+00	4.99E+01	0.00E+00	0.00E+00
Consumo energético	kWh	5.96E+02	3.58E+03	4.47E+02	2.58E+03	9.19E+01
Uso de petróleo	MJ	5.57E+02	3.34E+03	4.17E+02	2.41E+03	3.91E+01
<i>Salida</i>						
CO ₂	kg	2.54E+02	1.52E+03	1.90E+02	1.10E+03	3.91E+01
COV	kg	3.92E-02	2.35E-01	2.93E-02	1.69E-01	6.00E-03
CO	kg	1.43E-01	8.58E-01	1.07E-01	6.18E-01	2.20E-02
NO _x	kg	3.72E-01	2.23E+00	2.79E-01	1.61E+00	5.73E-02
PM ₁₀	kg	2.70E-02	1.62E-01	2.02E-02	1.17E-01	4.10E-03
PM _{2.5}	kg	2.36E-02	1.42E-01	1.77E-02	1.02E-01	3.60E-03
SO _x	kg	1.91E-01	1.15E+00	1.43E-01	8.25E-01	2.94E-02
CH ₄	kg	5.68E-01	3.41E+00	4.26E-01	2.46E+00	8.75E-02
N ₂ O	kg	4.10E-03	2.51E-02	3.10E-03	1.81E-02	6.00E-04

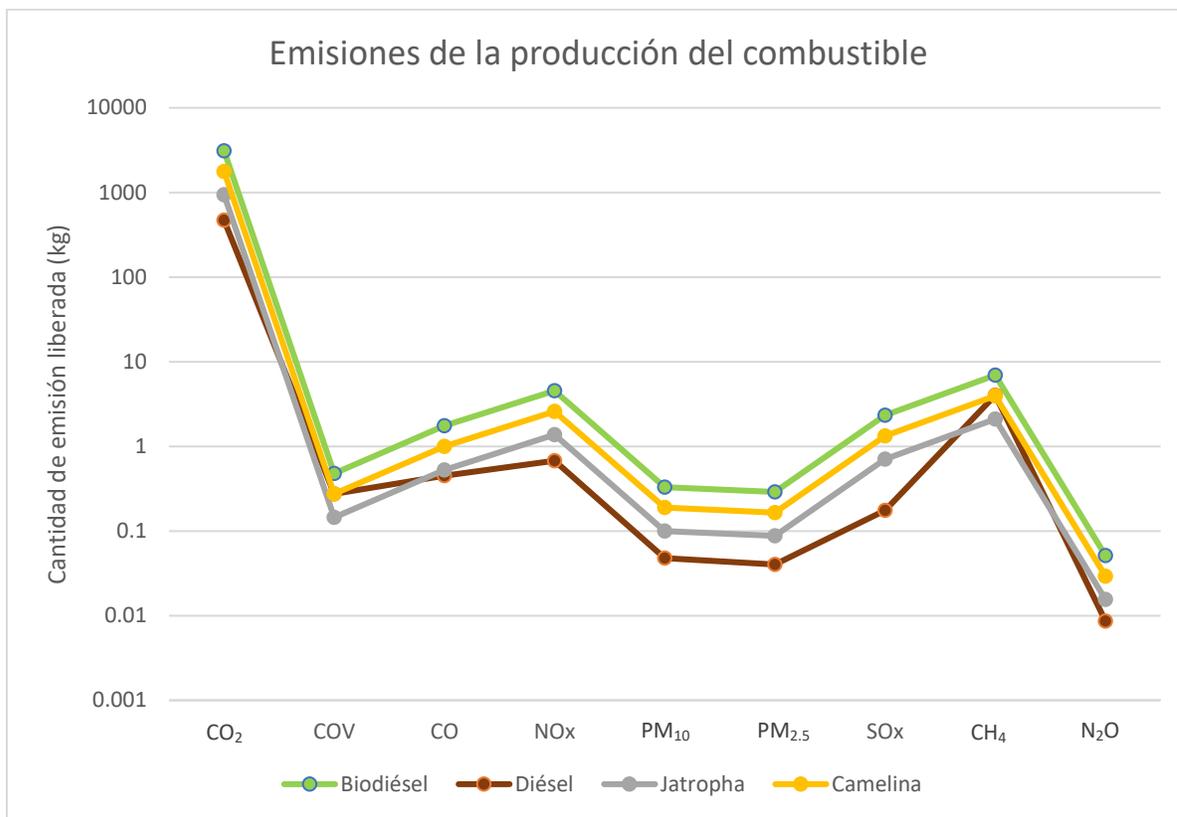


Figura 13 Emisiones generadas por la producción del combustible

En la Figura 13 se puede observar que la producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL, jatropha y camelina emite cantidades significativamente mayores en la mayoría de los contaminantes evaluados, en comparación con la producción de diésel. Esto se debe a varios factores tales como los reactivos utilizados, los procesos de producción y la energía requerida para producir biodiésel. Se observa que la producción de biodiésel a partir de BSFL presenta las emisiones más altas en esta etapa entre las opciones evaluadas; esto se debe a la gran cantidad de energía necesaria para la recuperación del metanol, un componente crucial en la producción de biodiésel.

Aunque el biodiésel se considera una alternativa más sostenible al diésel en términos de utilización de recursos renovables y reducción de emisiones durante el uso del combustible, es evidente que la etapa de producción de biodiésel es más intensiva en emisiones en comparación con la producción de diésel.

8.2.2.3 AICV del transporte de materia prima y distribución del combustible

Es importante considerar el inventario de emisiones producidas debido al transporte de materia prima y distribución del combustible, ya que el transporte consume energía, generalmente de los combustibles fósiles; como consecuencia, se producen emisiones a la atmósfera que varían según la distancia recorrida, el tipo de transporte, y la cantidad de materia o producto distribuido.

Las distancias requeridas para la producción de biodiésel se muestran en la Figura 13. Para este proceso, se considera que el residuo de suero de queso será suministrado por la quesería Flor de alfalfa, la cual se ubica en Carretera Ajuchitlán-Colón km 9.3, Colón, Querétaro. Este residuo se enviará a la planta de producción de biodiésel, la cual se considera que estará instalada en el parque industrial Santa Rosa Jáuregui, el cual se ubica en Av. de La Montaña No. 100 Santa Rosa Jáuregui; la distancia a recorrer entre ambos puntos es de 73 km. Una vez producido el biodiésel, éste será distribuido a una gasolinera que se encuentra a 10.1 km de distancia con respecto al parque industrial.

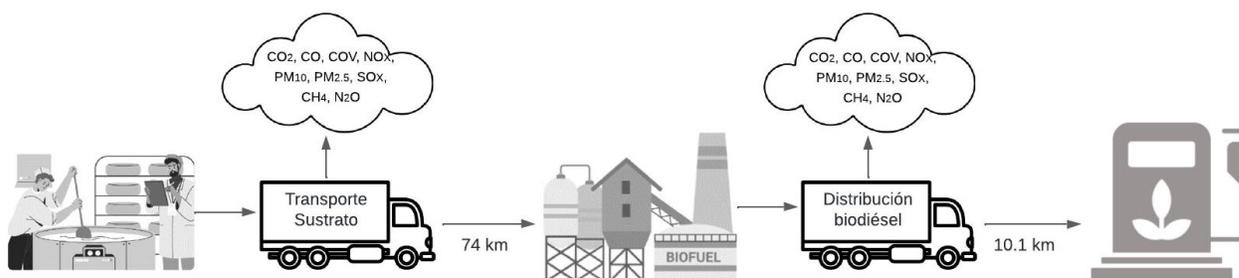


Figura 14 Esquema de las distancias a recorrer en el proceso de producción de biodiésel

Para el caso del diésel se considera que el petróleo es extraído en el yacimiento localizado en el estado de Tabasco, y se envía a la estación de bombeo en Nueva Teapa; la distancia a recorrer entre los 2 puntos es de 184 km. De la estación de bombeo el petróleo es distribuido a la refinería Miguel Hidalgo ubicada en el municipio de Tula de Allende en el estado de Hidalgo, la cual se encuentra a 667 km de distancia con respecto a la estación de bombeo. Una vez obtenido el diésel, se distribuye a la misma gasolinera considerada en el caso del biodiésel, la cual se encuentra a 181 km.

Tabla 10 Emisiones producidas por las etapas de transporte y distribución

Emisión (kg)	Biodiésel	Diésel	Jatropha	Camelina
CO ₂	1.51E+02	1.09E+02	4.04E+01	1.23E+01
COV	6.15E-03	4.45E-03	1.65E-03	5.00E-04

CO	1.62E-01	1.17E-01	4.34E-02	1.32E-02
NO _x	2.03E-01	1.47E-01	5.45E-02	1.65E-02
PM ₁₀	5.28E-04	3.81E-04	1.41E-04	4.29E-05
PM _{2.5}	4.86E-04	3.51E-04	1.30E-04	3.95E-05
SO _x	1.04E-03	7.52E-04	2.79E-04	8.47E-05
CH ₄	1.59E-03	1.15E-03	4.28E-04	1.30E-04
N ₂ O	2.14E-04	1.55E-04	5.74E-05	1.74E-05

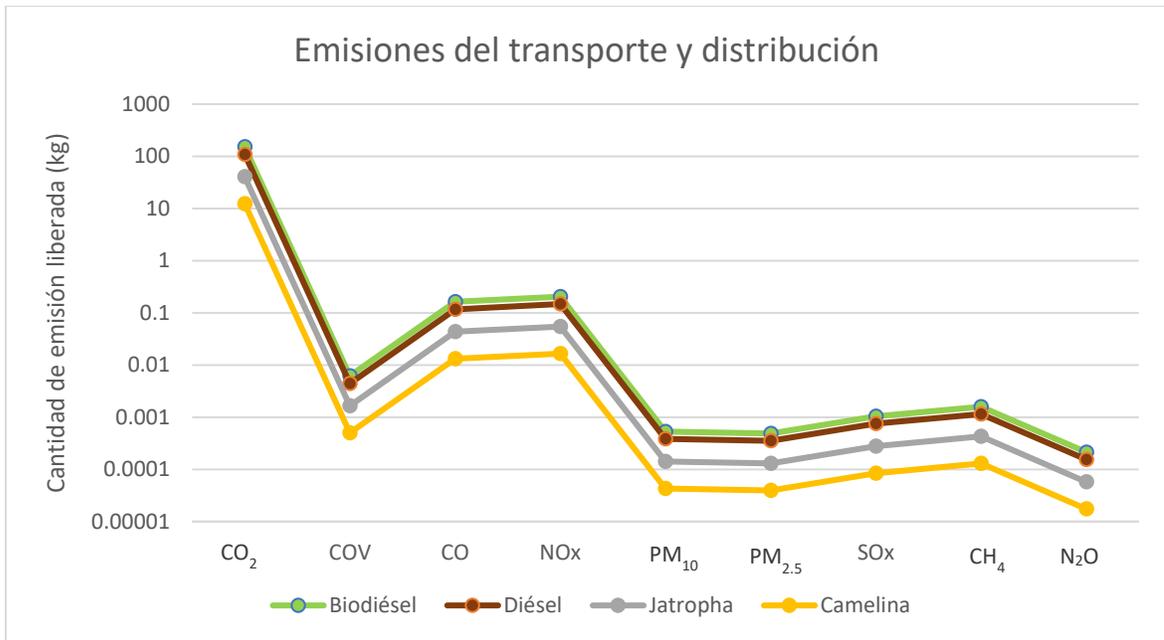


Figura 15 Emisiones generadas por el transporte de la materia prima y distribución del combustible

La Tabla 10 y la Figura 15 muestran las emisiones producidas por las etapas de transporte de la materia prima y distribución del combustible. Se observa que el proceso de producción de biodiésel a partir de la BSFL está por encima en todas las categorías con respecto al proceso de los otros combustibles. La etapa de transporte y distribución del biodiésel de BSFL emite más contaminantes; esto se debe a que, en la etapa de transporte de materia prima, se deben transportar aproximadamente 60 toneladas de sustrato para el alimento de las BSFL, mientras que para la producción de biodiésel de jatropha, camelina y diésel se transportan 11.4, 3.64, 2.24 toneladas, respectivamente.

8.2.2.4 AICV del uso del combustible

La última sección a considerar en el AICV es el uso del combustible, ya que, una vez quemado, éste emite gases contaminantes a la atmósfera, así como CO₂, CO, NO_x e hidrocarburos, HC. En

la Figura 16 se representa las emisiones liberadas por la quema de 1 tonelada de biodiésel y diésel.

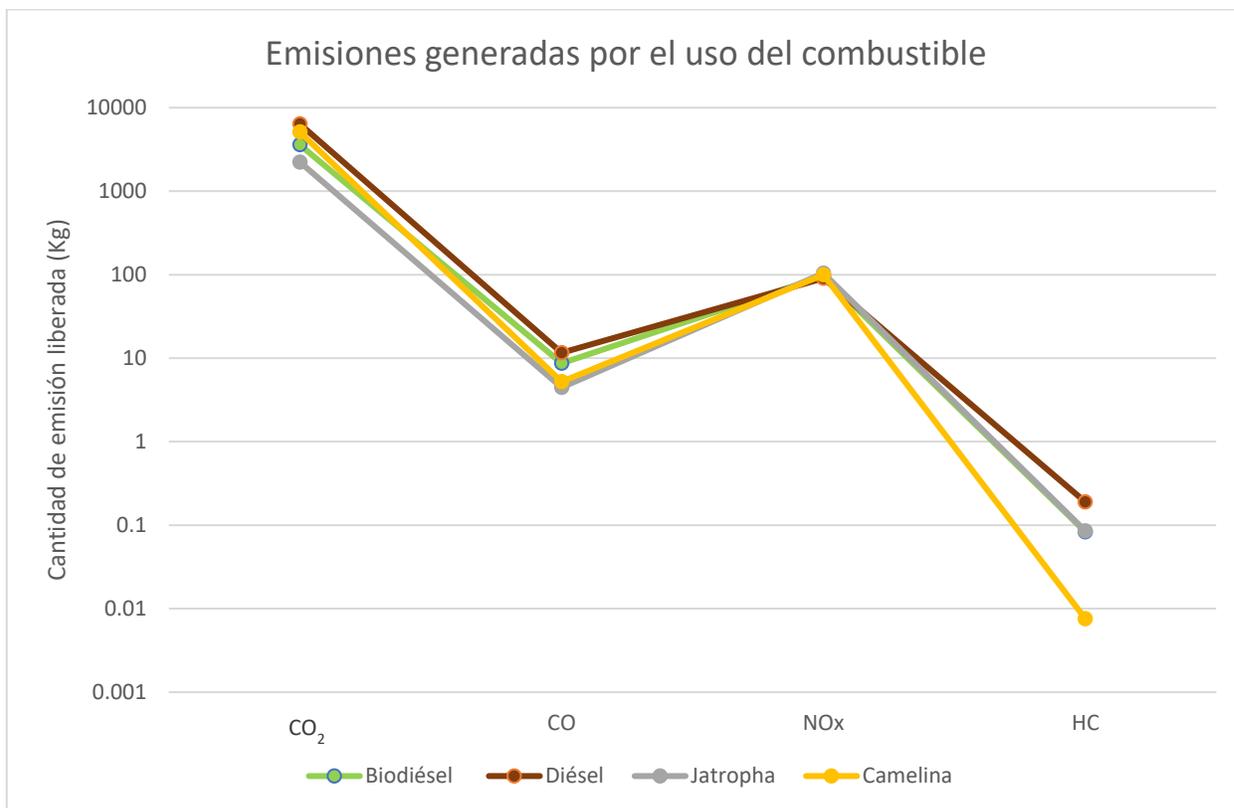


Figura 16. Emisiones generadas por el uso del combustible

En el caso del diésel, por cada tonelada de combustible quemado se emiten 6.384 ton de CO₂, 11.59 kg de CO, 90.6 kg de NO_x y 0.19 kg de HC (Hosseini and Ahmadi, 2017). En comparación, el uso de biodiésel producido a partir del aceite de BSFL reduce las emisiones de CO₂, CO y HC en un 43.74%, 24.71 y 53.01% respectivamente; sin embargo, las emisiones de NO_x aumentan en un 6.26% (Kathumbi et al., 2023). Por otro lado, el uso del combustible de jatropa reduce las emisiones de CO₂, CO y HC en un 65%, 61.5%, 45 % respectivamente, y las emisiones de NO_x aumentan un 15% con respecto al diésel (Thapa et al., 2018). Por último, para el caso del biodiésel a partir camelina las disminuciones de CO₂, CO y HC con respecto al diésel son del 20%, 55%, 40%, pero existe un aumento de la emisión de NO_x, en un 10% (Bernardo et al., 2003).

8.2.3 Evaluación de los impactos potenciales del ciclo de vida (EICV)

En esta etapa se evalúan los impactos ambientales asociados a la producción de una tonelada de biodiésel (B100) a partir de diferentes materias primas y de diésel convencional. Para el

desarrollo de esta etapa se utilizó el eco indicador 99 para evaluar los impactos ambientales de cada proceso de producción. Se seleccionó esta metodología debido a que se basa en los efectos finales (puntos finales); esto significa que analiza el daño ambiental que se puede causar en la sociedad en las siguientes categorías de daño. La primera categoría es salud humana, que se presenta en términos de años de vida ajustados por discapacidad (DALYS). La segunda categoría es daño a la calidad del ecosistema en términos de pérdida de diversidad de especies por metro cuadrado por año ($PDF \cdot m^2 \cdot yr$). Finalmente, la tercera categoría es daño por agotamiento de recursos, en términos de MJ de energía excedente por kg de materia extraída.

8.2.3.1 Categoría de daños a la salud humana

Esta categoría de daño mide la duración de las enfermedades y los años que el ser humano pierde de vida como consecuencia de los impactos ambientales de los procesos evaluados. Esta categoría se divide en 6 subcategorías: daños a la salud por efectos cancerígenos, efectos respiratorios en humanos causados por sustancias orgánicas, efectos respiratorios en humanos causados por sustancias inorgánicas, daños a la salud humana causados por el cambio climático, efectos sobre la salud humana causados por las radiaciones ionizantes, y efectos sobre la salud humana causados por el agotamiento de la capa de ozono.

La Figura 17 contiene los resultados obtenidos para la evaluación de los impactos que tienen la producción de biodiésel y diésel en la salud humana en cada etapa de su ciclo de vida. Referente a las subcategorías de efectos cancerígenos en los seres humanos, efectos sobre la salud humana causados por las radiaciones ionizantes y efectos sobre la salud humana causados por el agotamiento de la capa de ozono no se asocian ningún daño por la producción de biodiésel ni diésel.

Los resultados obtenidos en la subcategoría de efectos respiratorios en humanos causados por sustancias orgánicas no son visibles en el gráfico, ya que son menores en comparación con las subcategorías restantes. Sin embargo, en esta categoría, la producción de biodiésel de segunda generación a partir de aceite de jatropha y camelina genera un impacto superior al 80% en comparación con el diésel; esto se debe a que, durante el cultivo de las plantas, se utilizan pesticidas, herbicidas, y fertilizantes, los cuales pueden contener compuestos orgánicos que pueden volatilizarse y liberarse al aire como COV. En cuanto al acondicionamiento y obtención del aceite de BSFL, su impacto es un 38% mayor que el del diésel debido al procesamiento de la materia prima, que libera CH_4 , un compuesto orgánico que afecta negativamente la salud humana. Además, esta diferencia también se explica por la gran cantidad de energía necesaria

durante la producción de biodiésel, especialmente para la recuperación de hexano y metanol, lo que aumenta las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

En la subcategoría de daños respiratorios en humanos causados por sustancias inorgánicas, se observa que, en todas las etapas del ciclo de vida, el biodiésel producido a partir de las tres materias primas genera más daños en comparación con el diésel. En particular, durante la etapa de obtención de la materia prima, los impactos en la salud son mayores para las materias primas derivadas de cultivos. Esto se debe al uso de maquinaria agrícola, como tractores y cosechadoras, que operan principalmente con motores diésel y emiten óxidos de nitrógeno NO_x como subproducto de la combustión de combustibles fósiles. Además, la etapa de combustión del biodiésel es la que más impacta esta subcategoría, ya que, en todos los casos, el biodiésel emite más NO_x que el diésel convencional.

Por último, se observa que, en la subcategoría de daños a la salud humana causados por el cambio climático, el biodiésel producido a partir de cultivos presenta mayores impactos durante la etapa de acondicionamiento de la materia prima. Esto se debe a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas a lo largo del proceso de cultivo, especialmente por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en el suelo y los residuos de cultivos, así como por el uso de fertilizantes nitrogenados que liberan N_2O , un gas con un alto potencial de calentamiento global. En contraste, en la etapa de combustión, se observa una reducción de los daños en todos los casos de biodiésel, debido a que su uso disminuye las emisiones de CO_2 y CO en comparación con el diésel convencional. Es importante destacar que el biodiésel producido a partir de BSFL muestra una reducción significativa del 75% en los daños de esta subcategoría con respecto al diésel. Esto se debe principalmente a que las larvas se alimentan de residuos orgánicos, como el suero de queso, evitando así las emisiones que normalmente se liberarían a la atmósfera si estos desechos se gestionaran de manera convencional.

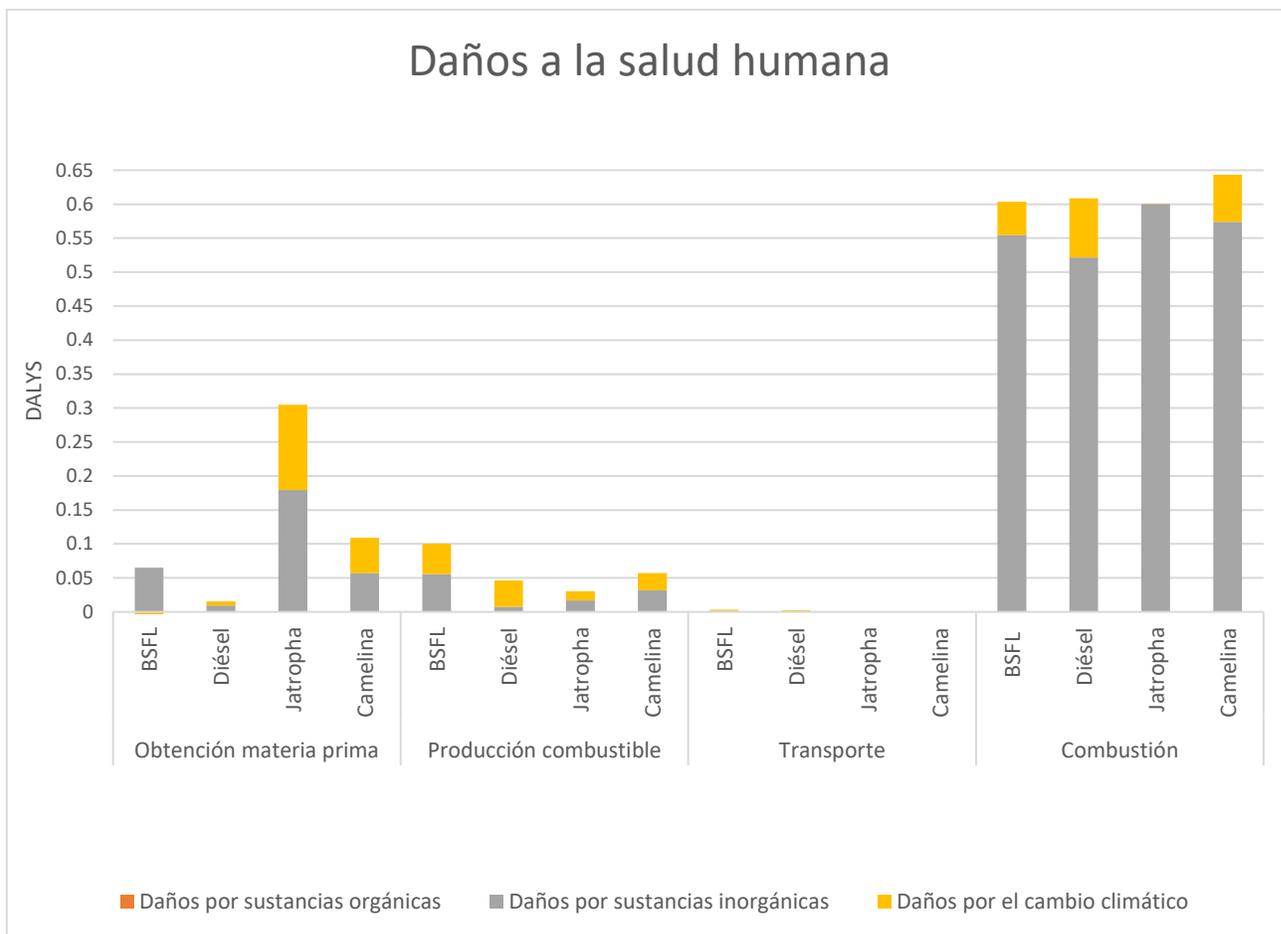


Figura 17 Evaluación de los daños a la salud ocasionados por el proceso de producción del combustible.

8.2.3.2 Categoría de daños a la calidad del ecosistema

Esta categoría tiene como finalidad medir el impacto que tienen los procesos de un bien o servicio sobre la diversidad de las especies, tiene como unidad $PDF \cdot m^2 \cdot \text{año}$ y el resultado de esta medida representa la fracción potencial de las especies que desaparecen por área y año. Esta categoría se divide en tres subcategorías: daño a la calidad del ecosistema causado por emisiones eco tóxicas, daño a la calidad de los ecosistemas causado por el efecto combinado de acidificación y eutrofización, así como daño a la calidad del ecosistema causado por la ocupación y conversión de tierras.

La Figura 18 contiene los resultados del impacto que tiene la producción de biodiésel y diésel en la calidad del ecosistema. Se observa que no se asocian daños a la calidad del ecosistema

causados por emisiones eco tóxicas para ningún proceso de producción de combustible en todas las secciones consideradas.

En la subcategoría de daño por el efecto combinado de acidificación y eutrofización se observa que éste es menor, pero en la etapa de obtención de materia prima el biodiésel de jatropha presenta el mayor impacto; esto se debe a las toneladas de cultivo de jatropha requeridas y los agroquímicos necesarios para su crecimiento óptimo. En la etapa de producción de biocombustible, el biodiésel de BSFL presenta un impacto menor que la producción de diésel convencional, pero aun así tiene un mayor impacto que la producción de biodiésel de segunda generación; esto se debe a la energía requerida para convertir el aceite de las larvas en biocombustible. En la etapa de combustión, el biodiésel de jatropha muestra el mayor impacto, seguido por Camelina, debido al aumento de las emisiones de NO_x en comparación con las emisiones del diésel convencional. Todas las diferencias en esta subcategoría se deben principalmente a las emisiones de compuestos como NO_x y amoníaco NH_3 , que contribuyen a la acidificación y eutrofización del suelo y cuerpos de agua.

En la subcategoría de daño por la ocupación y conversión de tierras, la etapa de obtención de materia prima tiene el mayor impacto en la obtención de aceite de Camelina, seguida por la obtención de aceite de jatropha; posteriormente, se encuentra la obtención de aceite de BSFL, siendo el diésel el combustible con el impacto más bajo en esta etapa. Esto indica que los cultivos de Camelina y jatropha requieren un uso intensivo de la tierra, afectando la biodiversidad y alterando los ecosistemas más que el diésel. Durante la producción de combustible, el diésel muestra un mayor impacto en comparación con los biocombustibles evaluados. No se observan impactos significativos en la fase de transporte ni en la fase de combustión para ninguno de los combustibles en esta subcategoría, lo que sugiere que estas etapas no alteran significativamente el uso del suelo ni los ecosistemas.

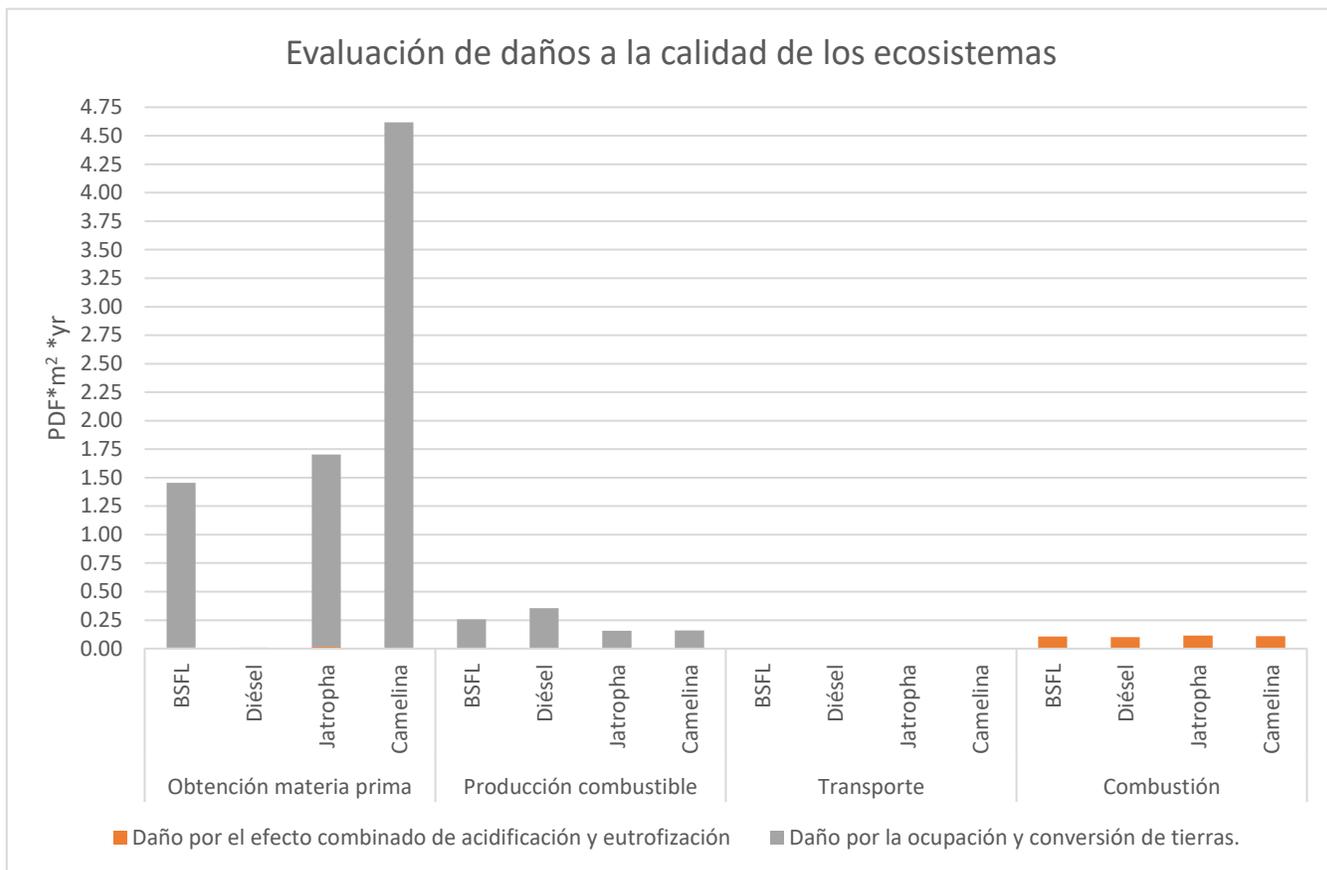


Figura 18 Evaluación de daños a la calidad de los ecosistemas.

8.2.3.3 Categoría de daños a los recursos

La categoría de daños a los recursos mide la energía que se requiere en el futuro para extraer minerales y recursos fósiles; ésta se mide en MJ e indica la energía que se está desperdiciando para las generaciones futuras. Esta categoría se divide en dos subcategorías: daños a los recursos causados por la extracción de minerales, y daños a los recursos causados por la extracción de combustibles fósiles.

En la Figura 19 se presentan los resultados de la evaluación del impacto ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de larvas BSFL, jatropha, camelina y diésel, enfocándose en los daños a los recursos. Es notable que en la subcategoría de daños asociados a la extracción de minerales no se identifica ningún impacto para ninguno de los combustibles estudiados. Esto se debe a que ni el biodiésel ni el diésel dependen directamente de la extracción de minerales para su producción. El biodiésel evaluado se obtiene del aceite producido por larvas alimentadas con suero de queso, así como de cultivos no alimenticios en el caso del biodiésel de

segunda generación. Por su parte, el diésel se deriva del petróleo crudo, que se clasifica como un combustible fósil, no como un mineral.

En la subcategoría de daños a los recursos causados por la extracción de combustibles fósiles, se observa que, durante la etapa de obtención y acondicionamiento de la materia prima, el diésel genera un impacto significativamente mayor en los recursos en comparación con todos los tipos de biodiésel evaluados. El uso de biodiésel a partir de jatropha, BSFL y camelina reduce los daños en esta etapa en un 79.24%, 91.26% y 94.60%, respectivamente, en comparación con el diésel convencional.

En la fase de producción del combustible, el diésel presenta nuevamente mayores daños en comparación con el biodiésel obtenido de diversas materias primas. En la etapa de transporte, los daños relacionados con la extracción de combustibles fósiles son más elevados para el biodiésel derivado de BSFL en comparación con el biodiésel de segunda generación y el diésel, siendo un 49.5% mayor que en este último. Esta diferencia se debe a la mayor cantidad de sustrato que debe ser transportado.

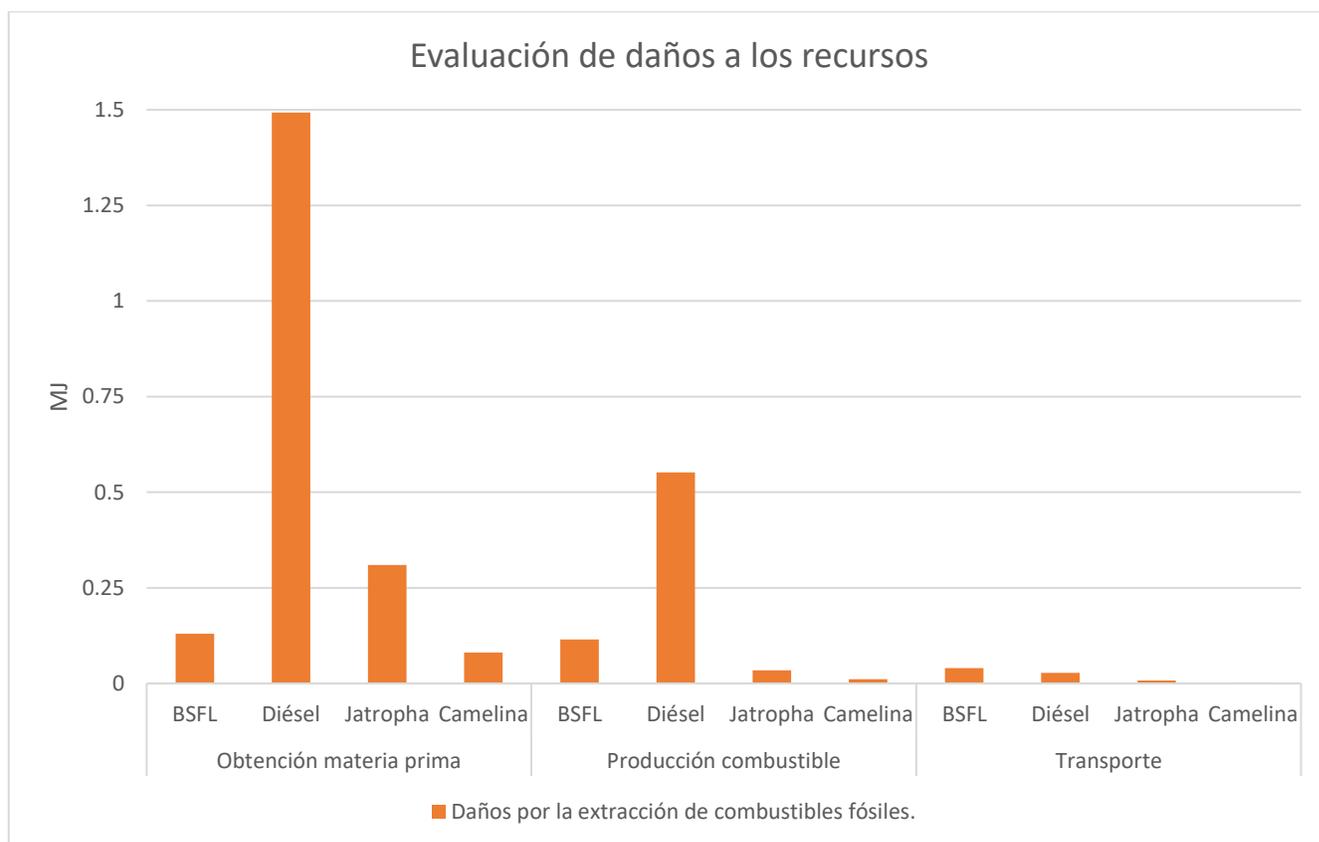


Figura 19 Evaluación de daños a los recursos

8.2.4 Interpretación de resultados

La Figura 20 muestra una comparativa de los resultados obtenidos en el análisis de ciclo de vida realizado; en esta Figura 20 se representa la evaluación de los impactos potenciales que tienen la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL, jatropha, camelina y diésel en todas sus etapas.

Se puede observar que el biodiésel, a partir de las tres materias primas comparadas, tiene un mayor impacto en la salud humana que la producción del diésel convencional. Esto se debe a que, en la etapa de obtención y acondicionamiento de materia prima y en la etapa de producción de biodiésel, se genera un impacto significativamente mayor en esta categoría en comparación con el diésel. Para el caso del biodiésel a partir de BSFL, estas emisiones son causadas por la cría de larvas y su metabolismo, así como por el proceso de producción, en el que se requiere una alta cantidad de energía. En el caso del biodiésel de segunda generación, el mayor impacto en la salud se produce en la etapa de cultivo de jatropha y camelina. No obstante, aunque el biodiésel de aceite de BSFL genera un 17% más de daños en la salud respecto al diésel convencional, provoca menos daños en esta categoría en comparación con el biodiésel de segunda generación, ya que el biodiésel de jatropha y camelina genera un 46% y 26% más de daños, respectivamente, en comparación con el diésel.

En cuanto a la categoría de daños a la calidad de los ecosistemas, la producción de biodiésel presenta un mayor impacto en comparación con el diésel. Esta diferencia está directamente relacionada con el uso y conversión de tierras; este último factor es el mayor contribuyente a esta categoría, ya que la construcción desde cero de una nueva planta productora de biodiésel conlleva la alteración de los hábitats y las comunidades biológicas. En el caso del biodiésel de segunda generación, el valor obtenido en esta categoría es mayor que el del biodiésel de BSFL, debido a las hectáreas requeridas para el cultivo de plantas. En cambio, en el caso del diésel convencional, este combustible es el que menos daños tiene en esta categoría, ya que no se produce ningún impacto por la conversión de suelo debido a que las plantas productoras de diésel ya existen.

El biodiésel tiene un impacto significativamente menor en los recursos en comparación con el diésel, lo que sugiere que la producción y uso del biodiésel son más sostenibles en términos del agotamiento de los recursos; al contrario que en la producción del diésel que se produce a partir del petróleo, el cual es un recurso no renovable cuyo uso intensivo contribuye al agotamiento de los recursos.

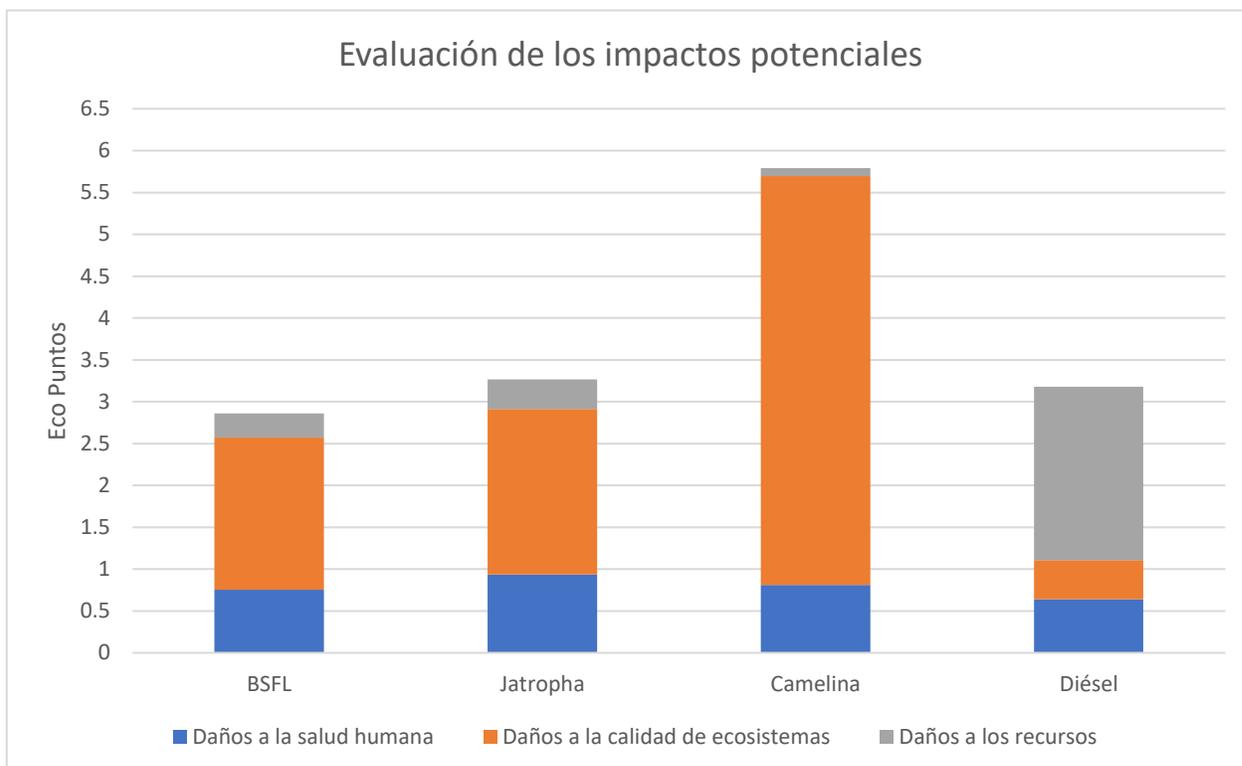


Figura 20 Comparación de los impactos potenciales del ciclo de vida del biodiésel y diésel.

Considerando la suma total de todas las categorías de daños, el biodiésel a partir de BSFL tiene un impacto menor en comparación con el diésel, con una reducción del 10.10%. En cambio, el biodiésel de jatropha y camelina presenta un aumento en los impactos ocasionados del 2.68% y 82.08%, respectivamente. Esto indica que, aunque el biodiésel de BSFL presenta mayores impactos en la salud humana y en la calidad de los ecosistemas en comparación con el diésel, su menor impacto en los recursos contribuye a una carga total de daños inferior en comparación con el diésel.

Es importante destacar que la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL presentó mejores resultados que la producción de biodiésel de segunda generación. Esto se debe a que en la producción de biodiésel de BSFL se le da un valor al suero de queso como alimento para las larvas. Este residuo es un subproducto de la industria láctea que a menudo se considera un desecho contaminante, por lo que su utilización no sólo reduce la contaminación que causan este tipo de residuos, sino que también disminuye el impacto ambiental asociado con su eliminación.

Por último, es importante recordar que, en la actualidad, aún no es posible utilizar biodiésel al 100% en la mayoría de los motores; este debe combinarse con diésel derivado del petróleo. Por lo tanto, en la Tabla 11 se muestra el impacto ambiental asociado a la producción de biodiésel en diferentes mezclas, como B0, B5, B10, B20, B50, y B100. Estas mezclas representan distintos porcentajes de biodiésel en la combinación, siendo B0 completamente de origen fósil y B100 completamente de biodiésel. Analizar estas combinaciones permite evaluar cómo varía el impacto ambiental a medida que aumenta la proporción de biodiésel en la mezcla.

Tabla 11 Impacto ambiental de diferentes mezclas de biodiésel a partir BSFL en comparación con diésel convencional

Tipo de mezcla	Categoría de daño			Total de impacto	Reducción de daño
	Salud	Ecosistemas	Recursos		
	DALYS	PDF*m ² *año	MJ	Eco Puntos	%
B0	0.642	0.466	2.072	3.180	0.00%
B5	0.647	0.534	1.983	3.164	0.50%
B10	0.653	0.601	1.894	3.148	1.01%
B20	0.664	0.737	1.715	3.116	2.02%
B50	0.697	1.143	1.179	3.019	5.05%
B100	0.753	1.820	0.287	2.859	10.10%

El análisis de la tabla revela que, a medida que aumenta la proporción de biodiésel en la mezcla, se incrementa el impacto sobre la salud humana y el daño a los ecosistemas. Esto sugiere que el biodiésel puede reducir otros tipos de impactos ambientales, como el uso de recursos; sin embargo, también éste puede tener consecuencias negativas en términos de salud y daño ecológico, debido a factores como las emisiones y la conversión de tierras para la producción de las materias primas.

Para profundizar en esta observación, se realizó un análisis de tendencia utilizando modelos de regresión lineal para cada categoría de impacto. Esto permite examinar cómo la proporción de biodiésel afecta cada categoría: salud, ecosistemas y uso de recursos. En la Figura 21 se presentan las tendencias obtenidas para cada categoría, donde se pueden observar claramente las relaciones entre la proporción de biodiésel y los impactos ambientales.

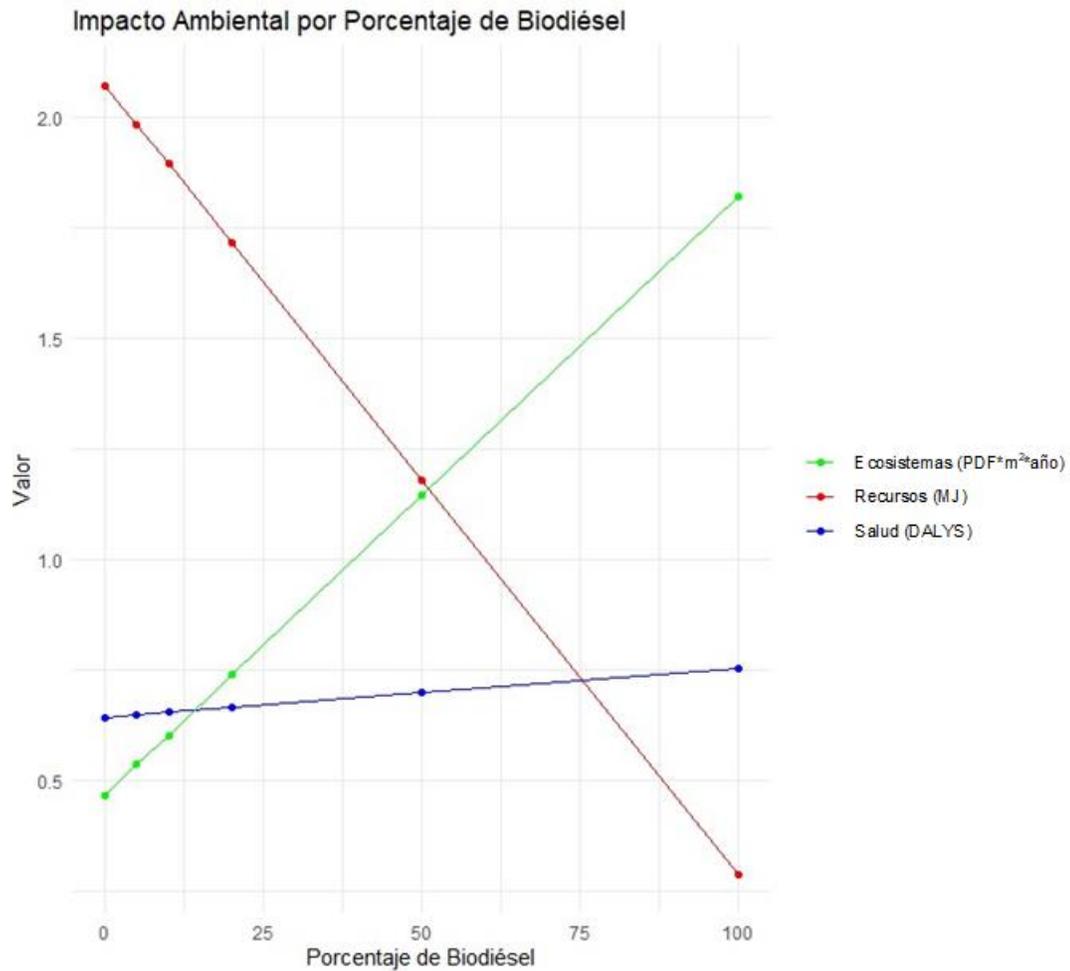


Figura 21 Gráfico de tendencias para cada categoría de impacto obtenida mediante R studio

En el análisis de salud humana, la pendiente positiva de 0.001111 y un p-value < 0.001 indican que cada aumento del 1% en la proporción de biodiésel se asocia con un incremento de 0.001111 DALYs en los daños a la salud. Esta relación significativa demuestra que mayores proporciones de biodiésel en la mezcla contribuyen a un aumento constante en los daños a la salud. Además, el p-value bajo refuerza que esta tendencia es estadísticamente robusta, sugiriendo que el incremento en los impactos en salud no es fruto del azar, sino una consecuencia directa de la variación en la mezcla de biodiésel.

De manera similar, el análisis de regresión para el daño a los ecosistemas mostró una pendiente de 0.01354 con un p-value < 0.001. Esto indica una relación positiva significativa entre el porcentaje de biodiésel y el daño ecológico, con un incremento de 0.01354 PDFm²año en el daño a los ecosistemas por cada aumento del 1% en la proporción de biodiésel en la mezcla. Este

aumento lineal resalta que la incorporación de mayores cantidades de biodiésel está asociada con un incremento en el daño a los ecosistemas, reflejando una tendencia clara y significativa en el impacto ambiental.

Por otro lado, el análisis de regresión para el daño a los recursos reveló una pendiente negativa de -0.01785 con un $p\text{-value} < 0.001$. Esto indica que cada aumento del 1% en la proporción de biodiésel en la mezcla se asocia con una reducción de 0.01785 MJ en el daño a los recursos. Esta relación inversa resalta la ventaja ambiental del biodiésel en términos de eficiencia en el uso de recursos, mostrando que a medida que se incrementa la proporción de biodiésel, se observa una disminución significativa en el impacto sobre los recursos.

A pesar del incremento en los impactos sobre la salud y los ecosistemas, el impacto total medido en Eco Puntos disminuye a medida que se incrementa la proporción de biodiésel, logrando una reducción del 10.10% en B100 en comparación con B0. Estos resultados indican que, aunque el biodiésel presenta ciertos desafíos en términos de salud y ecología, su contribución a la reducción del impacto ambiental total es significativa. El análisis de regresión lineal, con valores p altamente significativos para cada modelo, subraya la solidez de las tendencias observadas y la importancia de equilibrar estos factores en la transición hacia un mayor uso de biodiésel, destacando la reducción en el uso de recursos como un beneficio clave.

8.3 Evaluación del cumplimiento con el estándar RSB-STD-01-011

8.3.1 Recolección de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL

De acuerdo a lo definido en el estándar RSB-STD-01-010, se recopilaron las emisiones obtenidas en el AICV para las siguientes etapas que establece el estándar:

- Emisiones resultantes de la captura o recogida de los productos al final de su vida útil, emisiones de campo, emisiones por la extracción del aceite.
- Emisiones resultantes de la transformación en combustibles.
- Emisiones del transporte desde el punto de captura/recogida hasta la estación de combustible/distribuidor final.
- Emisiones procedentes de la combustión/uso del combustible.

La Tabla 12 muestra las emisiones generadas por la producción de biodiésel según el estándar RSB-STD-01-010. En esta Tabla 12, se observa que únicamente se consideran las emisiones de

CO₂, CH₄ y N₂O. Esto se debe a que el estándar especifica que, para certificar un biocombustible, es crucial presentar sus emisiones en unidades de kg CO₂eq. Esta unidad de medida estándar se utiliza para comparar las emisiones de varios GEI en función de su potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2001).

El motivo por el cual el estándar RSB-STD-001-010 se centra en las emisiones de GWP es porque los GEI, específicamente el CO₂, CH₄ y N₂O, son los principales contribuyentes al calentamiento global. Estos gases se consideran los más importantes debido a su alta incidencia en el cambio climático, representando aproximadamente el 80% del calentamiento global total (Von Arnold, 2004). Otros contaminantes, como SO_x, NH₃, VOC, NO_x, etc., no se consideran en este cálculo porque sus efectos primarios no son en el calentamiento global directo, sino que se evalúan en términos de eutrofización y acidificación. El enfoque en GWP permite una evaluación directa y estandarizada del impacto climático de los biocombustibles, facilitando la comparabilidad y la certificación a nivel internacional.

Tabla 12 Recolección de emisiones generadas por la producción de biodiésel a partir del aceite de BSFL establecidas por el estándar RSB-STD-01-10

Emisión	Etapa				Total
	1	2	3	4	
kg de CO ₂	3,951.62	3,101.62	0.49	3,591.63	10,645.36
kg de CH ₄	7.78	6.94	5.18E-06	0	14.72
kg N ₂ O	0.057	0.05	6.96E-07	0	0.107

(1) Emisiones resultantes de la captura o recogida de los productos al final de su vida útil, emisiones de campo, emisiones por la extracción del aceite. (2) Emisiones resultantes de la transformación en combustibles. (3) Emisiones del transporte desde el punto de captura/recogida hasta la estación de combustible/distribuidor final. (4) Emisiones procedentes de la combustión/uso del combustible

8.3.2 Cálculo de emisiones evitadas

El uso de suero de queso como residuo para alimentar a las BSFL presenta una oportunidad significativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El suero de queso es un subproducto de la industria quesera, el cual generalmente se desecha a cuerpos de agua (Cruz, 2018); esto provoca un daño al ambiente debido a que este subproducto presenta un alto contenido de materia orgánica, con una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 60,000 a 80,000 ppm. Este valor elevado de DQO indica una gran cantidad de material biodegradable que, si no se gestiona adecuadamente, puede resultar en la liberación de gases de efecto invernadero (Lavelli y Beccalli, 2022).

Cada kilogramo de suero de queso tiene el potencial de emitir 120.23 gramos de CO₂eq debido a su alto valor de DQO y a los procesos de descomposición anaeróbica que ocurren cuando el suero se elimina de manera convencional (Utama et al., 2019; Rodríguez, 2020).

La Tabla 13 muestra las emisiones evitadas por el uso del suero de queso como alimento de BSFL. Además, es importante resaltar que el proceso de alimentación de las BSFL a partir de este residuo no sólo ayuda a reducir la cantidad de emisiones de CO₂eq, sino que también transforma el suero de queso en biomasa de insectos. Esta biomasa puede ser utilizada posteriormente como una fuente de proteínas en alimentación animal o como abono orgánico, cerrando así el ciclo de nutrientes y minimizando el impacto ambiental.

Tabla 13 Emisiones emitidas por la revalorización de suero de queso como alimento de BSFL

g CO ₂ eq emitido por kg de suero de queso vertido	kg de suero de queso utilizados para la producción de 1 ton de biodiésel	Emisiones evitadas (kg de CO ₂ eq/ton biodiésel)
120.23	45,052.63	5,416.80

8.3.3 Conversión de emisiones

Se convirtieron todas las emisiones a la unidad de kilogramo de CO₂ equivalente por tonelada de biodiésel producido (kg CO₂e/ton) según lo requerido por el estándar RSB-STD-01-010. Para realizar la conversión de las emisiones, se utilizaron los factores de conversión que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14 Factores de conversión de emisiones a kgCO₂

Emisión	Factor de conversión CO ₂ eq	Referencia
CO ₂	1	
CH ₄	23	(IPCC, 2021)
N ₂ O	296	

Para obtener el total de emisiones en términos de kg de CO₂e por tonelada de biodiésel producido, se multiplicaron las emisiones presentadas en la Tabla 1a por su respectivo factor de conversión, los resultados obtenidos se observan en la Tabla 15.

Tabla 15 kg de CO₂e emitido por la producción de una tonelada de biodiésel a partir de aceite de BSFL

Emisión	Etapa			
	1	2	3	4
kg de CO ₂ e	4,147.43	3,276.04	0.490	3,591.63

(1) Emisiones resultantes de la captura o recogida de los productos al final de su vida útil, emisiones de campo, emisiones por la extracción del aceite. (2) Emisiones resultantes de la transformación en combustibles. (3) Emisiones del transporte desde el punto de captura/recogida hasta la estación de combustible/distribuidor final. (4) Emisiones procedentes de la combustión/uso del combustible.

8.3.4 Sumatoria de emisiones e integración de emisiones evitadas

Para calcular las emisiones totales a lo largo del ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL se empleó la ecuación 3:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

Donde:

- E_{total} Es el total de las emisiones en términos de CO₂e
- E_i Es la cantidad de emisiones en términos de CO₂e en la etapa i del ciclo de vida
- n Es el total de etapas del ciclo de vida

Desglosando la ecuación 3, se obtiene la ecuación 4:

$$E_{total}(kg CO_2e) = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (4)$$

Donde:

- E_1 son las emisiones resultantes de la captura o recogida de los productos al final de su vida útil, emisiones de campo, emisiones por la extracción del aceite.
- E_2 son las emisiones resultantes de la transformación en combustibles.
- E_3 son las emisiones del transporte desde el punto de captura/recogida hasta la estación de combustible/distribuidor final.
- E_4 son las emisiones procedentes de la combustión/uso del combustible.

Sustituyendo los valores de la Tabla 15 en la ecuación 4, se obtiene el valor de las emisiones totales:

$$E_{total} = 4147.43 + 3276.04 + 0.49 + 3591.93 = 11,015.89 \text{ kg } CO_2e$$

El valor de las emisiones totales es de 11,015.89 kg CO_{2e}; no obstante, este valor no es el final debido a que se deben restar las emisiones evitadas, para obtener el valor de las emisiones neta se utiliza la ecuación 5.

$$E_{neto} = E_{total} - E_{evitadas} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$E_{neto} = 11,015.89 - 5,416.8 = 5599.09 \text{ kg } CO_2e$$

Por lo tanto, el valor de las emisiones netas, después de considerar las emisiones evitadas, es de 5,599.09 kg CO_{2e}.

8.3.5 Verificación del cumplimiento

Para la evaluación del cumplimiento con el estándar RSB-STD-001-010 en términos de reducción de emisiones, se comparan las emisiones netas del proceso actual con las emisiones de la línea base de referencia.

Las emisiones netas calculadas para el proceso actual son 6,032.54 kg CO_{2e}, mientras que las emisiones de la línea base de referencia son 7,520.77 kg CO_{2e}.

El porcentaje de reducción de emisiones se calcula utilizando la ecuación (6):

$$\text{Porcentaje de reducción} = \left(\frac{\text{emisiones de la línea base} - \text{emisiones netas}}{\text{emisiones de la línea base}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$\text{Porcentaje de reducción} = \left(\frac{7,520.77 - 5,599.09}{7,520.77} \right) \times 100 = 25.55\%$$

El porcentaje de reducción de emisiones es de 25.55%. Según el estándar RSB-STD-001-010, se debe cumplir con una reducción mínima del 50% para considerarse una alternativa al uso del combustible a partir de petróleo.

Dado que la reducción obtenida es del 25.55%, no se alcanza el porcentaje requerido por el estándar. Por lo tanto, a pesar que existe una reducción de las emisiones liberadas, el proceso actual no cumple con los requisitos de reducción de emisiones especificados en el estándar RSB-STD-001-010.

IX. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se realizó un ACV empleando las herramientas GREET y Eco-indicador 99 para evaluar el impacto ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL alimentadas con suero de queso. Los resultados obtenidos se compararon con los impactos ambientales del biodiésel de segunda generación y del diésel convencional. El análisis mostró que el biodiésel de BSFL genera menores impactos ambientales en comparación con el biodiésel de jatropha y camelina. No obstante, presenta un mayor impacto en las categorías de daños a la salud humana y calidad de los ecosistemas respecto al diésel convencional, el cual, a su vez, causa un impacto significativamente mayor en la categoría de daños a los recursos en comparación con el biocombustible.

Aunque el análisis de tendencias demostró que, al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla con diésel convencional, se incrementan los daños en las categorías de salud humana y calidad de ecosistemas; el biodiésel destaca por su ventaja significativa en cuanto a la preservación de recursos naturales, mostrando un menor impacto en la categoría de agotamiento de recursos. Como resultado, el biodiésel de BSFL presenta un impacto ambiental total reducido, disminuyendo los daños en un 10.10%

Posteriormente, se evaluó el cumplimiento del biodiésel con el estándar RSB-STD-001-010, el cual exige una reducción mínima del 50% en las emisiones producidas. El análisis mostró que el biodiésel logró alcanzar una disminución del 25.55% en las emisiones.

Con respecto a la hipótesis planteada, ésta se cumplió parcialmente. La producción de biodiésel a partir de aceite de BSFL demostró tener un menor impacto ambiental que el proceso de producción de diésel convencional. Sin embargo, no se alcanzó el objetivo en términos de reducción de emisiones, ya que los resultados indican que el biodiésel no cumple con los requisitos de reducción de emisiones especificados por el estándar RSB.

Por lo tanto, los hallazgos de esta tesis resaltan la necesidad de mejorar los procesos de producción de biodiésel a partir de BSFL para aumentar la reducción de emisiones y cumplir con los estándares de sostenibilidad. Aunque el biodiésel presenta ventajas significativas en términos de reducción del impacto sobre los recursos naturales, se requieren más investigaciones y optimizaciones para mejorar su desempeño en las categorías de salud humana y calidad de los ecosistemas, así como para lograr las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los estándares internacionales de sostenibilidad.

X. REFERENCIAS

- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Amid, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Khoshnevisan, B., Kianian, G., 2020. Life cycle assessment analysis of an ultrasound-assisted system converting waste cooking oil into biodiesel. *Renewable Energy* 151, 1352–1364. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.144>
- Akram, F., Haq, I. ul, Raja, S.I., Mir, A.S., Qureshi, S.S., Aqeel, A., Shah, F.I., 2022. Current trends in biodiesel production technologies and future progressions: A possible displacement of the petro-diesel. *Journal of Cleaner Production* 370, 133479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133479>
- Al-Mawali, K.S., Osman, A.I., Al-Muhtaseb, A.H., Mehta, N., Jamil, F., Mjalli, F., Vakili-Nezhaad, G.R., Rooney, D.W., 2021. Life cycle assessment of biodiesel production utilising waste date seed oil and a novel magnetic catalyst: A circular bioeconomy approach. *Renewable Energy* 170, 832–846. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.027>
- Al-Muhtaseb, A.H., Osman, A.I., Jamil, F., Mehta, N., Al-Haj, L., Coulon, F., Al-Maawali, S., Al Nabhani, A., Kyaw, H.H., Zar Myint, M.T., Rooney, D.W., 2022. Integrating life cycle assessment and characterisation techniques: A case study of biodiesel production utilising waste *Prunus Armeniaca* seeds (PAS) and a novel catalyst. *Journal of Environmental Management* 304, 114319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114319>
- Al-Muhtaseb, A.H., Osman, A.I., Murphin Kumar, P.S., Jamil, F., Al-Haj, L., Al Nabhani, A., Kyaw, H.H., Myint, M.T.Z., Mehta, N., Rooney, D.W., 2021. Circular economy approach of enhanced bifunctional catalytic system of CaO/CeO₂ for biodiesel production from waste loquat seed oil with life cycle assessment study. *Energy Conversion and Management* 236, 114040. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114040>
- Babadi, A.A., Rahmati, S., Fakhlai, R., Barati, B., Wang, S., Doherty, W., Ostrikov, K. (Ken), 2022. Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities. *Biomass and Bioenergy* 163, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106521>
- Bashir, M.A., Wu, S., Zhu, J., Krosuri, A., Khan, M.U., Ndeddy Aka, R.J., 2022. Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review. *Fuel Processing Technology* 227, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107120>
- Bernardo, A., Howard-Hildige, R., O’Connell, A., Nichol, R., Ryan, J., Rice, B., Roche, E., Leahy, J.J., 2003. Camelina oil as a fuel for diesel transport engines. *Industrial Crops and Products* 17, 191–197. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00098-5](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00098-5)
- Bhonsle, A.K., Singh, J., Trivedi, J., Atray, N., 2022. Comparative LCA studies of biodiesel produced from used cooking oil using conventional and novel room temperature processes. *Bioresource Technology Reports* 18, 101072. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101072>
- Caltzontzin Rabell, V., Romero, H., Gutiérrez-Antonio, C., Trejo, J., Feregrino-Perez, A., 2021. Perspectiva ética sobre el uso de insectos en proyectos de investigación 4, 60–69.
- Caltzontzin-Rabell, V., Feregrino-Pérez, A.A., Gutiérrez-Antonio, C., 2024. Bio-upcycling of cheese whey: Transforming waste into raw materials for biofuels and animal feed. *Heliyon* 10, e32700. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32700>

- Cárdenas, K.K.C., Romero-Izquierdo, A.G., Martínez-Guido, S.I., Gutiérrez-Antonio, C., 2022. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: UNA HERRAMIENTA PARA CONTRIBUIR A LA PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE BIOCOMBUSTIBLES DE AVIACIÓN. *Naturaleza y Tecnología*.
- Chang, A., Pan, J.-H., Lai, N.-C., Tsai, M.-C., Mochizuki, T., Toba, M., Chen, S.-Y., Yang, C.-M., 2020. Efficient simultaneous esterification/transesterification of non-edible *Jatropha* oil for biodiesel fuel production by template-free synthesized nanoporous titanosilicates. *Catalysis Today*, VSI: EurasiaCat 356, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.10.006>
- Chen, J., Hou, D., Pang, W., Nowar, E.E., Tomberlin, J.K., Hu, R., Chen, H., Xie, J., Zhang, J., Yu, Z., Li, Q., 2019. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH₃ emissions from pig manure converted by black soldier fly. *Science of The Total Environment* 697, 133840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133840>
- Chowdhury, H., Barua, P., Chowdhury, T., Hossain, N., Islam, R., Sait, S.M., Salam, B., 2021. Synthesis of biodiesel from chicken skin waste: an economic and environmental biofuel feedstock in Bangladesh. *Environ Sci Pollut Res* 28, 37679–37688. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13424-5>
- Chowdhury, H., Loganathan, B., Mustary, I., Alam, F., Mobin, S.M.A., 2019. Chapter 12 - Algae for biofuels: The third generation of feedstock, in: Basile, A., Dalena, F. (Eds.), *Second and Third Generation of Feedstocks*. Elsevier, pp. 323–344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00012-4>
- Chung, Z.L., Tan, Y.H., Chan, Y.S., Kandedo, J., Mubarak, N.M., Ghasemi, M., Abdullah, M.O., 2019. Life cycle assessment of waste cooking oil for biodiesel production using waste chicken eggshell derived CaO as catalyst via transesterification. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 21, 101317. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101317>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992, n.d.
- Cooper, R.N., Houghton, J.T., McCarthy, J.J., Metz, B., 2002. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. *Foreign Affairs* 81, 208. <https://doi.org/10.2307/20033020>
- Corral-Bobadilla, M., Lostado-Lorza, R., Somovilla-Gómez, F., Íñiguez-Macedo, S., 2022. Life cycle assessment multi-objective optimization for eco-efficient biodiesel production using waste cooking oil. *Journal of Cleaner Production* 359, 132113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132113>
- Cruz, D.A.Á. de la, 2018. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DEL SUERO DE QUESO EN MÉXICO. *Agro Productividad* 11.
- Dewangan, A., Yadav, A.K., Mallick, A., 2018. Current scenario of biodiesel development in India: prospects and challenges. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 40, 2494–2501. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1502849>
- DOF - Diario Oficial de la Federación [WWW Document], n.d. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541659&fecha=22/10/2018#gsc.tab=0 (accessed 8.27.24a).
- DOF - Diario Oficial de la Federación [WWW Document], n.d. URL https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016#gsc.tab=0 (accessed 8.27.24b).
- Dufour, J., Iribarren, D., 2012. Life cycle assessment of biodiesel production from free fatty acid-rich wastes. *Renewable Energy* 38, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.016>

- Feng, W., Xiong, H., Wang, W., Duan, X., Yang, T., Wu, C., Yang, F., Xiong, J., Wang, T., Wang, C., 2019. Energy consumption analysis of lipid extraction from black soldier fly biomass. *Energy* 185, 1076–1085. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.113>
- Forcina, A., Petrillo, A., Travagliani, M., di Chiara, S., De Felice, F., 2023. A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis for verifying the environmental convenience based on the location of sites. *Journal of Cleaner Production* 385, 135727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135727>
- Foteinis, S., Chatzisytheon, E., Litinas, A., Tsoutsos, T., 2020. Used-cooking-oil biodiesel: Life cycle assessment and comparison with first- and third-generation biofuel. *Renewable Energy* 153, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.022>
- Gasca-González, R., Gómez-Castro, F.I., Romero-Izquierdo, A.G., Zenón-Olvera, E., Gutiérrez-Antonio, C., 2018. Design of a low-cost process for the production of biodiesel using waste oil as raw material, in: Friedl, A., Klemeš, J.J., Radl, S., Varbanov, P.S., Wallek, T. (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering, 28 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Elsevier, pp. 1529–1534. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50267-9>
- Gómez-Castro, F.I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Rico-Ramírez, V., Gutiérrez-Antonio, C., Briones-Ramírez, A., Cano-Rodríguez, I., Gamiño-Arroyo, Z., 2015. Analysis of alternative non-catalytic processes for the production of biodiesel fuel. *Clean Techn Environ Policy* 17, 2041–2054. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0933-x>
- REET: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model [WWW Document], n.d. . Energy.gov. URL <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/greet-greenhouse-gases-regulated-emissions-and-energy-use-transportation> (accessed 8.24.24).
- Guo, M., Song, W., Buhain, J., 2015. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Gürü, M., Keskin, A., 2016. Evaluation of Biodiesel Production, Engine Performance, and Emissions. *J. Electron. Mater.* 45, 3882–3888. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4573-7>
- Hamza, M., Ayoub, M., Shamsuddin, R.B., Mukhtar, A., Saqib, S., Zahid, I., Ameen, M., Ullah, S., Al-Sehemi, A.G., Ibrahim, M., 2021. A review on the waste biomass derived catalysts for biodiesel production. *Environmental Technology & Innovation* 21, 101200. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101200>
- Hosseini, S.M., Ahmadi, R., 2017. Performance and emissions characteristics in the combustion of co-fuel diesel-hydrogen in a heavy duty engine. *Applied Energy* 205, 911–925. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.044>
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., 2021. Life cycle assessment of bioenergy product systems: A critical review. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 1, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100015>
- Ishak, S., Kamari, A., 2019. Biodiesel from black soldier fly larvae grown on restaurant kitchen waste. *Environ Chem Lett* 17, 1143–1150. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00844-y>
- ISO - Familia ISO 14000 — Gestión ambiental [WWW Document], 2023. . ISO. URL <https://www.iso.org/es/normas/mas-comunes/familia-iso-14000> (accessed 8.27.24).
- Jung, S., Jung, J.-M., Tsang, Y.F., Bhatnagar, A., Chen, W.-H., Lin, K.-Y.A., Kwon, E.E., 2022. Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-

- catalytic transesterification. *Energy* 238, 121700.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121700>
- Kaczor, M., Bulak, P., Proc-Pietrycha, K., Kirichenko-Babko, M., Bieganski, A., 2023. The Variety of Applications of *Hermetia illucens* in Industrial and Agricultural Areas—Review. *Biology* 12, 25. <https://doi.org/10.3390/biology12010025>
- Kargbo, H., Harris, J.S., Phan, A.N., 2021. “Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110168>
- Kathumbi, L.K., Home, P.G., Raude, J.M., Gathitu, B.B., 2023. Performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled by biodiesel from black soldier fly larvae: Effects of synthesizing catalysts with citric acid. *Heliyon* 9, e21354.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21354>
- Kathumbi, L.K., Home, P.G., Raude, J.M., Gathitu, B.B., 2022. Performance of Citric Acid as a Catalyst and Support Catalyst When Synthesized with NaOH and CaO in Transesterification of Biodiesel from Black Soldier Fly Larvae Fed on Kitchen Waste. *Fuels* 3, 295–315. <https://doi.org/10.3390/fuels3020018>
- Kiehadrouzinezhad, M., Merabet, A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., 2023. A life cycle assessment perspective on biodiesel production from fish wastes for green microgrids in a circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports* 21, 101303.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101303>
- Kim, C.-H., Ryu, J., Lee, Jongkeun, Ko, K., Lee, Ji-yeon, Park, K.Y., Chung, H., 2021. Use of Black Soldier Fly Larvae for Food Waste Treatment and Energy Production in Asian Countries: A Review. *Processes* 9, 161. <https://doi.org/10.3390/pr9010161>
- Krishnasamy, A., Bukkarapu, K.R., 2021. A comprehensive review of biodiesel property prediction models for combustion modeling studies. *Fuel* 302, 121085.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121085>
- La Bioenergía en América Latina y El Caribe. El estado de arte en países seleccionados., n.d.
- Lavelli, V., Beccalli, M.P., 2022. Cheese whey recycling in the perspective of the circular economy: Modeling processes and the supply chain to design the involvement of the small and medium enterprises. *Trends in Food Science & Technology* 126, 86–98.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.013>
- Leiva-Candía, D.E., Dorado, M.P., 2014. New Frontiers in the Production of Biodiesel: Biodiesel Derived from Macro and Microorganisms, in: Domingos Padula, A., Silveira dos Santos, M., Benedetti Santos, O.I., Borenstein, D. (Eds.), *Liquid Biofuels: Emergence, Development and Prospects*, Lecture Notes in Energy. Springer, London, pp. 205–225.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6482-1_11
- Leong, S.Y., Kutty, S.R.M., 2020. Characteristic of *Hermetia illucens* Fatty Acid and that of the Fatty Acid Methyl Ester Synthesize Based on Upcycling of Perishable Waste. *Waste Biomass Valor* 11, 5607–5614. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01018-0>
- Leung, D., Yang, D., Li, Z., Zhao, Z., Chen, J., Zhu, L., 2012. Biodiesel from *Zophobas morio* Larva Oil: Process Optimization and FAME Characterization. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 1036–1040. <https://doi.org/10.1021/ie201403r>
- Li, Q., Zheng, L., Cai, H., Garza, E., Yu, Z., Zhou, S., 2011a. From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible. *Fuel* 90, 1545–1548.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.016>

- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J.K., Yu, Z., 2011b. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste Management* 31, 1316–1320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.005>
- Liu, Y., Zhong, B., Lawal, A., 2022. Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct. *RSC Adv.* 12, 27997–28008. <https://doi.org/10.1039/D2RA05090K>
- Maheshwari, P., Haider, M.B., Yusuf, M., Klemeš, J.J., Bokhari, A., Beg, M., Al-Othman, A., Kumar, R., Jaiswal, A.K., 2022. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production* 355, 131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>
- Manzano-Agugliaro, F., Sanchez-Muros, M.J., Barroso, F.G., Martínez-Sánchez, A., Rojo, S., Pérez-Bañón, C., 2012. Insects for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3744–3753. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.017>
- Mathew, G.M., Raina, D., Narisetty, V., Kumar, V., Saran, S., Pugazhendhi, A., Sindhu, R., Pandey, A., Binod, P., 2021. Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. *Science of The Total Environment* 794, 148751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148751>
- Mathimani, T., Pugazhendhi, A., 2019. Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 17, 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.12.007>
- Mbah, C.E., Elekima, G.O.V., 2007. Nutrient composition of some terrestrial insects in Ahmadu Bello University, Samaru Zaria Nigeria. *Science World Journal* 2. <https://doi.org/10.4314/swj.v2i2.51728>
- Mohan, K., Sathishkumar, P., Rajan, D.K., Rajarajeswaran, J., Ganesan, A.R., 2023. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae as potential feedstock for the biodiesel production: Recent advances and challenges. *Science of The Total Environment* 859, 160235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160235>
- Mohiddin, M.N.B., Tan, Y.H., Seow, Y.X., Kansedo, J., Mubarak, N.M., Abdullah, M.O., Chan, Y.S., Khalid, M., 2021. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 98, 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>
- Monteiro, M.R., Kugelmeier, C.L., Pinheiro, R.S., Batalha, M.O., da Silva César, A., 2018. Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>
- Morais, S., Mata, T.M., Martins, A.A., Pinto, G.A., Costa, C.A.V., 2010. Simulation and life cycle assessment of process design alternatives for biodiesel production from waste vegetable oils. *Journal of Cleaner Production* 18, 1251–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.014>
- Mu, D., Addy, M., Anderson, E., Chen, P., Ruan, R., 2016. A life cycle assessment and economic analysis of the Scum-to-Biodiesel technology in wastewater treatment plants. *Bioresource Technology* 204, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.063>
- Nguyen, H.C., Liang, S.-H., Chen, S.-S., Su, C.-H., Lin, J.-H., Chien, C.-C., 2018a. Enzymatic production of biodiesel from insect fat using methyl acetate as an acyl acceptor: Optimization by using response surface methodology. *Energy Conversion and Management* 158, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.068>
- Nguyen, H.C., Liang, S.-H., Doan, T.T., Su, C.-H., Yang, P.-C., 2017. Lipase-catalyzed synthesis of biodiesel from black soldier fly (*Hermetica illucens*): Optimization by using response

- surface methodology. *Energy Conversion and Management* 145, 335–342.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.010>
- Nguyen, H.C., Liang, S.-H., Li, S.-Y., Su, C.-H., Chien, C.-C., Chen, Y.-J., Huong, D.T.M., 2018b. Direct transesterification of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for biodiesel production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 85, 165–169.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.035>
- Nguyen, H.C., Nguyen, M.L., Liang, S.-H., Su, C.-H., Wang, F.-M., 2020. Switchable Solvent-Catalyzed Direct Transesterification of Insect Biomass for Biodiesel Production. *Bioenerg. Res.* 13, 563–570. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10085-8>
- Nocontaminante, Y., n.d. ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE:
- Osman, A.I., Qasim, U., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A.H., Jrai, A.A., Al-Riyami, M., Al-Maawali, S., Al-Haj, L., Al-Hinai, A., Al-Abri, M., Inayat, A., Waris, A., Farrell, C., Maksoud, M.I.A.A., Rooney, D.W., 2021. Bioethanol and biodiesel: Bibliometric mapping, policies and future needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152, 111677.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111677>
- Pang, W., Hou, D., Chen, J., Nowar, E.E., Li, Z., Hu, R., Tomberlin, J.K., Yu, Z., Li, Q., Wang, S., 2020. Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly. *Journal of Environmental Management* 260, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110066>
- Park, J.-Y., Jung, S., Na, Y.-G., Jeon, C.-H., Cheon, H.-Y., Yun, E.-Y., Lee, S., Kwon, E.E., Kim, J.-K., 2022. Biodiesel production from the black soldier fly larvae grown on food waste and its fuel property characterization as a potential transportation fuel. *Environmental Engineering Research* 27. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.704>
- Pinzi, S., Leiva, D., López-García, I., Redel-Macías, M.D., Dorado, M.P., 2014. Latest trends in feedstocks for biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 8, 126–143.
<https://doi.org/10.1002/bbb.1435>
- Pirzadi, Z., Meshkani, F., 2022. From glycerol production to its value-added uses: A critical review. *Fuel* 329, 125044. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125044>
- Priya, A., Hu, Y., Mou, J., Du, C., Wilson, K., Luque, R., Lin, C.S.K., 2023. Chapter 1 - Introduction: An overview of biofuels and production technologies, in: Luque, R., Lin, C.S.K., Wilson, K., Du, C. (Eds.), *Handbook of Biofuels Production (Third Edition)*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 3–24.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91193-1.00002-0>
- Quiroz-Pérez, E., Gutiérrez-Antonio, C., Vázquez-Román, R., 2019. Modelling of production processes for liquid biofuels through CFD: A review of conventional and intensified technologies. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 143, 107629. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107629>
- Rajaeifar, M.A., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Hemayati, S.S., Heijungs, R., 2019. Biodiesel Production and Consumption: Life Cycle Assessment (LCA) Approach, in: Tabatabaei, M., Aghbashlo, M. (Eds.), *Biodiesel: From Production to Combustion, Biofuel and Biorefinery Technologies*. Springer International Publishing, Cham, pp. 161–192.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-00985-4_8
- Raksasat, R., Kiatkittipong, K., Kiatkittipong, W., Wong, C.Y., Lam, M.K., Ho, Y.C., Oh, W.D., Suryawan, I.W.K., Lim, J.W., 2021. Blended Sewage Sludge–Palm Kernel Expeller to Enhance the Palatability of Black Soldier Fly Larvae for Biodiesel Production. *Processes* 9, 297. <https://doi.org/10.3390/pr9020297>

- Rodríguez Becerra, M., Mance, H., 2009. Cambio climático: lo que está en juego. RSB Standard Certification System Validation, n.d. . RSB. URL <https://rsb.org/the-rsb-standard/about-the-rsb-standard/> (accessed 6.8.23).
- Russi, J.V., 2021. Estándar RSB - Mesa redonda sobre biomateriales sostenibles. biO3. URL <https://bio3consultoria.com.br/conhecendo-o-padrao-rsb/> (accessed 6.8.23).
- Sajid, Z., Khan, F., Zhang, Y., 2016. Process simulation and life cycle analysis of biodiesel production. *Renewable Energy* 85, 945–952. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.046>
- Seng Liew, C., Ren Mong, G., Wei Lim, J., Raksasat, R., Rawindran, H., Hong Leong, W., Devendran Manogaran, M., Ho Chai, Y., Chia Ho, Y., Ur Rahmah, A., Lin, C., Shiong Khoo, K., Kiatkittipong, W., 2023. Life cycle assessment: Sustainability of biodiesel production from black soldier fly larvae feeding on thermally pre-treated sewage sludge under a tropical country setting. *Waste Management* 164, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.013>
- Shahid, M.K., Batool, A., Kashif, A., Nawaz, M.H., Aslam, M., Iqbal, N., Choi, Y., 2021. Biofuels and biorefineries: Development, application and future perspectives emphasizing the environmental and economic aspects. *Journal of Environmental Management* 297, 113268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113268>
- Simpson, A., 2024. USDA, EPA, GREET, NCGA and the rest of Commodity Classic’s alphabet soup. *Indiana Corn and Soy*. URL <https://incornandsoy.org/usda-epa-greet-ncga-and-the-rest-of-commodity-classics-alphabet-soup/> (accessed 8.24.24).
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S.L., Sharma, S., Kumar Sharma, P., Jhalani, A., 2020. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel* 262, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>
- Sitepu, E.K., Perangin-angin, S., Ginting, G.J., Machmudah, S., Sari, R.N., Tarigan, J.B., 2023. Controlled crushing device-intensified direct biodiesel production of Black Soldier Fly larvae. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16402>
- Sosa-Rodríguez, F.S., Vazquez-Arenas, J., 2021. The biodiesel market in Mexico: Challenges and perspectives to overcome in Latin-American countries. *Energy Conversion and Management: X* 12, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100149>
- Su, C.-H., Nguyen, H.C., Bui, T.L., Huang, D.-L., 2019. Enzyme-assisted extraction of insect fat for biodiesel production. *Journal of Cleaner Production* 223, 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.150>
- Thapa, S., Indrawan, N., Bhoi, P.R., 2018. An overview on fuel properties and prospects of *Jatropha* biodiesel as fuel for engines. *Environmental Technology & Innovation* 9, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.003>
- Tillman, A.-M., 2010. 4 - Methodology for Life cycle Assessment, in: Sonesson, U., Berlin, J., Ziegler, F. (Eds.), *Environmental Assessment and Management in the Food Industry*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, pp. 59–82. <https://doi.org/10.1533/9780857090225.2.59>
- Toldrá-Reig, F., Mora, L., Toldrá, F., 2020. Trends in Biodiesel Production from Animal Fat Waste. *Applied Sciences* 10, 3644. <https://doi.org/10.3390/app10103644>
- Tu, Q., McDonnell, B.E., 2016. Monte Carlo analysis of life cycle energy consumption and greenhouse gas (GHG) emission for biodiesel production from trap grease. *Journal of Cleaner Production* 112, 2674–2683. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.028>
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, Rodríguez, J.P., Ruiz-Ochoa, M.A., Universidad Manuela Beltrán. Bucaramanga. Colombia, Meneses, A., niversidad

- Nacional de Colombia, 2020. Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios* 41, 74–84. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p06>
- Utama, G.L., Januaramadhan, I., Dinika, I., Balia, R.L., 2019. Bioconversions of cheese-making wastes to bioethanol and their link to sustainability. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 306, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/306/1/012017>
- Vance, C., Sweeney, J., Murphy, F., 2022. Space, time, and sustainability: The status and future of life cycle assessment frameworks for novel biorefinery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159, 112259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112259>
- Vargas-Ibáñez, L.T., Cano-Gómez, J.J., Zwolinski, P., Evrard, D., 2020. Environmental assessment of an animal fat based biodiesel: Defining goal, scope and life cycle inventory. *Procedia CIRP*, 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE2020) Advancing Life Cycle Engineering : from technological eco-efficiency to technology that supports a world that meets the development goals and the absolute sustainability 90, 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.053>
- Verbitsky, O., Pushkar, S., 2018. ECO-INDICATOR 99, ReCiPe AND ANOVA FOR EVALUATING BUILDING TECHNOLOGIES UNDER LCA UNCERTAINTIES. *Environ. Eng. Manag. J.* 17, 2549–2559. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.253>
- Viorneroy-Portillo, E.A., Bravo-Díaz, B., Mena-Cervantes, V.Y., 2020. Life cycle assessment and emission analysis of waste cooking oil biodiesel blend and fossil diesel used in a power generator. *Fuel* 281, 118739. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118739>
- Wong, C.Y., Kiatkittipong, K., Kiatkittipong, W., Lim, J.W., Lam, M.K., Wu, T.Y., Show, P.L., Daud, H., Goh, P.S., Sakuragi, M., Elfis, 2021. Rhizopus oligosporus-Assisted Valorization of Coconut Endosperm Waste by Black Soldier Fly Larvae for Simultaneous Protein and Lipid to Biodiesel Production. *Processes* 9, 299. <https://doi.org/10.3390/pr9020299>
- Wong, C.-Y., Lim, J.-W., Uemura, Y., Chong, F.-K., Yeong, Y.-F., Mohamad, M., Hermansyah, H., 2018. Insect-based lipid for biodiesel production. *AIP Conference Proceedings* 2016, 020150. <https://doi.org/10.1063/1.5055552>
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T.R., Wang, M., 2022. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 56, 7512–7521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>
- Yang, S., Li, Q., Zeng, Q., Zhang, J., Yu, Z., Liu, Z., 2012. Conversion of Solid Organic Wastes into Oil via *Boettcherisca peregrine* (Diptera: Sarcophagidae) Larvae and Optimization of Parameters for Biodiesel Production. *PLOS ONE* 7, e45940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045940>
- Zabermawi, N.M., Alsulaimany, F.A.S., El-Saadony, M.T., El-Tarabily, K.A., 2022. New eco-friendly trends to produce biofuel and bioenergy from microorganisms: An updated review. *Saudi Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.024>
- Zhang, X., Yan, S., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., 2013. Energy balance and greenhouse gas emissions of biodiesel production from oil derived from wastewater and wastewater sludge. *Renewable Energy* 55, 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.046>
- Zheng, L., Li, Q., Zhang, J., Yu, Z., 2012. Double the biodiesel yield: Rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production. *Renewable Energy* 41, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.004>

