

## Conversión de residuos orgánicos en biodiésel: un enfoque sustentable

*Conversion of organic waste into biodiesel: a sustainable approach*

Carlos Fernández Villascán  
carlosfernandez138@gmail.com

Valeria Caltzontzin-Rabell  
valeria.caltzontzinrabell@gmail.com

Sergio Iván Martínez Guido  
dciq.guido@gmail.com

Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo  
irga9912@gmail.com

Claudia Gutiérrez-Antonio  
Claudia.gutierrez@uaq.mx

### RESUMEN

Los biocombustibles constituyen uno de los puntos clave en la recuperación económica sostenible. Particularmente, el biodiésel es uno de los más estudiados debido a su sencillo proceso de producción, así como fácil almacenamiento y transporte. La producción de biodiésel a nivel mundial se clasifica en cuatro grupos según la materia prima: los aceites vegetales (comestibles y no comestibles), las grasas animales, los aceites residuales de cocina y algunos obtenidos a partir de diferentes microorganismos. Sin embargo, aproximadamente 95 % de la producción mundial se genera a partir de aceites comestibles, lo cual impacta en la rentabilidad. Estudios recientes muestran que es posible obtener aceites de bajo costo a partir de residuos orgánicos mediante un tratamiento biológico. Por ello, en el presente trabajo se estima el potencial de la producción de biodiésel en el estado de Querétaro, considerando como materia prima residuos orgánicos.

**Palabras clave:** biocombustibles, biodiésel, residuos orgánicos, tratamiento biológico.

### ABSTRACT

Biofuels are one of the key points for a sustainable economic recovery. In particular, biodiesel is one of the most studied due to its simple production process, as well as easy storage and transportation. In this sense, the production of biodiesel worldwide has been classified into four groups, depending on the raw material used; thus, in this classification are included vegetable oils (edible and inedible), animal fats, residual cooking oils, as well as some obtained from different microorganisms. However, approximately 95% of biodiesel production worldwide is generated from edible oils, which

impacts the profitability of this biofuel. Recent studies show that it is possible to obtain low-cost oils from organic waste, through biological treatment. Therefore, in this work the potential of biodiesel production in the state of Querétaro is estimated considering organic waste as raw material.

**Keywords:** biofuels, biodiesel, organic residues, biological treatment

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la sociedad enfrenta grandes retos de índole ambiental, económica y de salud. Particularmente, el cambio climático representa uno de los más grandes desafíos desde el punto de vista ambiental. A grandes rasgos, este grave problema ambiental es el resultado de la acumulación de gases de efecto invernadero, los cuales son generados por diversas actividades antropogénicas. El cambio climático se caracteriza por un aumento en la temperatura terrestre, lo cual tiene como consecuencia una alteración en los patrones climatológicos que impacta negativamente en la biodiversidad de los ecosistemas.

Por otra parte, hasta hace unos años, el consumo de los recursos naturales y el uso de combustibles, en su mayoría de origen fósil, han cimentado el desarrollo económico a nivel global. Sin embargo, datos recientes muestran que la producción de combustibles fósiles ha alcanzado su pico máximo, por lo que se prevé una menor disponibilidad, así como una inminente alza en los precios. Ante ello, las economías globales enfrentan el reto de transitar a energías que provengan de fuentes renovables. Adicionalmente, la pandemia originada por el virus SARS-COV2 ha traído consigo una serie de nuevos desafíos, los cuales se asocian principalmente al drástico cambio en los hábitos de consumo que ha modificado, y en algunos casos fracturado, las cadenas de suministro de los diferentes productos y servicios. En este contexto, la Agencia Internacional de Energía, en colaboración con el Banco Mundial, han propuesto un plan de recuperación sostenible (IEA, 2020) que consiste en la inversión en sectores clave. Dentro de ellos se incluyen la generación de energía renovable, uso eficiente de energía, desarrollo de biocombustibles y revalorización de residuos; estos dos últimos aspectos están involucrados con el enfoque de este trabajo.

Los biocombustibles se obtienen a partir de biomasa, la cual se entiende a su vez como toda materia biológica correspondiente a un ciclo corto de carbono; es decir todo material de origen biológico que se produce en semanas, meses o máximo una década. Así, los biocombustibles pueden producirse en estado líquido, sólido o gaseoso a partir de biomasa cultivable (tanto comestible como no comestible) y residual (vegetal y animal). El sector transporte emplea principalmente biocombustibles líquidos, entre los que destacan el bioetanol, biogasolina, biodiésel, bioturbosina y diésel verde. El bioetanol y la biogasolina pueden emplearse como aditivo y biocombustible, respectivamente, en motores que funcionen con gasolina de origen fósil. Por otra parte, el biodiésel y el diésel verde pueden emplearse como aditivo y biocombustible, respectivamente, en motores que operen con diésel de origen fósil. Finalmente, la bioturbosina es un combustible sustentable de aviación que puede emplearse en mezclas con un volumen máximo de 50 % con la turbosina de origen fósil.

El biodiésel es uno de los biocombustibles más estudiados por la comunidad científica, ya que su proceso de producción es relativamente sencillo. Al igual que todos los biocombustibles líquidos previamente mencionados a excepción del bioetanol, se produce mediante el procesamiento de aceites y grasas principalmente. En el caso de los aceites, éstos pueden ser comestibles y no comestibles. Sin embargo, hoy en día el uso de aceites comestibles representa un riesgo para la seguridad alimentaria. Si bien los aceites no comestibles no presentan dicha desventaja, muchos de ellos sí compiten con cultivos de origen alimenticio por tierras fértiles para su producción. Por otra parte, los aceites de microalgas pueden obtenerse en grandes cantidades en tierras no fértiles; no obstante, el costo del proceso de extracción del aceite sigue siendo elevado. Finalmente, los aceites y grasas residuales están disponibles todo el año; sin embargo, es necesario el diseño e implementación de una óptima cadena de recolección para alcanzar una mayor viabilidad. Sin importar las ventajas o desventajas de cada una de estas materias primas, es importante destacar que existe una competencia por adquirirlas, dado que son necesarias para la producción de prácticamente todos los biocombustibles del sector transporte; dicha competencia incrementará aún más el costo de las materias primas, las cuales representan cerca del 60-75 % del costo de producción del biocombustible. Por ello, resulta de gran relevancia la búsqueda de nuevas materias primas de bajo costo. En este contexto, los residuos orgánicos ricos en azúcares y almidones son abundantes, y representan una reserva importante de biomoléculas; estos restos pueden ser transformados en aceites y grasas mediante procesos biológicos sencillos, de bajo costo y con una alta tasa de conversión. En particular, el cultivo de la mosca soldado negra se ha reportado como una estrategia para la transformación eficiente de residuos orgánicos. En este cultivo, los residuos orgánicos son utilizados como alimento de los insectos, y como resultado se obtienen larvas que contienen hasta 40 % de grasas, las cuales a su vez son transformadas en biocombustibles, como el biodiésel.

En el presente trabajo se incluye información sobre la producción de biodiésel a partir de residuos orgánicos ricos en azúcares y almidones, empleando un tratamiento biológico que permita obtener triglicéridos. Primero se presenta información sobre los procesos de producción de biodiésel, y posteriormente sobre el cultivo de la mosca soldado negra. Finalmente, se estima la producción de biodiésel en el estado de Querétaro considerando los residuos orgánicos generados.

### ***¿Cómo se produce el biodiésel?***

El biodiésel está constituido químicamente por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos obtenidos mediante una reacción de transesterificación (Rezania *et al.*, 2019); en dicha reacción, los triglicéridos presentes en los aceites o grasas reaccionan con alcoholes, esencialmente alcohol metílico y etílico, aunque también se han empleado el n-propílico como el n-butílico. La reacción de transesterificación se realiza en presencia de un catalizador, que puede ser líquido o sólido, generando así biodiésel y glicerol como productos finales (Demirbas, 2007; Kirubakaran *et al.*, 2018). En la Figura 1 se pueden observar las etapas principales de producción de biodiésel.

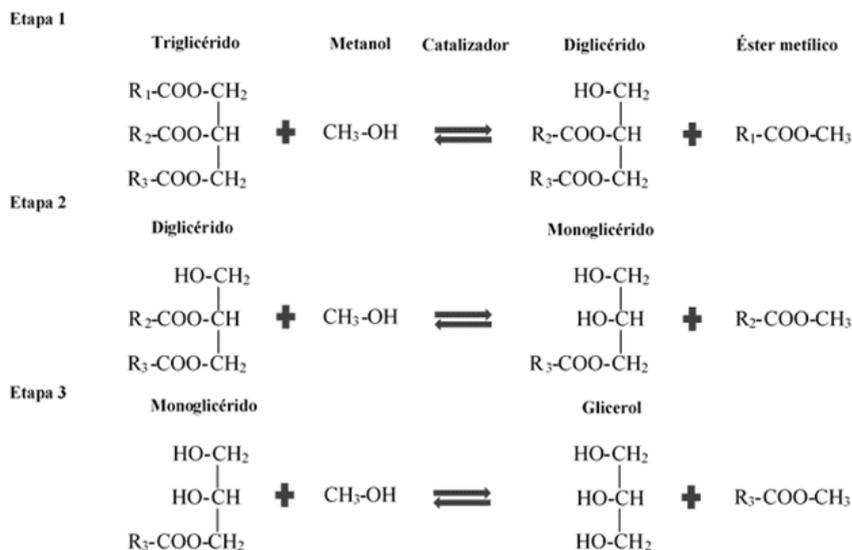


FIGURA 1. ETAPAS DE REACCIÓN DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN EL TRABAJO DE REZANIA *ET AL.*, 2019.

El biodiésel ayuda a la conservación del medio ambiente porque mejora la combustión de ciertos hidrocarburos de 60 a 90 % (IICA, 2010), lo que incrementa la eficiencia y evita el ruido en el motor (Llanes *et al.*, 2017). De igual manera, el uso de este biocombustible brinda una mayor lubricación a los motores, aunque deben hacerse cambios de los empaques (IICA, 2007). El proceso de producción de biodiésel es sencillo, por lo que puede implementarse en zonas rurales (IICA, 2007; IICA, 2010); adicionalmente, su temperatura de inflamabilidad (100 °C) simplifica su almacenamiento y transporte (IICA, 2007). En caso de derrame, el biodiésel no contamina el agua superficial ni los mantos acuíferos (IICA, 2007). Debido a que el biodiésel no está compuesto por hidrocarburos debe emplearse en mezclas con diésel fósil; la más común es la B20 (20 % de biodiésel y 80 % de diésel en volumen); sin embargo, en Indonesia se emplea la mezcla B40, mientras que en Finlandia, Noruega y Brasil emplean mezclas B13, B10.6 y B10.3, respectivamente (Torroba, 2020).

Cabe añadir que la reacción de transesterificación puede llevarse a cabo mediante catálisis homogénea, heterogénea, enzimática, así como con la integración de fluidos supercríticos; estos tópicos serán presentados a continuación.

### *Catálisis homogénea*

En la catálisis homogénea, el catalizador se encuentra en fase líquida, y puede tener naturaleza ácida o básica. La catálisis ácida emplea compuestos inorgánicos tales como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido sulfónico, ácido fosfórico y, en raras ocasiones, el sulfato

férrico en solución. Las reacciones de transesterificación con este tipo de catalizadores presentan grandes eficiencias de conversión de biodiésel con aceites que tengan un alto contenido de agua y ácidos grasos libres; adicionalmente, requieren temperaturas elevadas y tiempos de residencia prolongados para alcanzar una reacción completa. Asimismo, se necesita una alta relación molar entre alcohol-aceite, y debe adicionarse una base para neutralizar los efluentes y evitar la corrosión (Mathew *et al.*, 2021).

Por otra parte, en la catálisis básica se emplean diferentes álcalis fuertes, los cuales se disuelven en el alcohol para formar un alcóxido; en este tipo de catálisis se alcanzan altas conversiones de reacción (98 al 100 %) en menos tiempo, en comparación con catalizadores ácidos, y con una baja relación molar entre alcohol-aceite. Los álcalis pueden ser hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o carbonato de potasio, los cuales son de bajo costo y alta pureza. La principal desventaja de emplear hidróxido de sodio es la síntesis de agua al mezclarse con metanol, lo que provoca una reacción de saponificación; por tal motivo se requieren contenidos de 0.5 a 3 % de ácidos grasos libres en los aceites usados para que exista una reacción completa y una tasa elevada de conversión (Mathew *et al.*, 2021). En la Figura 2 se presenta el diagrama del proceso de biodiésel con catálisis homogénea.

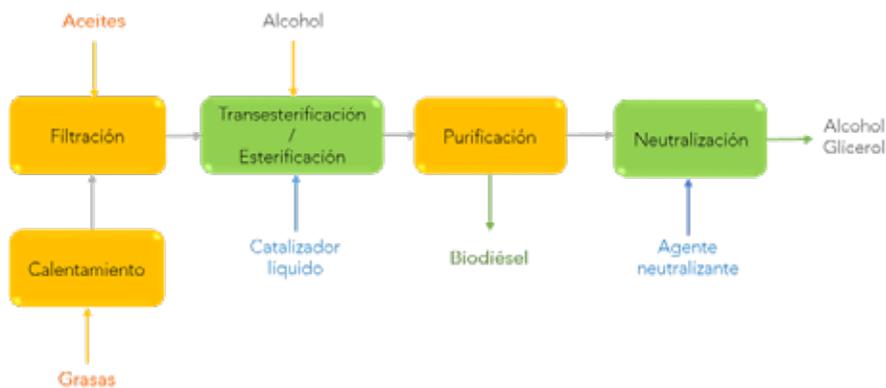


FIGURA 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL MEDIANTE CATÁLISIS HOMOGÉNEA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### *Catálisis heterogénea*

De manera similar a la catálisis homogénea, en la heterogénea es posible el uso de catalizadores ácidos y básicos. La principal ventaja de una transesterificación heterogénea es que el catalizador se encuentra en estado sólido, lo que simplifica el proceso de purificación del biodiésel (Mathew *et al.*, 2021). En la catálisis básica heterogénea se emplean zeolitas, sílicas, alúminas, hidrocalcitas, óxido de calcio y óxido de magnesio, entre otros. Estos catalizadores poseen alta eficiencia en la conversión de ácidos grasos a biodiésel, dado que se realiza la reacción completa de transesterificación (Mathew *et al.*, 2021). El proceso de transesterificación empleando catálisis heterogénea se presenta en la Figura 3.

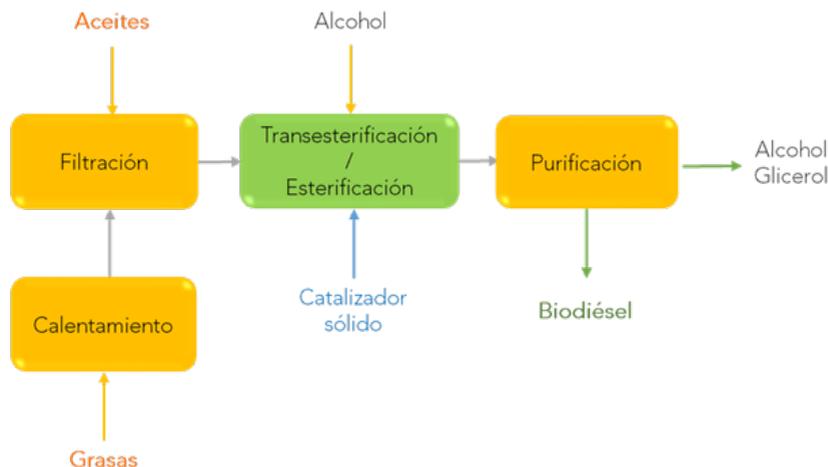


FIGURA 3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL MEDIANTE CATÁLISIS HOMOGÉNEA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### *Catálisis con fluidos supercríticos*

El biodiésel también puede generarse mediante reacciones con fluidos en condiciones supercríticas; este proceso tiene la ventaja de que pueden emplearse ácidos grasos con altos contenidos de agua. La temperatura y la presión se emplean para modificar las propiedades termo-físicas del fluido, y así llevar a cabo la reacción de transesterificación de forma rápida. La conversión es respetuosa con el medio ambiente, la purificación del biodiésel es más fácil y con un requerimiento energético mínimo. El fluido más empleado en condiciones supercríticas es el metanol (Figura 4); sin embargo, también se puede añadir óxido de calcio como catalizador, favoreciendo así una alta eficiencia de reacción (Mathew *et al.*, 2021), o bien se pueden usar algunos cosolventes como el propano.

### *Catálisis enzimática*

La catálisis enzimática es otra alternativa para la producción de biodiésel que emplea enzimas llamadas lipasas, las cuales son las encargadas de la ruptura de los ácidos grasos; esto posibilita un número mínimo de etapas en el proceso de transesterificación con menos energía, como se muestra en la Figura 5 (Vignesh *et al.*, 2020; Mohiddin *et al.*, 2021). Algunas de las lipasas que se comercializan para la transformación de los triglicéridos a biodiésel son Novozyme-435, Lipozyme RM-1M, Lipozyme TL y Lipase PS-C (Mathew *et al.*, 2021). Cabe resaltar que la catálisis enzimática se realiza a temperaturas menores de 50 °C, ya que las lipasas se degradan; asimismo, la relación molar alcohol metílico/aceite debe ser menor del rango de 3:1 a 4:1, debido a que se pierde la eficiencia catalítica (Mathew *et al.*, 2021). El alcohol metílico debe ser añadido lentamente, ya que tiene alta solubilidad en los ácidos grasos, lo que provoca la desactivación de la lipasa (Vignesh *et al.*, 2020).

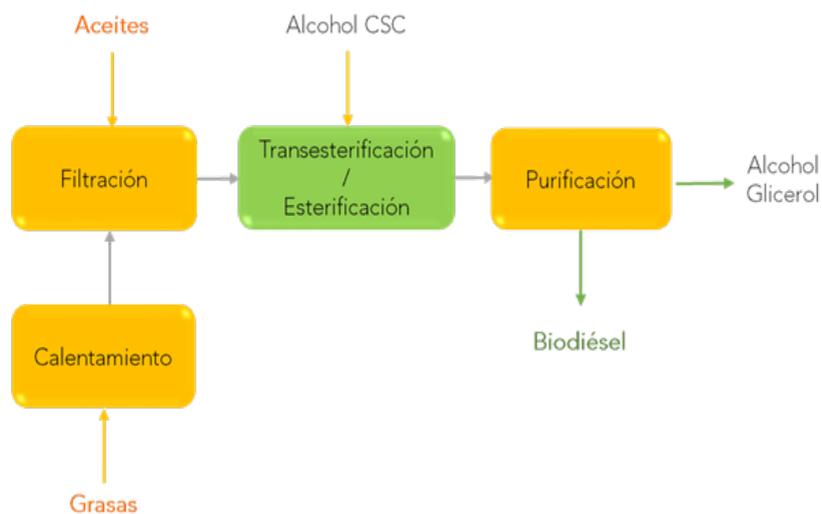


FIGURA 4. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL MEDIANTE CATÁLISIS CON ALCOHOL EN CONDICIONES SUPERCRÍTICAS (CSC).  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

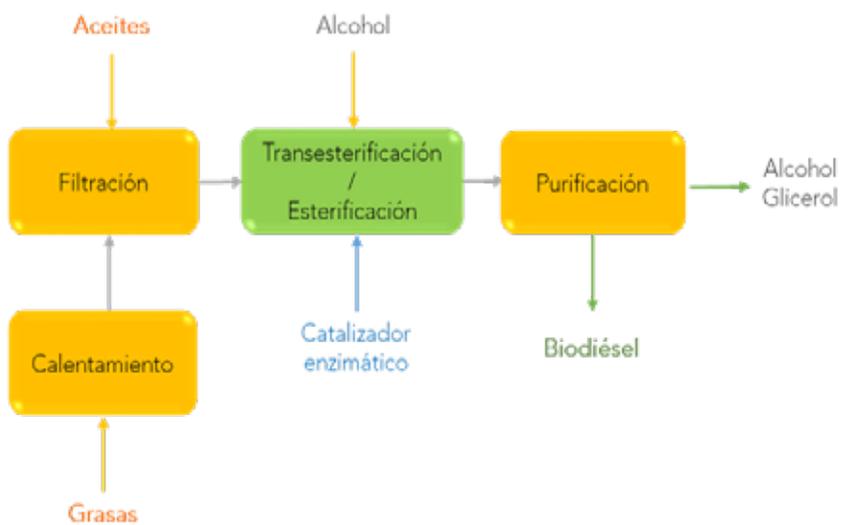


FIGURA 5. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL MEDIANTE CATÁLISIS ENZIMÁTICA.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Todos los procesos anteriormente descritos permiten generar biodiésel a partir de materias primas ricas en triglicéridos, mediante el uso de diferentes catalizadores y condiciones de operación. Sin embargo, un aspecto de gran relevancia es la calidad del biocombustible obtenido, la cual se discutirá en la siguiente sección.

### ¿Cuáles son las propiedades que debe cumplir el biodiésel?

Una vez producido el biodiésel, se debe asegurar que cumpla con los estándares ASTM-D6751 y EN-14214; estos estándares son los que rigen su calidad, mientras que la norma ASTM-D975 es para el diésel fósil (Atabani *et al.*, 2013). En la Tabla 1 se muestra la comparación de algunas propiedades fisicoquímicas del biodiésel, así como las del diésel con sus respectivas normas.

**TABLA 1. PARÁMETROS DE CALIDAD DE BIODIÉSEL Y DIÉSEL FÓSIL RESPECTO A ESTÁNDARES INTERNACIONALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN EL TRABAJO DE ATABANI *ET AL.*, 2013.**

PARÁMETRO	BIODIÉSEL				DIÉSEL	
	ASTM-D6751		EN-14214		ASTM-D975	
	NORMA	LÍMITE	NORMA	LÍMITE	NORMA	LÍMITE
Punto de inflamación (°C)	ASTM-D93	≥ 130	EN-ISO 3679	≥ 101	ASTM-D975	60 a 80
Número de cetano	ASTM-D613	≥ 47	EN-ISO 5165	≥ 51	ASTM-D4737 EN-590	46
Densidad (kg·m <sup>-3</sup> @ 15 °C)	ASTM-D1298	880	EN-ISO 3675/12185	860-900	ASTM-D1298	820 a 860
Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> @ 40 °C)	ASTM-D445	1.9 a 6	EN-ISO 3104	3.5 a 5	ASTM-D445	2 a 4.5
Temperatura de destilación (°C)	ASTM-D1160	360	-	-	ASTM-D86	≤ 370
Lubricidad (m)	ASTM-D6079	≤ 520	-	-	ASTM-IP450	0.00046
Glicerina total (% masa)	ASTM-D6548	≤ 0.2	EN-14105	0.25	-	-
Fósforo (%masa)	ASTM-D4951	≤ 0.001	EN-14107	≤ 0.001	-	-
Carbono (% masa)	ASTM-PS121	77	-	-	ASTM-D975	87

PARÁMETRO	BIODIÉSEL				DIÉSEL	
	ASTM-D6751		EN-14214		ASTM-D975	
	NORMA	LÍMITE	NORMA	LÍMITE	NORMA	LÍMITE
Hidrógeno (%masa)	ASTM-PSI 21	12	-	-	ASTM-D975	13
Oxígeno (%masa)	ASTM-PSI 21	11	-	-	ASTM-D975	0

El biodiésel debe cumplir con las propiedades especificadas en la Tabla 1, independientemente de la materia prima empleada para su producción. El cumplimiento de los estándares asegura que el biocombustible tendrá un adecuado desempeño, sin provocar daños a los motores de combustión interna. También es importante destacar que la disponibilidad de materias primas para la producción de biodiésel varía, por lo que es fundamental evaluar sus rendimientos. De igual manera, las condiciones de operación, así como el tipo de catálisis, deben analizarse para las diferentes materias primas, en aras de obtener los mayores rendimientos con los mínimos costos de producción.

En este contexto, se han estudiado diversas materias primas ricas en triglicéridos, cada una de ellas con diferentes conversiones; destacan el aceite de soya (93-98 %), palma (83-98 %), colza (91-98 %), girasol (81-98 %), naranja (69-99 %), *Jatropha curcas* (82-99 %), algas (96-99 %), aceite usado de cocina (89.6-99.2 %), oliva (93 %), grasas animales (94-99 %), *Camelina sativa* (97-98 %), *Pongamia pinnata* (90-98 %), higuierilla (94-95 %) (Atabani *et al.*, 2013; Ambat *et al.*, 2018; Kirubakaran *et al.*, 2018; Rezanian *et al.*, 2019; Mohiddin *et al.*, 2021). Con base en los estudios antes mencionados, se observa que los rendimientos son elevados a partir de los diferentes tipos de materias primas. Asimismo, es importante enfatizar que el uso de aceites comestibles para la producción de biodiésel afecta la seguridad alimentaria; por otra parte, si bien los aceites no comestibles no afectan de manera directa la seguridad alimentaria, sí lo hacen indirectamente al competir por tierras fértiles para su cultivo. Por ello, algunos autores se han enfocado en el aprovechamiento de aceites residuales, o bien aquellos generados por algunos microorganismos. En particular, un insumo poco estudiado lo constituyen las grasas contenidas en las larvas derivadas del cultivo de la mosca soldado negra, del cual se brindará información en la siguiente sección.

### ***¿Cómo pueden emplearse los residuos orgánicos para producir biodiésel?***

De acuerdo con la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), los residuos orgánicos se definen como cualquier material que proviene de animales o plantas, y que pueden ser degradados por microorganismos, o bien, sobras o desperdicios de cualquier organismo.

Estos residuos pueden, a su vez, separarse; por ejemplo, en residuos alimenticios, de jardín (pasto u hojas), de madera y cartón o papel (CCA, 2017).

Los restos orgánicos pertenecen a una clasificación general conocida como residuos sólidos urbanos, los materiales de desecho doméstico producidos por cada habitante en una ciudad. En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos establece que los residuos sólidos urbanos son responsabilidad de las autoridades municipales de cada estado del país. En promedio, en México el 46.42 % del total de residuos sólidos urbanos generados son alimentarios, de jardinería, huesos, madera y cuero, entre otros. Sin embargo, la cobertura de recolección nacional es de 83.87 %, lo que significa que casi 16 % del total generado en el país no está contabilizado.

Se ha estimado que cada mexicano produce alrededor de 944 g de residuos al día, es decir, el país genera más de 45 millones de toneladas de residuos sólidos al año; esta cifra representa alrededor de 20.9 millones de despojos orgánicos disponibles para su transformación en bioenergía. De acuerdo con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR), elaborado en 2020 por la SEMARNAT, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, así como por el Banco Interamericano de Desarrollo, los estados que generan mayor cantidad de residuos sólidos urbanos son Estado de México con 16 739 ton/día, Ciudad de México con 9 552 ton/día, Veracruz con 7 813 ton/día y Guanajuato con 6 031 ton/día; Nayarit es el estado que menos genera, con sólo 1 146 ton/día. Estos datos representan, en el menor de los casos, 531.97 ton/día de residuos orgánicos generados (Nayarit). La composición de estos residuos varía según su clasificación, pero se sabe que, en general, son abundantes en polisacáridos y lignocelulosa. Debido al alto volumen en el que son generados, así como a su composición, se ha propuesto su uso para obtener energía a partir de ellos, o como materia prima para obtención de biocombustibles como el bioetanol principalmente (Alalwan *et al.*, 2019). Sin embargo, en México, la mayoría de los residuos se concentra en rellenos municipales, o simplemente se abandona, creando un problema de contaminación.

Una alternativa para la bioconversión de los residuos orgánicos es un tratamiento biológico. Específicamente, las larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) (véase Figura 6) son conocidas por su capacidad para alimentarse de estiércol, residuos de cocina y lignocelulósicos, entre otros. Las larvas tienen un alto contenido de proteína y grasa (40 y 30 % respectivamente), la cual puede ser extraída y transesterificada para la producción de biodiésel (Nguyen *et al.*, 2018). La mosca soldado negra es un insecto que habita en regiones tropicales o templadas; los adultos no tienden a acercarse a los humanos, y no se conocen como vectores de enfermedades. El cultivo de este insecto resulta de interés por su eficiencia para bioconvertir residuos orgánicos, su rápida tasa de reproducción y un ciclo de vida corto. Las condiciones óptimas para la crianza de sus larvas son entre 26 y 27 °C de temperatura y 60-70 % de humedad (Kim *et al.*, 2021). Este insecto se cultiva en jaulas de vuelo, en las cuales se reproducen y depositan los huevecillos que generan las larvas. Un aspecto interesante es que este insecto no se alimenta durante su etapa adulta, tiene un sistema digestivo atrofiado; por ello, este insecto agota agua hasta su muerte. No obstante, su introducción en los ecosistemas podría representar un riesgo, por lo que debe ponerse especial cuidado en su manejo.

Respecto a su uso para la obtención de biodiésel, la cantidad y composición de ácidos grasos presentes en los lípidos dependen directamente de la composición del sustrato con el que se alimenten. De manera general, la larva contiene bajos porcentajes de ácidos grasos insaturados y altos porcentajes de ácidos grasos saturados, los cuales son los necesarios para la producción de este biocombustible (Ewald *et al.*, 2020). En la Tabla 2 se mencionan algunos estudios que han reportado la producción de biodiésel a partir del aceite de larvas de mosca soldado alimentadas con diferentes residuos orgánicos, así como los rendimientos de biodiésel obtenidos a partir del aceite.



**FIGURA 6. ADULTO Y LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRA.**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

**TABLA 2. ESTUDIOS REPORTADOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE LARVAS DE MOSCA SOLDADO.**

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

SUSTRATO	% DE LÍPIDOS	CONVERSIÓN (%)	SELECTIVIDAD A BIODIÉSEL (%)	REFERENCIA
Digestato de residuos de pollo y paja	31.17	95.40	29.73	Elsayed <i>et al.</i> , 2020
Salvado de trigo	30.2	94.14	28.43	Nguyen <i>et al.</i> , 2018
Salvado de trigo y lipasas	32.8	92.5	30.34	Nguyen <i>et al.</i> , 2017
Residuos de restaurantes	25.4	92.9	23.6	Zheng <i>et al.</i> , 2012
Estiércol de vaca	29.9	93	27.81	Li <i>et al.</i> , 2011
Estiércol de cerdo	29.1	96	27.94	
Estiércol de pollo	30.1	93	27.99	

De la Tabla 2 se observa que los estudios reportados sobre la producción de biodiésel a partir del aceite contenido en las larvas exhiben buenas conversiones, con selectividades alrededor del 30 % hacia biodiésel. Es importante mencionar que los estudios antes reportados se realizaron en escala laboratorio, por lo que es necesario modificar este proceso a escala industrial. El principal reto de esto se encuentra en el cultivo de los insectos, ya que la extracción de aceite y su procesamiento son operaciones bien conocidas en escala industrial. Un aspecto relevante en la extracción de aceite es el uso de procesos mecánicos o con dióxido de carbono en condiciones supercríticas; lo anterior con el fin de usar el residuo de la extracción para aplicaciones en alimentos de consumo animal.

### ***Potencial de producción de biodiésel a partir de residuos orgánicos en el estado de Querétaro***

Querétaro contribuye con el 2.3 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional; es el estado número 22 en términos de población y el 27 en territorio nacional. Anualmente, la entidad genera 804 899 toneladas de residuos sólidos urbanos, de las cuales aproximadamente 418 547 son orgánicas. Adicionalmente, se generan 1 623 968 toneladas anuales de residuos por cultivos agrícolas, siendo el maíz forrajero, el maíz en grano y la alfalfa los que mayor cantidad de residuos reportan (48 %, 28 % y 12 % respectivamente). A pesar de que Querétaro no posee la mayor extensión geográfica o el mayor número de habitantes, sí contribuye anualmente con más de 2 millones de toneladas de residuos que pueden ser integrados a cadenas de valor en las cuales sea posible prolongar su ciclo de vida.

Una de las alternativas de manejo de residuos, incluyendo los orgánicos, son los rellenos sanitarios (o de disposición final), muchos de los cuales no se encuentran regulados. Bajo este contexto, la biotransformación de los residuos orgánicos mediante el cultivo de mosca soldado es una alternativa interesante que permitiría generar aceites y otros productos de valor agregado. La conversión de todos los residuos orgánicos del estado posibilitaría una producción anual de 1 53 738 toneladas de biodiésel puro. No obstante, dado que el biodiésel se usa en mezclas (siendo la B20 una de las más comunes) podrían generarse 768 688 t de B20 para abastecer el 7.11 % de la demanda nacional de diésel fósil, o bien el 14.22 % de dicha demanda considerando una mezcla B10.

En términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, se generarían 1 844 toneladas anuales por el uso de larva de mosca soldado negro como medida de manejo de residuos orgánicos; este valor representa el 1.2 % del total de emisiones que se generarían por cada tonelada de residuos orgánicos no tratada. Adicionalmente, las emisiones asociadas con la producción de una tonelada de aceite de larva son 83.3 % menores que las asociadas en la producción de una tonelada de aceite o grasa residual de otro tipo. Por otra parte, la producción de 1 53 738 toneladas anuales de biodiésel puro se asociaría a la liberación de 86 400 toneladas de CO<sub>2</sub>. Empero, el uso del aceite de larva como materia prima para la producción de biodiésel permite reducir en 41 % y 78 % las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción de biodiésel a partir de aceite residual de cocina y aceite de soya, respectivamente.

En la Tabla 3 se presentan las emisiones de dióxido de carbono que resultan de la producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas. Puede observarse que el aceite

de larva de mosca soldado presenta el menor valor de emisiones asociadas a su generación. Este punto repercute también en las emisiones totales de la producción de biodiésel, que inclusive son menores a las reportadas para la generación de este biocombustible a partir de residuos.

**TABLA 3. EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO RESULTANTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS.**

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	EMISIONES ASOCIADAS A LA GENERACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (KG CO <sub>2</sub> /T)	EMISIONES TOTALES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL (KG CO <sub>2</sub> /T)
Aceite de cocina residual	72	956
Grasas animales	72	956
Aceite de soya	1031	2654
Aceite de palma	1031	2654
Aceite de larva de mosca soldado	12	562

## CONCLUSIONES

El desarrollo de procesos para la producción de biocombustibles es necesario para contribuir a la recuperación sostenible de los diferentes sectores económicos. El biodiésel es uno de los biocombustibles más estudiado; se han explorado diversas materias primas para su producción, las cuales incluyen aceites y grasas, tanto comestibles como no comestibles y residuales. Una materia prima de reciente introducción para la producción de este combustible orgánico es el aceite contenido en las larvas de mosca soldado, un insecto que se alimenta con residuos orgánicos. Los resultados muestran que, considerando los residuos orgánicos generados en el estado de Querétaro, es posible producir 1 53 738 toneladas de biodiésel puro, derivadas de la revalorización de más de 2 millones de toneladas de residuos; asimismo, es posible reducir hasta en un 78 % las emisiones de dióxido de carbono en comparación con la producción de biodiésel a partir de aceite de soya.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico brindado por el Conacyt, mediante las becas de Valeria Caltzontzin Rabell, Araceli Guadalupe Romero Izquierdo y Carlos Fernández Villascán, así como a la SEP, mediante la beca otorgada a través de PRODEP para Sergio Iván Martínez Guido.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ambat, I., Srivastava, V. & Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 356–369.
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A. & Fayaz, H. (2013). Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 211–245.
- Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*, 35(9), 4661–4670.
- IEA. (2020). International Energy Agency. *Sustainable Recovery Plan*. <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>
- IICA. (2007). Recursos energéticos-biocarburantes: Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. *www.iica.int*.
- IICA. (2010). Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles: Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. *www.iica.int*.
- Kirubakaran, M. & Arul Mozhi Selvan, V. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 390–401.
- Llanes Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J., Salazar Alvear, P. & Medrano Barboza, J. (2017). Producción e impacto del biodiesel: Una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2(7), 59-76.
- 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.
- Mohiddin, M. N. B., Tan, Y. H., Seow, Y. X., Kandedo, 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.
- Rezania, S., Oryani, B., Park, J., Hashemi, B., Yadav, K. K., Kwon, E. E., Hur, J. & Cho, J. (2019). Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. *Energy Conversion and Management*, 201, 112155.
- SEMARNAT (2016). Residuos sólidos urbanos: la otra cara de la basura. *SEMARNAT*, 1-16. Sitio web (Consultado 29/11/2021): [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/39412/RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_URBANOS\\_-\\_ENCARTE.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/39412/RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS_-_ENCARTE.pdf).
- SEMARNAT (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. *SEMARNAT*, 1-274. Sitio web (Consultado 29/11/2021): <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>.
- Torroba, A. (2020). Atlas de biocombustibles líquidos 2019-2020. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*.

- Vignesh, P., Pradeep Kumar, A. R., Shankar Ganesh, N., Jayaseelan, V., Sudhakar, K. (2020). A review of conventional and renewable biodiesel production, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(8).
- Comisión para la Cooperación Ambiental (2017). “Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético”, Montreal, 52 pp.
- Alalwan H. A., Alminshid A. H. & Aljaafari H. A. S. (2019). “Promising evolution of biofuel generations”. *Subject review. Renewable Energy Focus*, 28:127-139.
- Nguyen H. C., Liang S. H., Li S. Y., Su C. H., Chien C. C., Chen Y. J. & Huong D. T. M. (2018). “Direct transesterification of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for biodiesel production”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 1-5.
- Kim C. H., Ryu J., Lee J., Ko K., Lee J. Y., 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.
- Ewald N., Vidakovic A., Langeland M., Kiessling A., Sampels S. & Lalander C. (2020). “Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) –Possibilities and limitations for modification through diet”. *Waste Management* 102, 40–47.
- Elsayed M., Ran Y., Ai P., Azab M., Monsour A., Jin K., Zhang Y. & Abomohra A. E. F. (2020). “Innovative integrated approach of biofuel production from agricultural wastes by anaerobic digestion and black soldier fly larvae”. *Journal of Cleaner Production* 263, 121495.
- 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 (*Hermetia illucens*): Optimization by using response surface methodology”. *Energy Conversion and Management* 145, 335–342.
- 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.
- Li Q., Zheng L., Cai H., Garza E., Yu Z. & Zhou S. (2011). “From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible”. *Fuel* 90, 1545-1548.

