



## **Una revisión bibliográfica: Algunos aspectos a considerar para definir si el biodiésel es una alternativa de energía más limpia y sostenible en países de escaso desarrollo<sup>1</sup>**

### ***A bibliographic review: Some aspects to consider to define if biodiesel is a cleaner and more sustainable energy alternative in poorly developed countries<sup>2</sup>***

**Julio Alberto Solís-Fuentes\*<sup>1</sup>,  
María del Carmen Duran-Domínguez-de-Bazúa<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas,  
Av. Dos Vistas s/n carretera Xalapa-Las Trancas, 91000 Xalapa, Ver., México  
Fax (+52) 22- 8841-8931. Correo-e (e-mail): [jsolis@uv.mx](mailto:jsolis@uv.mx)

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

\*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

#### **Resumen**

En este trabajo se hizo una breve revisión de la producción y consumo energético desde diferentes fuentes de obtención y del estado del arte de una de las opciones energéticas, -el biodiésel-, que junto con otras, han sido identificadas como más limpias y con posibilidad de ser renovables. Todo ello desde considerar las tendencias del estilo de desarrollo global actual del mundo que, en su dimensión territorial, parece haber agudizado las desigualdades regionales y el deterioro ambiental en países de menor desarrollo relativo como México y otros del área latinoamericana. Hay otros países y territorios de escaso desarrollo con enormes disparidades socioeconómicas en sus sectores poblacionales, mayoritariamente de bajos ingresos y consumos de energía/cápita, escasez de capital productivo y financiero. Paradójicamente, son poseedores de ecosistemas con la mayor biodiversidad del planeta y, por tanto, altos niveles de capital natural, como es el caso de la región latinoamericana donde se alberga más de un tercio de la biodiversidad vegetal global del planeta. Puede concluirse que debe seguirse trabajando sobre la minimización de los costos de fabricación del biodiesel considerando materias primas e insumos y tecnologías que no afecten la biodiversidad el capital natural de los ecosistemas donde se producen.

**Palabras clave:** Biodiésel, energías renovables, aceites vegetales, biodiversidad

#### **Abstract**

*In this research a brief review is made concerning energy production and consumption from different sources and the state of the art of one of the energy options - biodiesel - which, along with others, have been identified as cleaner and potentially renewable. All of this from the perspective of the trends in the current global development style of the world, which, in its*

<sup>1</sup> Esta contribución fue presentada como conferencia por el primer autor y publicada en el Libro electrónico de contribuciones selectas 2024 X Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas Atmósfera y Suelos. ISSN 2448-6116. RACAM, Abril-April 01-06, 2024. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

<sup>2</sup> This contribution was presented as a lecture by the first author and published in the Electronic Book of Selected Papers 2024 Tenth International Minisymposium on Removal of Pollutants from Water, Atmosphere, and Soils. ISSN 2448-6116. RACAM, April-April 01-06, 2024. University City, Mexico City, Mexico

---

*territorial dimension, seems to have exacerbated regional inequalities and environmental deterioration in countries with lower relative development such as Mexico and others in Latin America. There are also other countries and territories with little development with enormous socioeconomic disparities in their population sectors, mostly with low incomes and energy consumption/capita, and a shortage of productive and financial capital. Paradoxically, they are the owners of ecosystems with the greatest biodiversity on the planet and, therefore, high levels of natural capital, as is the case of the Latin American region, which is home to more than a third of the planet's global plant biodiversity. It can be concluded that work must continue on minimizing biodiesel manufacturing costs, considering raw materials and inputs and technologies that do not affect the biodiversity and natural capital of the ecosystems where they are produced.*

**Keywords:** *Biodiesel, renewable energies, vegetable oils, biodiversity*

## **Introducción**

Desde siempre, pero en la actualidad de un modo más claro, es evidente que la energía es uno de los factores más importantes para lograr el sostén, desarrollo y bienestar de la humanidad. Los acuerdos mundiales a este respecto, destacan un conjunto de rutas de acción a abordar desde ahora, que posibilite mejores estadios para la convivencia humana y la vida en el planeta intentando la corrección del rumbo del mundo, caracterizado hoy en día por una enorme desigualdad económica y social, entre individuos, grupos sociales y naciones; altos índices de pobreza y marginación de la población y un progresivo y casi generalizado deterioro ambiental. En estos acuerdos para hacer sostenible el futuro del planeta, como es el caso de la Agenda 2030, lograr la disponibilidad de energía suficiente desde fuentes no contaminantes, renovables y limpias para todas las actividades humanas es un objetivo prioritario.

Dado su origen biológico, alta bio-degradabilidad y mínima toxicidad el biodiésel ha venido siendo considerado un combustible alternativo factible (Banković-Ilić et al., 2012).

Como es sabido los combustibles fósiles, no obstante su progresivo cuestionamiento por sus efectos ambientales negativos, son todavía preferentemente utilizados como principal fuente de energía en diversos dispositivos y motores dentro de las variadas actividades industriales, domésticas y de transporte. Los llamados motores diésel son, por lo general, favorecidos objetos de selección, con respecto de los motores encendidos por chispa en aplicaciones de servicio pesado como el transporte y plantas de generación debido a su mayor eficiencia durabilidad y productividad (Tabatabaei et al., 2019). Sin embargo, solamente un ejemplo, los vehículos que circulan largas distancias contribuyen con cerca de las tres cuartas partes de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte. De éstos, los motores diésel son alrededor del 80% de toda la flota de transporte en el mundo (Mamtani et al., 2021). Además, según el Banco Mundial, cerca de 2300 millones de personas en el planeta aún usan combustibles y tecnologías tradicionales contaminantes como la leña para cocinar sus alimentos (Banco Mundial, 2023), combustible con posibilidad de ser sustituido, bajo ciertas condiciones, por otros biocombustibles más limpios.

La búsqueda de combustibles líquidos con características técnicas que substituyan eficazmente en sus principales aplicaciones al petro-diésel ha llevado a considerar a diferentes combustibles de origen biológico -los biocombustibles- como el biodiésel. Sin embargo, su producción y uso ampliado está sujeto a diferentes condiciones ambientales, sociales, económicas, culturales y tecnológicas que posibiliten salvar hoy y en el futuro diversas restricciones para su obtención a diferentes escalas, domésticas, industriales y comerciales a costos que le permitan competitividad, disponibilidad y uso ampliado, con respecto del diésel de petróleo, sin menoscabo de sus atributos y características técnicas requeridas.

Igualmente, algunos impactos negativos asociados todavía con el biodiésel están correlacionados con los modos en que se produce y utiliza, tales como el efecto negativo en la biodiversidad de los ecosistemas durante la producción de oleaginosas proveedoras de aceites vegetales, la materia prima

---

esencial para su elaboración. Esto ocurre, por lo general, en plantaciones a gran escala. Por otro lado, la competencia indeseable desde una perspectiva humanista y no solamente economicista, que representa la utilización de plantas y semillas comestibles como fuente de aceites para la producción del biocombustible ante realidades, en contextos concretos, de escasez u ofertas limitadas de alimentos para consumo humano. Un tercer impacto negativo es el referente al ambiente debido a la generación de gases de efecto invernadero que, a pesar de muchas de sus cualidades, implica todavía la producción y el uso del biodiésel.

En este documento se hace un breve análisis sobre la producción y consumo energético desde diferentes rutas de obtención, dado el carácter limitado de algunas fuentes de energía actualmente predominantes en el mundo y a su carácter determinante para el desarrollo económico de los pueblos. En ese marco se realiza una breve revisión del estado del arte de una de las alternativas energéticas, el biodiésel, que junto con otras ha sido identificada como más limpia y con posibilidad de ser renovable. Todo ello desde el contexto de considerar las tendencias del estilo de desarrollo global actual del mundo que, en su dimensión territorial, parece haber agudizado las desigualdades regionales y el deterioro ambiental en países de menor desarrollo relativo, como México y otros del área latinoamericana. Países y territorios de escaso desarrollo, esto es, con enormes disparidades socioeconómicas en sus poblaciones, mayoritariamente de bajos ingresos y bajos consumos de energía per cápita, así como de escasez de capital productivo y financiero. Paradójicamente, algunos de ellos son poseedores de ecosistemas con la mayor biodiversidad del planeta y, por tanto, con altos niveles de capital natural, como es el caso de la región latinoamericana donde se alberga más de un tercio de la biodiversidad global del planeta (Raven et al., 2020).

### **La energía recurso escaso e indispensable para el desarrollo**

La cuestión energética es un aspecto fundamental para las sociedades humanas desde siempre y para siempre. Es posible que la energía sea algo que acompaña al ser humano en sus posibilidades de supervivencia, seguridad, comodidad y progreso individual y colectivo desde los primeros tiempos del *Homo sapiens* cuando éste se percató que necesitaba protegerse de las inclemencias del tiempo y procurarse una fuente de calor tanto para, por ejemplo, mitigar las bajas temperaturas como para rudimentariamente procesar sus alimentos. El proceso histórico y social ha ido acompañado de un progresivo y acumulativo conocimiento y conciencia de la naturaleza, formas, fuentes, mecanismos de obtención, transferencia, transmisión, riesgos, etc., así como usos de la energía para hacerla asequible, -se piensa idealmente- a todos los seres humanos en sus diferentes contextos.

El progreso y desarrollo social, al igual que el mantenimiento de los procesos naturales, es impensable sin la participación efectiva de la energía como impulsor de los cambios para el sostén de la vida humana en el planeta.

Desde las incipientes preocupaciones por el desarrollo económico y social, principalmente posteriores a la Revolución industrial, los estudiosos y teóricos del Desarrollo, mostraron la relevancia de la energía en los esfuerzos de lograr y aumentar la producción material, tanto de la naturaleza como de los procesos industriales, para dotar de los bienes y servicios requeridos por las sociedades, haciendo evidente, posteriormente, que en el contexto global del mundo las diferencias del desarrollo entre los países y regiones está fuertemente correlacionado con las diferencias en la disponibilidad y uso de la energía. Así, los países altamente industrializados y con los niveles de desarrollo económico relativamente más altos en el contexto mundial, se caracterizan por una disponibilidad amplia y uso intensivo de la energía en todos los ámbitos de la vida de sus poblaciones, mientras que los países con menores niveles de desarrollo se caracterizan por una dotación, disponibilidad y uso de cantidades menores de energía y, por tanto, con mayores restricciones para que sus poblaciones logren formas de vida más igualitarias y mejores.

---

La eliminación de esta importante disparidad que afecta negativamente a enormes contingentes de la población mundial más desfavorecida económicamente es un aspecto abordado a lo largo del último siglo sin lograr hasta ahora cambios importantes, entre otras muchas cosas por el hecho de que, con frecuencia, se deja de lado que el desarrollo y su contraparte el subdesarrollo en los países del mundo, están históricamente relacionados en su esencia, mostrando que el desarrollo de unos ha sido logrado a expensas del subdesarrollo de otros. Por ello, el desarrollo del modelo dominante capitalista en las regiones más atrasadas necesitaría de grandes cantidades de energía actualmente no disponibles en el conjunto del planeta, puesto que los países altamente desarrollados consumen la mayoría de la energía disponible para sostener sus estilos de vida y altos ritmos de crecimiento económico en detrimento, con frecuencia, de una limitada disponibilidad energética en los países y regiones con menor desarrollo. Es conocido, además, el hecho de que en muchos de los casos el alto nivel de desarrollo económico se ha logrado aplicando la lógica del máximo beneficio en el corto plazo. Esto, históricamente, ha llevado a un uso altamente intensivo e irracional de los recursos naturales con el consecuente deterioro ambiental del mundo actual (Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022; Sunkel y Paz, 1980).

La agenda 2030 refiere en su Objetivo 7 que uno de los aspectos de mayor importancia para los individuos, familias y diversas entidades sociales y económicas es asegurar el acceso suficiente a la energía, un factor de primera necesidad e indispensable para el sostén de sus vidas y actividades, con las mínimas repercusiones negativas para el ambiente.

## **Las diferentes fuentes de energía y el balance global Producción-Consumo**

### **La situación mundial**

Según el Balance Mundial de Energía (IEA, 2024; SENER, 2023) la producción mundial de ésta en el año de 2021, llegó a 614 318.52 petajoules (PJ) que incluyó un crecimiento de 3.41% con respecto del año anterior. Esta producción correspondió a las siguientes fuentes primarias de energía: 29.21% al petróleo crudo, el 27.30% a carbón y sus derivados, 23.82% al gas natural, el 4.99% al uranio y el 14.68% provino de fuentes renovables.

Como es sabido, las fuentes de energía primaria son los recursos naturales disponibles en forma directa o indirecta que no sufren ninguna modificación química o física para su uso energético. Éstas son el petróleo y gas natural, el carbón mineral, la hidroelectricidad, la leña y sus subproductos, así como el biogás, y las energías geotérmica, eólica, nuclear y solar, además de las generadas por el bagazo de plantas terrestres especialmente la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y los residuos agropecuarios en general o los urbanos (CEPAL, 2003).

Cifras del año 2021 para la oferta bruta interna de energía mundial y consumo mundial de energía (que para el caso de los países es la oferta total menos la exportación y las operaciones de maquila-intercambio neto y representa la disponibilidad, en el territorio nacional o mundial de la energía que puede ser destinada a los procesos de transformación, distribución y consumo) mostró que China fue el país con mayor oferta bruta interna con 157 034 PJ, lo equivalente al 25.41% de la oferta total mundial y Estados Unidos el 14.49% (considerando que la población estadounidense es cinco veces menor que la de China, este último es el mayor ofertante del mundo). India ofertó el 6.40% y Rusia el 5.65% del total. Esto hace que estos 4 países posean poco más de la mitad de la oferta bruta de energía a nivel mundial (SENER, 2023).

En cuanto al consumo mundial de energía para 2022, el Reporte Mundial consigna que fue de poco más de 604 mil PJ, mostrándose como los mayores consumidores los países más poblados del planeta y los de mayor dinamismo económico: China (26.38%) y Estados Unidos (15.87%) aumentaron su oferta con respecto de su consumo. India con 6.03% y Rusia con 4.78%, tuvieron menos consumo que oferta y aparece Japón con 2.95%. Entre los dos primeros y Japón, países de alta

industrialización, suman poco más del 45% del consumo total mundial. México se sitúa en el 13<sup>o</sup> lugar en el consumo mundial de energía con el 1.44% del total (IEA, 2023; SENER, 2023). Este consumo mundial de energía sectorialmente tuvo en 2021 la siguiente distribución: Industria 34.1%, Transporte 30.2%, Residencial 22.43%, Comercial y Servicio 9.0%, Agropecuario 2.5% (SENER, 2023).

De acuerdo con el último reporte del Instituto de Energía (EI, 2023) el consumo energético promedio por persona en el mundo fue en 2022 de 75.7 GJ/cápita. Este importante indicador mostró una tendencia creciente a lo largo de la última década mismo que desagregado en grandes regiones del mundo, permite vislumbrar la disparidad en los niveles de consumo promedio de energía, por individuo en las poblaciones que habitan las regiones con los países caracterizados como de mayor y de menor desarrollo. Así, mientras en la región de América del Norte (que incluye a México en este dato) el consumo per cápita fue de 235.6 GJ/cápita, en los países de Centro y Sudamérica fue de solamente 56.5 GJ/cápita en promedio. De la misma forma, la población europea tuvo para ese mismo año consumos de 118.0 GJ/cápita, mientras que en la población africana fue de solamente 14.2 GJ/cápita.

La Tabla 1 muestra los valores en algunos países seleccionados para los años 2016-2022 del consumo promedio por individuo, la tasa de crecimiento de este indicador y la población total. Esto permite apreciar los enormes consumos energéticos de los países de mayor desarrollo, como es el caso de Singapur y EEUU. Los de mayor población del mundo, como China, en comparación con otros de menor nivel socioeconómico, como los países de África Central, Latinoamérica e India, entre otros, no llegan a acercarse a estos dos. En México con una población aproximada de 129 millones de personas el consumo promedio de energía se situó en 2022 en 68.4 GJ/persona (EI, 2023).

**Tabla 1.** Consumo per cápita de energía primaria (GJ/habitante) 2016-2022 de países y regiones seleccionadas (elaboración propia con datos de EI, 2023)

País	Año							Tasa (%) 2022	Población	
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022		Total*	%**
	Consumo per cápita, GJ/habitante									
Canadá	396.7	397.8	396.2	388.7	361.8	362.7	367.8	1.4	38.7	81
EEUU	283.0	281.8	290.1	286.2	263.7	277.2	283.5	2.3	341	83
México	66.7	67.3	65.8	64.5	59.0	63.1	68.4	8.5	129	88
Venezuela	98.9	100.2	86.7	76.4	63.8	74.5	78.1	4.8	28.8	-
Argentina	81.8	81.0	79.8	74.6	69.5	76.8	79.2	3.1	45.7	94
Chile	86.4	88.3	90.1	89.6	82.5	88.1	91.2	3.6	19.6	85
Brasil	59.7	59.8	59.5	60.1	57.3	60.0	62.3	3.8	217	88
Colombia	41.2	40.9	40.8	40.4	36.2	40.1	42.3	5.4	52	81
Ecuador	41.0	42.0	43.6	43.8	37.3	42.9	43.7	1.9	18.2	64
Perú	34.6	34.6	35.6	35.8	30.1	33.9	35.4	4.5	34.3	79
Qatar	803.7	744.8	729.3	748.9	662.7	717.9	699.2	-2.6	2.7	-
Singapur	584.1	593.3	588.7	571.2	555.3	551.9	529.5	-4.1	6	-
Noruega	382.3	381.2	372.8	347.0	374.0	379.2	348.9	-8.0	5.5	86
Japón	148.2	150.4	150.1	147.1	136.9	144.0	143.9	0.0	123	94
China	90.6	93.6	97.6	101.8	104.9	110.8	111.8	0.9	1425	65
India	22.3	22.8	23.9	24.2	22.7	24.5	25.7	4.9	1436	36
África Central	5.7	5.4	5.5	5.4	5.1	5.1	4.8	-7.5	184	40

\*En millones de habitantes; \*\*Porcentaje de la población urbana (Worldometer, 2024)

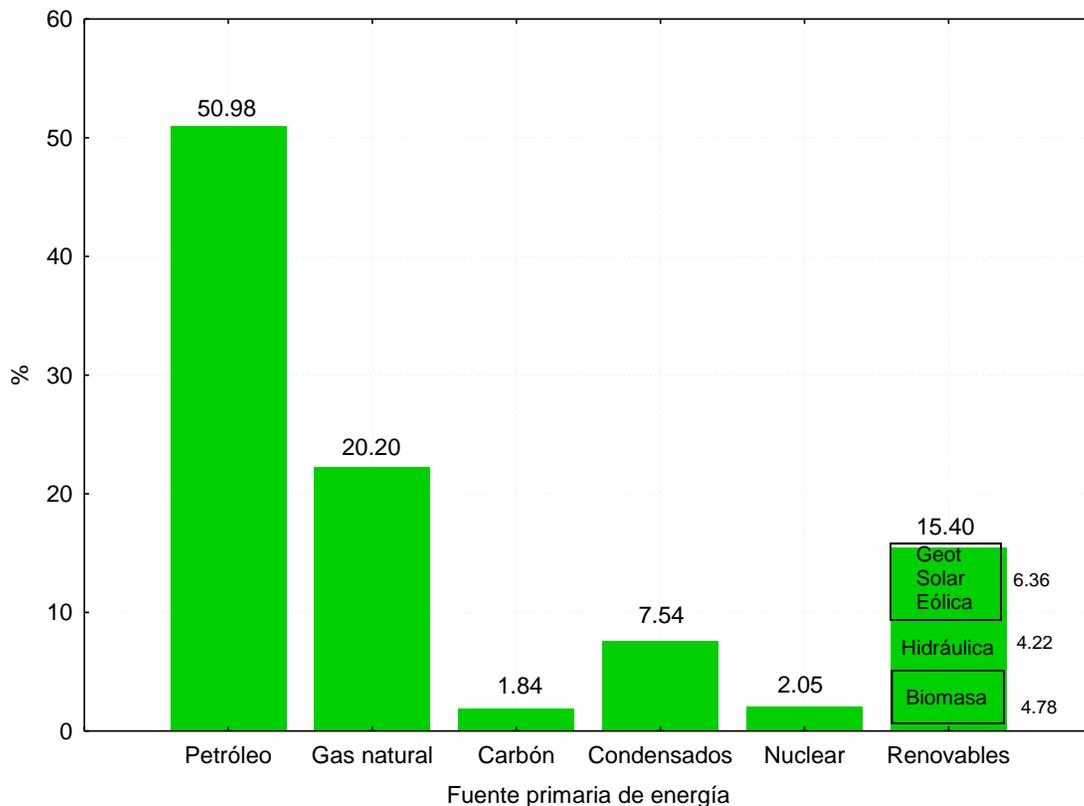
## La situación regional y nacional

Los datos mencionados líneas arriba dan una idea global del tamaño de las necesidades energéticas del mundo y de la dimensión de la tarea para disminuir las disparidades en disponibilidad de energía. También demuestran que los factores que afectan la salud ambiental y la sostenibilidad del planeta son debidos a la producción de energía desde aquellas fuentes plenamente identificadas como altamente contaminantes, mismas que además es sabido tienen un carácter no renovable.

A nivel intra-nacional, como ha sido ampliamente reconocido, las desigualdades regionales en el desarrollo de los territorios se correlacionan con las situaciones asimétricas entre medios rurales y urbanos con respecto de las diferencias en disponibilidad de ciertos factores relevantes para el desarrollo como el capital y la energía.

Algunos de los datos e indicadores mencionados líneas arriba, obviamente no reflejan las diferencias en las ofertas y consumos de energía en espacios nacionales, intrarregionales y/o subnacionales.

Para el caso de México se considera importante mencionar que, acorde con los datos de la SENER, la producción de energía primaria en 2022, fue de 7469 PJ y provino principalmente del petróleo crudo y del gas natural y, en menor medida de las fuentes renovables, los condensados petrolíferos y la energía nuclear. La Figura 1 muestra las aportaciones porcentuales de cada una de estas fuentes primarias de energía en México, para el año 2022. El consumo final energético en el país para ese año fue de 5622 PJ y se dirigió en mayor cantidad al sector Transporte (47.50%), seguido del Industrial (26.27%) y Residencial, comercial y público (17.61%). El sector Agropecuario consumió el 3.35% y otros destinos no clasificados están con 5.26% del consumo final energético en México (SENER, 2023). Es interesante destacar, al ser el biodiésel un sustituto factible del diésel de petróleo, que este último representó el 27.31% del consumo del transporte, el 69.16% de los energéticos utilizados en las actividades del sector agropecuario y el 4.21% en el sector industrial de México en ese año (SENER, 2023). La Figura 1 indica la evolución de la cantidad de energía generada por las fuentes renovables en PJ, mismas que observaron importantes crecimientos en los últimos años debido fundamentalmente a mayores producciones de energía hidráulica, eólica y solar (un 10.28%, al pasar de 1042.97 PJ en 2021 a 1150.13 PJ en 2022; SENER, 2023).

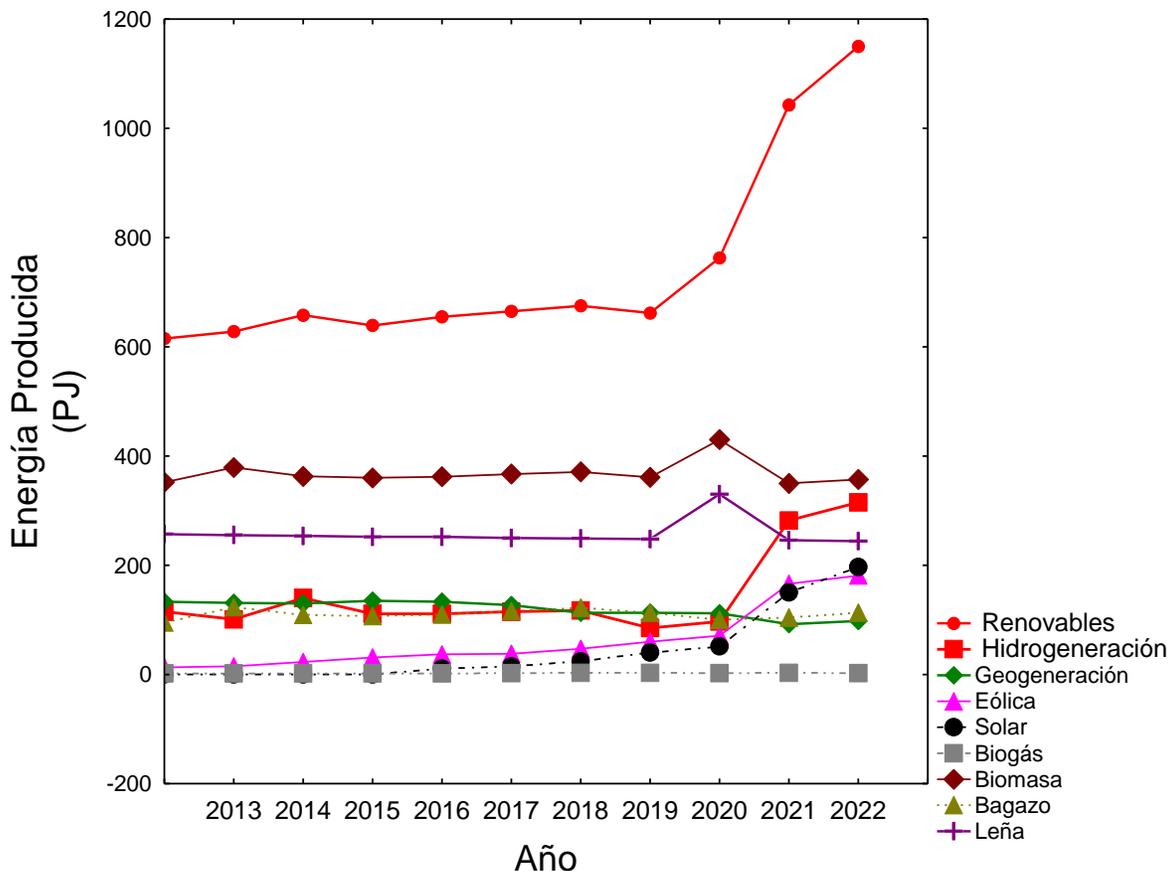


**Figura 1.** Estructura de la producción de energía primaria en México, año 2022 (elaborada con datos de SENER, 2023)

## Producción y consumo de energía renovable en México

Las fuentes renovables de energía en su conjunto son la principal opción para enfrentar la amenaza de agotamiento o aumento de precios de las fuentes energéticas predominantes como las basadas en los combustibles fósiles y para disminuir significativamente en el futuro las huellas de carbono que generan las producciones y consumos energéticos (Highina et al., 2014). Estas energías renovables y más limpias, son principalmente las derivadas del sol, viento, recursos hídricos y biomasa. Estas fuentes representaron en el año 2022 en México, el 15.40% de la producción de energía primaria en México y la proveniente de la biomasa alcanzaron 4.78%. A pesar de que una importante porción del territorio mexicano se caracteriza por sus altas producciones de biomasa presentando una alta biodiversidad vegetal, la obtención de energía a partir de este importante recurso se mantuvo, a lo largo de la última década, alrededor de los 400 PJ.

La Figura 2 presenta las diferentes tendencias de crecimiento y contribución de los diferentes tipos de energía renovable: Hidroenergía, geoenergía, eólica, solar, biogás, biomasa, bagazo y leña en México durante la última década.



**Figura 2.** Evolución de la producción de energía renovable por tipos en México 2012-2022 (elaborada con datos de SENER, 2023)

El biodiésel es un combustible derivado de la biomasa y, al igual que en el caso del etanol, biogás, bagazo de caña y leña, la obtención de energía se logra mediante su combustión, lo que implica que durante ese proceso se generen diversos productos de reacción, sustancias que impactan en diversos

órdenes el ambiente (gases de efecto invernadero, óxidos de nitrógeno, azufre, etc.). Sin embargo, el biodiésel y el etanol se clasifican como fuentes de energía más limpia, al compararlas con derivadas de combustibles fósiles e incluso con el bagazo de caña y otros esquilmos agrícolas y la leña.

En México, no obstante su diversidad vegetal y su potencialidad agrícola, la escasa información disponible da cuenta de que la producción de biodiésel es notoriamente limitada, si se toma en consideración que en 2019 su producción en el mundo fue de alrededor de 50 millones de m<sup>3</sup>, siendo los principales productores Indonesia, EE.UU. y Brasil, con el 16, 13 y 11% del total, respectivamente (Torroba, 2020). De acuerdo con Riegelhaupt et al. (2016) la capacidad instalada en el país para la elaboración de este biocombustible era hasta 2016 de solamente 41182 m<sup>3</sup>/año en 9 instalaciones localizadas en varios estados de la República, de las cuales 3, las más grandes, permanecían sin operar y las 6 restantes procesaron aceite usado, grasas animales y aceite de higuera. La Tabla 2 muestra algunos detalles de estas plantas procesadoras de producción de biodiésel en México.

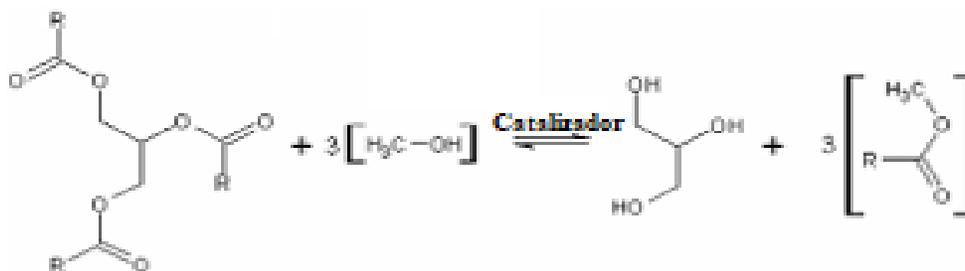
**Tabla 2.** Localización, capacidad instalada, materia prima y situación de las plantas de biodiésel, en México hasta 2016 (Riegelhaupt et al., 2016)

Localización*	Plantas**	Capacidad***	Materia prima****	Situación, 2016
Nuevo León	1	18000	--	Sin operar
Chiapas	1	10000	--	Sin operar
Michoacán	1	9000	--	Sin operar
Puebla	2	1040	Aceite usado, grasa animal	Operando
Baja California	1	74	Higuera	Operando
Oaxaca	1	1000	Higuera	Operando
Durango	1	1440	Grasa animal	Operando
Estado de México	1	628	Grasa animal	Operando
Total	9	41182		

\*Entidad federativa; \*\*Número de plantas; \*\*Capacidad en m<sup>3</sup>/año; \*\*\*\*Fuente de lípidos

### El biodiésel, su proceso de obtención y viabilidad técnica y económica actual y futura

Una de las alternativas mencionadas para el uso ampliado de energías más limpias y amigables con el ambiente en el corto plazo es evidentemente el biodiésel. Su proceso de obtención ha sido sujeto de amplia investigación y desarrollo, teniéndose en la actualidad opciones diferentes desde el punto de vista de las etapas tecnológicas que requiere para lograr las especificaciones normativas establecidas para su uso energético eficiente y ambientalmente más limpio. Este proceso se puede lograr mediante diferentes métodos: No-catalíticos (proceso BIOX, fluido supercrítico) o los mayormente empleados, catalíticos, mediante transesterificación homogénea o heterogénea (Marwaha et al., 2018). En este último caso, cuando se emplea alcohol metílico, se lleva a cabo la reacción de síntesis de ésteres metílicos de los ácidos grasos (Figura 3) constituyentes del aceite o grasa utilizada.



**Figura 3.** Reacción catalítica de transesterificación

El procedimiento típico considera una relación molar de, por lo menos, 6:1 (metanol/aceite vegetal), con un catalizador (básico, ácido o enzimático), agitación constante y temperaturas entre 45 y 50°C

por tiempos de alrededor de 1 h, generándose dos fases separables por gravedad, una rica en glicerina y la otra en ésteres metílicos constituyentes del biodiésel (Mamtani et al., 2021)

La Tabla 3 presenta algunas de las diferentes alternativas de tipos de materias primas, catalizadores, reactores, procesos de separación y purificación del biodiésel. Las variantes tecnológicas para la producción de este combustible dependen de la combinación de esas diferentes opciones utilizadas en cada una de las etapas de elaboración y han sido reportadas por diferentes autores (Atabani y César, 2014; Bazargan et al., 2015; Mamtani et al., 2021; Tabatabaei et al., 2019).

**Tabla 3.** Alternativas de tipos de materias primas, catalizadores, reactores y procesos de purificación del biodiésel

Fuentes de GyA <sup>a</sup>	Pretratamiento <sup>b</sup>	Alcohol <sup>c</sup>	Catalizadores <sup>d</sup>	Reactores <sup>e</sup>	Purificación
-Plantas: Comestibles	-Transesterificación ácida de AGL	Metanol	Homogéneos	Intermitentes	-Lavado con agua
No- comestibles Silvestres	-Transesterificación con <i>DES</i> de AGL	Etanol	--Ácidos	Continuos	-Lavado seco
-Residuos		Alcoholes de 1-8	--Básicos	-empacados	-Extracción con
-Ganado		átomos de carbono	Heterogéneos	-de membrana	-Enzima
-Aves			--Ácidos	-Enzima	membranas
-Peces			--Básicos Enzimas	inmovilizada	-Uso de <i>DES</i>
-Algas			Uso de <i>DES</i>	-Multifuncional*	
-Microorgs.					

a) GyA: Grasas y aceites, extraídos por diversos métodos: Prensado, disolventes orgánicos, fluido supercrítico

b) En sustratos con altos contenidos de ácidos grasos libres, AGL (>3%) y *DES*: Siglas en inglés para disolventes eutécticos profundos, *deep eutectic solvents* (Shahbaz et al., 2011a,b)

c) Alcoholes alifáticos de 1 a 8 átomos de carbono

d) Homogéneos: Ácidos, incluyen ácidos sulfúrico, clorhídrico y fosfórico; básicos, hidróxidos y alcóxidos de metales alcalinos así como carbonatos de sodio y potasio. Heterogéneos: Ácidos, zirconia sulfatada, catalizadores heteropoliaácidos (HPA) (polianiones de boro, silicio o germanio); básicos, cáscara de huevo, calcita, caliza, huesos, dolomita, hidroxiapatita (Aransiola et al., 2014). Enzimas: Lipasas extracelulares e intracelulares, solubles o inmovilizadas, células completas

e) \*Tanque agitado intermitente, tanque agitado continuo, flujo pistón, fluidificado, de destilación reactiva (Kiss, 2010; Tabatabaei et al., 2019)

Sin embargo, hasta ahora la producción y utilización del biodiésel es todavía limitada. Está importantemente acotada por diversos factores que dependen de las condiciones que inciden sobre el mercado, oferta y demanda, así como las variables que los determinan. Ejemplos de ellas son disponibilidad de materias primas, insumos y tecnologías, preferencias y condiciones técnicas para su uso en motores, accesibilidad, confiabilidad y precios. Las políticas públicas que inciden en el fomento de su producción, con base en sus ventajas ambientales y características favorables para fortalecer el desarrollo regional sostenible, son sus posibles impactos en el autotransporte y la mecanización agrícola. En todo ello destaca el efecto de la estructura de costos de la cadena de valor de la producción de biodiésel, que posibilite precios a niveles competitivos con respecto de los fluctuantes precios de los combustibles derivados del petróleo, ya que en ocasiones hacen que el costo de producción de este biocombustible esté por encima del precio final del diésel derivado del petróleo.

Desde un punto de vista meramente económico, la estructura de costos del biocombustible está determinada por los costos que adquiere cada uno de los eslabones de la cadena productiva del biodiésel en un contexto concreto: Cultivo (o recolección) de la materia prima y/o extracción del aceite, refinado o acondicionamiento del material graso, etapas de procesamiento (transesterificación, separación de fases, purificación del biodiésel), almacenamiento y transporte, etc. Hay aspectos superables por la vía de mejorar los rendimientos mediante las tecnologías empleadas, reduciendo los costos de inversión de capital y, primordialmente, reduciendo los costos de la materia prima principal. Sin embargo, un aspecto todavía no analizado completa y profundamente es el que se refiere a determinar si en ese contexto concreto el balance energético global de la cadena es positivo para el

---

biodiésel, lo cual está relacionado con la sostenibilidad de su producción. Esto es, si la energía que produce una unidad de masa de biocombustible es mayor que la requerida para su elaboración, considerando toda la cadena productiva, desde el cultivo y obtención de la materia prima hasta, -en el transcurso de todas las etapas-, su uso (Barón et al., 2013). Hay, además, otros costos ambientales importantes, como lo son no únicamente las huellas de carbono e hídricas implicadas en todas las etapas del ciclo de vida del biodiésel, sino también, algo escasamente señalado, ligado a los costos económicos y ambientales y de gran importancia: El efecto negativo de mediano y largo plazos sobre el capital natural que está representado por la biodiversidad natural local (Dasgupta, 2021). La afectación se da, entre otras, por los cambios de uso de la tierra para destinar grandes extensiones para el cultivo intensivo de especies oleaginosas de alto rendimiento en detrimento de especies vegetales nativas en los ecosistemas donde se producen las materias primas para la obtención de aceites vegetales en la producción del biocombustible. Un ejemplo es la desaparición de la Selva Atlántica en el Paraguay entre 1920-1980 por la siembra de la soya (*Glycine max*) (Placci y Di Bitetti, 2005).

### **Factores relevantes en la investigación y desarrollo de biodiésel hacia el logro de bajos costos y minimización de impactos ambientales**

Los costos de producción de biodiésel, mencionados por muchos de los estudiosos de estos aspectos, son coincidentes en términos de que el costo del aceite vegetal es el mayor contribuyente en la estructura de costos total en la elaboración del biocombustible (Gebremariam y Marchetti, 2018; Pasha et al., 2021). Gebremariam y Marchetti,(2018), por ejemplo, reportan que la materia prima principal representa hasta un 77% del costo total de operación, con un 9% en otros materiales, insumos y servicios y el resto (14%) representado por la mano de obra, mantenimiento, depreciación, etc. Obviamente, tales porcentajes en otros casos, dependerán de la escala de producción, ruta tecnológica de elaboración y otras condicionantes socioeconómicas particulares.

Los cultivos vegetales mayormente utilizados, como fuente de aceites para la elaboración de biodiésel en el mundo se apoyan actualmente en grandes plantaciones de *Elaeis guineensis* (Palma aceitera 29%), *Glycine max* (Soya 25%) y *Brassica napus* (Colza 17%), cultivos agrícolas de amplio uso en otras aplicaciones industriales, entre ellas la alimentaria (Torroba, 2020). Es importante señalar que la creciente demanda por estas semillas oleaginosas en diversas regiones del mundo ha llevado a que grandes extensiones de suelo agrícola se destine a su cultivo en grandes plantaciones favoreciendo el monocultivo en detrimento de la biodiversidad natural local y las consecuencias propias de la economía de plantación consolidando estructuras socioeconómicas subdesarrolladas, importantes conflictos sociales y diversos efectos ambientales (Girvan, 2008; Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022).

En una muy completa revisión sobre el biodiésel, Tabatabaei et al. (2019) apuntan que hoy en día los cultivos de palma y de soya se ubican principalmente en zonas con grandes afectaciones a la biodiversidad de los ecosistemas naturales de algunos de los bosques tropicales. Las huellas de carbono reportadas de los aceites mayormente utilizados en la elaboración de biodiésel, cuyo destino comparten con la elaboración de productos alimenticios, palma, colza y soya están entre los valores de 51.5 y 58.9 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ y su capacidad de mitigación, relativo al petro-diesel se sitúa entre 29.7 y 45.4%.

Este modelo productivo basado en el biodiésel de primera generación para producciones a gran escala no ha resuelto el problema de la competitividad de éste con respecto del diésel de petróleo, el conflicto entre combustible/alimento, los negativos efectos ambientales, antes apuntados y aún menos su disponibilidad y uso ampliado como las circunstancias actuales y futuras requieren. Menos aún en las regiones de escaso desarrollo socioeconómico, para las que se necesitan cambios sustanciales en la

escasa disponibilidad energética actual, el cuidado de su capital natural hoy y en el futuro, para la debida explotación sostenible de los recursos naturales y el desarrollo.

Son muchos los aspectos a considerar para lograr un cambio de paradigma en el desarrollo de las zonas económicamente más desfavorecidas que considere al biodiésel como una opción energética de alta disponibilidad, amigable ambientalmente y sostenible en el futuro. Sin embargo, los datos asequibles en la literatura científica sobre los diferentes temas relacionados con este biocombustible permiten destacar tres elementos de impacto:

- 1) La preferencia de materias primas relativas a especies vegetales nativas y/o residuos (agroindustriales vegetales, pecuarios y marinos), no comestibles,
- 2) La utilización de otros materiales requeridos para la elaboración, abundantes y amigables ambientalmente como catalizadores heterogéneos (con base en CaO, de yacimientos y residuos orgánicos) y el uso del etanol en preferencia al metanol (y no necesariamente absoluto sino hidratado, antes de su punto azeotrópico, en Kiss, 2010) y
- 3) La integración, en diferentes etapas del proceso de elaboración, de los disolventes eutécticos profundos (*DES* en inglés) no contaminantes en sustitución de los tradicionales disolventes orgánicos (Janssen, 2019).

La Tabla 4 contiene algunos ejemplos de especies vegetales autóctonas de Latinoamérica y México y de otras regiones.

**Tabla 4.** Ejemplo de plantas y residuos no comestibles cuyos aceites han sido investigados para la elaboración de biodiésel

Nombre común	Nombre científico	Origen	% aceite*	Referencia
Autóctonas de México y Latinoamérica				
Algodón	<i>Gossypium sp</i>	México	17-25	Banković-Ilić et al., 2012
Árbol de ayoyote	<i>Thevatia peruviana</i>	México	60-65	Deka y Basumatary, 2011
Babasú	<i>Attalea speciosa</i>	Brasil	49	Moreira et al., 2020
Bardana común	<i>Xanthium strumarium L.**</i>	México	35-42	Cesur et al., 2018
Chicalote amarillo	<i>Argemona Mexicana</i>	México	22-36	Nayak y Vyas, 2022
Guanábana	<i>Annona muricata</i>	México	17-37	Su et al., 2018
Hule	<i>Hevea brasiliensis</i>	Brasil	35-50	Onoji et al., 2016
Ilama	<i>Annona diversifolia</i>	América Central	21	Meira et al., 2015
Jojoba	<i>Simmondsia chinensis</i>	México	44-59	Tabatabaei et al., 2019
Mamey	<i>Pouteria sapota</i>	Mesoamérica	40-66	Tacias-Pascacio et al., 2021
Piñón manso	<i>Jatropha curcas</i>	Mesoamérica	27-40	Kamel et al., 2018
Tabaco	<i>Nicotiana tabaccum</i>	Sudamérica	17-25	Banković-Ilić et al., 2012
Originarias de otros continentes				
Árbol de aceite	<i>Pongamia pinnata</i>	Sur de Asia	20-42	Gandhe et al., 2022
Árbol del paraíso	<i>Melia azedarach</i>	Sureste asiático	52	Awais et al., 2020
Árbol de tamano	<i>Calophyllum inophyllum L.</i>	África y Sudasia	40-73	Atabani y Cesar, 2014
Cardo mariano	<i>Silybum marianum</i>	Europa y Asia	46	Takase et al., 2014
Higuerilla	<i>Ricinus communis L.</i>	África	39-59	Awais et al., 2020
Karanja	<i>P. pinnata</i>	Sur de Asia	35	Meira et al., 2015
Lino	<i>Linum usitatissimum</i>	África del norte	38-44	Tabatabaei et al., 2019
Mlalai, Muhande	<i>Croton megalocarpus</i>	África subsahariana	30-45	Meira et al., 2015
Sea mango	<i>Cerbera odollam</i>	Sur de Asia	43-64	Khairil et al., 2018
Tamarindo	<i>Tamarindus indica L.</i>	África subsahariana	16-20	Kumbhar et al., 2020

\*Porcentaje de aceite extraído de la semilla, \*\*Algunos autores insisten es que es originaria de Europa y Asia

Estas presentan rendimientos de extracción importantes de aceites vegetales y que han sido estudiadas en su pertinencia para la elaboración de biodiésel. Tales especies por diferentes razones,

no son aptas para consumo alimentario humano y pueden encontrarse en ecosistemas naturales o cultivadas posiblemente con menores impactos sobre la biodiversidad natural local para niveles de producción medianos y pequeños de biodiésel. Las huellas de carbono y la capacidad de mitigación de los gases de efecto invernadero reportados, para cuando se emplean los aceites de, por ejemplo, *Ricinus communis* L., *Jatropha curcas* L. y *Hevea brasiliensis* son de 22.14, 23.5 y 15 g CO<sub>2</sub>/MJ y de 75.9, 61.6 y 70.8%, respectivamente, evidentemente más favorables desde el punto de vista ambiental que los reportados para cuando se utilizan los aceites de palma, colza y soya (Tabatabaei et al., 2019).

Por el lado de los catalizadores, la Tabla 5 muestra ejemplos de fuentes de catalizadores con base en CaO desde diferentes residuos y fuentes naturales que, por su naturaleza, abundancia y casi ubicuidad, pueden ser tanto económica como ambientalmente favorables y que han sido reportadas como eficaces para realizar la etapa de transesterificación en la elaboración del biodiésel.

**Tabla 5.** Fuentes reportadas de catalizadores en base a CaO provenientes de diferentes residuos (Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022)

Residuo	Catalizador base	Condiciones	Referencia
Cáscara de semilla de palma	Óxidos de Ca, Si, Al y Fe	Gasificación a 750°C y calcinación	Bazargan et al., 2015
Caparazón de cangrejo y jaiba	CaO	Activación a 700°C	Boey et al., 2009
Escamas de pescado	Hidroxiapatita	Calcinación a 997°C	Chakraborty et al., 2011
Lodos de pulpeo de celulosa	CaO	Calcinación a 800°C	Li et al., 2014
Cenizas de gasificación de biomasa	CaO	Gasificación de biomasa entre 400 y 800°C	Luquea et al., 2012
Concha de ostión	CaO	Combustión a más de 700°C	Nakatani et al., 2009
Cal viva	CaO	Calcinación a 900°C de piedra caliza	Santamaría-Hernández et al., 2019
Cascarón de huevo	CaO	Calcinación a 1000°C	Wei et al., 2009
Exoesqueleto de camarón	Glúcidos derivados de quitina	Combustión incompleta, impregnación con KF y activación	Yang et al., 2009

### Los disolventes tipo *DES* en la producción de biodiésel

Un aspecto de gran importancia en el procesamiento para la elaboración de biodiésel lo constituye el conocimiento generado sobre la aplicación de los disolventes eutécticos profundos (*DES*, por sus siglas en inglés, *deep eutectic solvents*) de bajo costo propuestos por primera vez por Abbott a principios de este siglo (Abbott et al., 2003) y que han sido investigados y desarrollados desde entonces para ser sustitutos con amplias ventajas, sobre todo desde la perspectiva ambiental, de los disolventes orgánicos tradicionales en diferentes ámbitos como la extracción, valorización de biomasa, biotecnología y bioingeniería, entre otros campos (Amesho et al., 2023).

Estos compuestos destacan por poseer interesantes propiedades físicas y químicas: Baja presión de vapor y volatilidad, estabilidad térmica, gran capacidad para interaccionar y disolver diversos solutos,

así como participar como catalizadores y co-solventes en reacciones y mezclas a temperaturas moderadas, una aparente baja toxicidad y posibilidad de ser reciclados (Janssen, 2019). Estos compuestos son la asociación, mediante enlaces no covalentes, principalmente puentes de hidrógeno de al menos dos componentes, a una proporción molar determinada, formando mezclas eutécticas (con disminución del punto de fusión) líquidas estables en un amplio intervalo de temperatura cercanas a la temperatura ambiente (Figura 4). La mezcla formada suele estar constituida por un catión poliatómico (de fósforo, nitrógeno o azufre) y un anión, generalmente un haluro de un ácido de Lewis o una amida o un alcohol. Una de las sustancias actúa como un aceptor y la otra como un donador de enlaces de hidrógeno (*HBA* y *HBD*, por sus siglas en inglés) (Mamtani et al., 2021; Ruesgas-Ramón et al., 2023).

Los enlaces de hidrógeno se forman cuando un átomo "donador" enlaza el átomo de hidrógeno unido covalentemente a él (-OH, >NH) a un átomo electronegativo "aceptor" (O=, N=, O<) de otra molécula.

La Tabla 6 presenta algunos de los compuestos, *HBA* y *HBD*, utilizados para elaborar *DES* y la Figura 4 muestra un diagrama de equilibrio sólido-líquido con la representación de las curvas de comportamiento simple ideal y cuando la conducta de la mezcla corresponde a un eutéctico profundo haciendo evidentes los intervalos de temperatura donde se mantiene líquida la mezcla muy por debajo de los puntos de fusión de los constituyentes puros y que es aprovechable para usarse como disolvente.

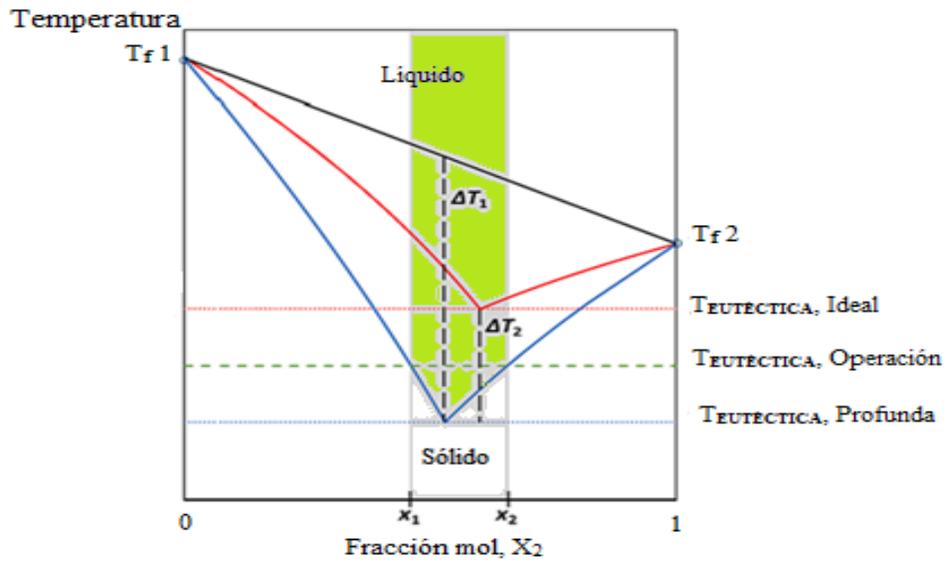
**Tabla 6.** Algunos constituyente de *DES* donadores y aceptores de enlaces de hidrógeno (Mamtani et al., 2021)

<b>Donadores de enlaces de hidrógeno</b>	<b>Aceptores de enlaces de hidrógeno</b>
Ácido oxálico	Cloruro de tetra butil amonio
Benzamida	Cloruro de colina
Glicerol	Cloruro de treta etil amonio
Glucosa	Bromuro de metil trifenil fosfonio
Urea	Cloruro de bencil trimetil amonio

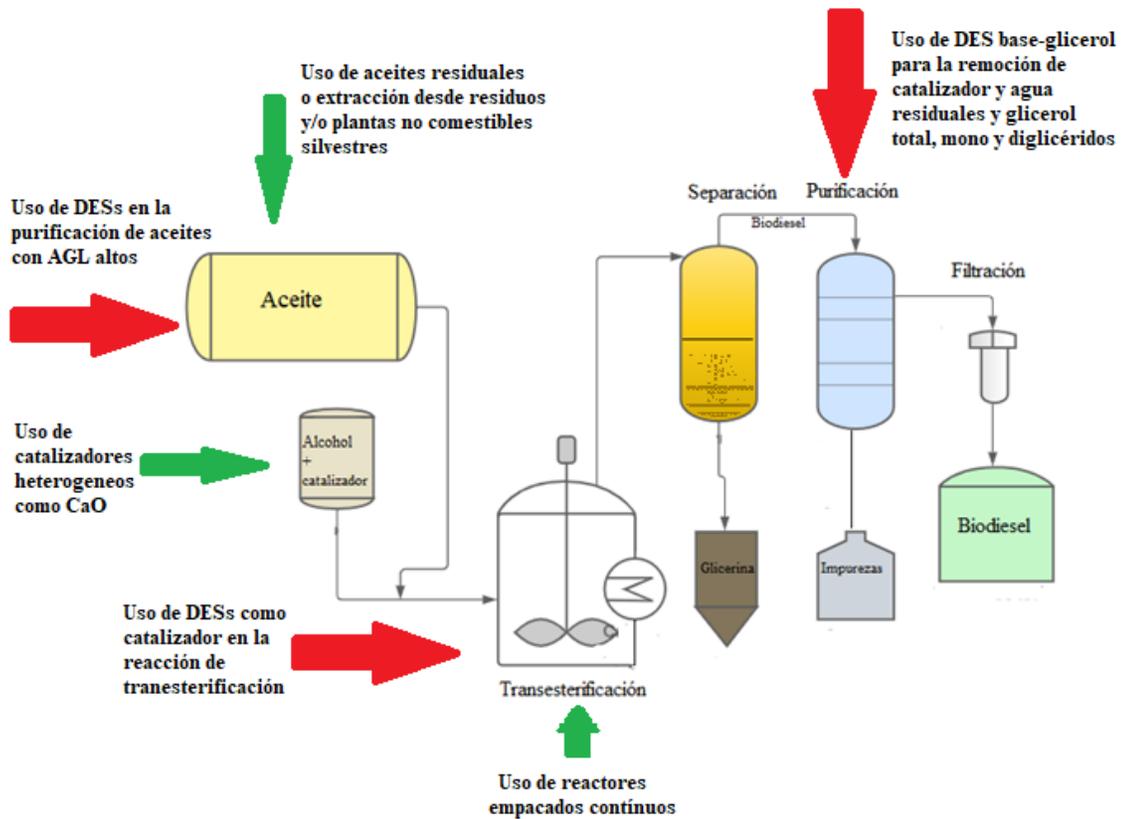
La Figura 5 muestra los principales tratamientos requeridos para la elaboración de biodiésel en un proceso típico donde se señalan opciones de tratamientos que podrían incidir en una mejor economía y limpieza ambiental del proceso debido a la utilización de materias primas no comestibles, como las descritas anteriormente, el uso de catalizadores de bajo costo provenientes de residuos agroindustriales y la utilización de disolventes eutécticos profundos como catalizador, promotor de solvatación o co-disolvente en las etapas de pretratamiento y/o transesterificación directa de AGL del aceite crudo (Hayyan et al., 2014; Mamtani et al., 2021; Troter et al., 2016) así como para la remoción de glicerol, agua y catalizador, residuales (Shahbaz et al., 2011a,b; Troter et al., 2016) del biodiésel durante su purificación.

## Conclusiones

Al ser un biocombustible líquido y poseer características técnicas especiales y además un amigable efecto sobre el ambiente, el biodiésel podrá ser considerado tal vez el más importante sustituto del diésel derivado del petróleo que, actualmente, domina el mercado mundial de energéticos dirigido a los principales medios de transportación terrestre y marítima y usado también en otras maquinarias pesadas empleadas en diferentes campos productivos.



**Figura 4.** Representación de un diagrama eutéctico simple ideal y uno profundo (*DES*) (Adaptado de Contreras-Gómez et al., 2023)



**Figura 5.** Esquema de proceso básico para la elaboración de biodiésel mostrando posible incidencia de alternativas de impacto favorable en el costo económico y ambiental (Adaptado de Günay et al., 2019)

Sin embargo, mucho está por hacerse en el sentido de lograr minimizar los costos actuales del biodiésel orientando la mirada y las acciones hacia materias primas e insumos y tecnologías cuya producción y uso no afecten la biodiversidad y el capital natural de los ecosistemas donde se producen.

Esta es una cuestión de la mayor importancia en los espacios y territorios que históricamente han sido y son económica y socialmente subdesarrollados puesto que, paradójicamente, son algunos de estos ámbitos los que todavía poseen la mayor riqueza y variedad vegetal del mundo.

## Abreviaturas

Siglas	Significado
AGL	Ácidos grasos libres
BIOX	Nombre del proceso patentado para biodiésel con uso de co-solventes
CaO	Óxido de calcio
DES	Siglas en inglés de disolvente eutéctico profundo, <i>deep eutectic solvent</i>
GJ	Gigajoules
GyA	Grasas y aceites
HBA	Siglas en inglés de aceptor de enlaces de hidrógeno, <i>hydrogen bond acceptor</i>
HBD	Siglas en inglés de donador de enlaces de hidrógeno, <i>hydrogen bond donor</i>
KF	Fluoruro de potasio
PJ	Petajoules

## Reconocimientos

El autor y la autora reconocen al Comité Organizador del 10<sup>o</sup> Minisimposio Internacional por la aceptación para que la contribución presentada como conferencia con su texto escrito incluido en el libro de memorias pudiera ser presentada para su segunda evaluación y publicación en esta prestigiada revista.

## Referencias bibliográficas

- Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., Rasheed, R.K., Tambyrajah, V. 2003. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*.1:70-71.
- Amesho, K.T., Lin, Y.C., Mohan, S.V., Halder, S., Ponnusamy, V.K., Jhang, S.R. 2023. Deep eutectic solvents in the transformation of biomass into biofuels and fine chemicals: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 21:183-230.
- Aransiola, E.F., Ojumu, T.V., Oyekola, O.O., Madzimbamuto, T.F., Ikhu-Omoregbe, D.I.O. 2014. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*. 61:276-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>
- Atabani, A.E., César, A.S. 2014. *Calophyllum inophyllum* L. A prospective non edible biodiésel feedstock. Study of biodiesel production, properties, fatty acid composition, blending, and engine performance. *Renew. Sust. Energy. Rev.* 37:644-655.
- Awais, M., Musmar, S.E.A., Kabir, F., Batool, I., Rasheed, M.A., Jamil, F., Tlili, I. 2020. Biodiesel production from *Melia azedarach* and *Ricinus communis* oil by transesterification process. *Catalysts*. 10(4):427. doi:10.3390/catal10040427
- Banco Mundial. 2023. Energía. Panorama general. Consultado el 5/01/2024. [Energía \(bancomundial.org\)](https://www.bancomundial.org)
- Banković-Ilić, I.B., Stamenković, O.S., Veljković, V.B. 2012. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16:3621-3647.
- Barón, M., Huertas, I. Orjuela, J. 2013. Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: Una revisión de la literatura. *Ingeniería*. 18:84-117.
- Bazargan, A., Kostić, M.D., Stamenković, O.S., Veljković, V.B., McKay, G. 2015. A calcium oxide-based catalyst derived from palm kernel shell gasification residues for biodiesel production. *Fuel*. 150:519-525.
- Boey, P.L., Maniam, G.P., Hamid, S.A. 2009. Biodiesel production via transesterification of palm olein using waste mud crab (*Scylla serrata*) shell as a heterogeneous catalyst. *Bioresource Technology*. 100:6362-6368.
- CEPAL. 2003. Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe: El aporte de las fuentes renovables. CEPAL. Chile.
- Cesur, C., Eryilmaz, T., Uskutoğlu, T., Doğan, H., Senkal, B.C. 2018. Cocklebur (*Xanthium strumarium* L.) seed oil and its properties as an alternative biodiesel source. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 42(1):29-37.

- Chakraborty, R., Bepari, S., Banerjee, A. 2011. Application of calcined waste fish (*Labeo rohita*) scale as low-cost heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Bioresource Technology*. 102:3610-3618.
- Contreras-Gómez, M., Galán-Martín, Á., Seixas, N., da Costa Lopes, A. M., Silvestre, A., Castro, E. 2023. Deep eutectic solvents for improved biomass pretreatment: Current status and future prospective towards sustainable processes. *Bioresource Technology*. 369:128396. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128396>
- Dasgupta, P. 2021. *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury. London, United Kingdom.
- Deka, D. C., Basumatary, S. 2011. High quality biodiesel from yellow oleander (*Thevetia peruviana*) seed oil. *Biomass and Bioenergy*. 35:1797-1803.
- EI. 2023. *Statistical Review of World Energy*. 72nd Edition. Energy Institute. London, United Kingdom.
- Gandhe, R.R., Sekhar, A., Muthu, R. 2022. Evaluation trials and carbon sequestration potential of *Jatropha curcas* and *Pongamia pinnata*: Technologies and Way Forward. En *Advanced Biodiésel - Technological Advances, Challenges, and Sustainability Considerations*. Fattah, I.M.R., ed. Cap. 8. DOI: 105772/interchopen.108793.
- Gebremariam, S.N., Marchetti, J.M. 2018. Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*. 168:74-84.
- Girvan, N. 2008. La economía de plantación en la era de la globalización. En *Teoría de la economía de plantación*. Best, L., Polanyi-Levitt, K., eds. Casa de las Américas. La Habana, Cuba.
- Günay, M.E., Türker, L., Tapan, N.A. 2019. Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems. *Fuel*. 250:27-41.
- Hayyan, A., Hashim, M.A., Hayyan, M., Mjalli, F.S., Nashef, I.M. 2014. A new processing route for cleaner production of biodiesel fuel using a choline chloride based deep eutectic solvent. *Journal of Cleaner Production*. 65:246-251.
- Highina, B.K., Bugaje, I.M., Umar, B. 2014. A review on second generation biofuel: A comparison of its carbon footprints. *European Journal of Engineering and Technology*. 2:117-125.
- IEA. 2023. *World Energy Outlook 2023*. IEA. 355 pp. París, Francia.
- IEA. 2024. *World Energy Balances*. International Energy Agency. Consultado el 05/02/2024. [World Energy Balances - Data product - IEA](#)
- Janssen, C.H.C. 2019. Solvents engineering for the removal of metals in aqueous phases / *Ingeniería de solventes para la remoción de metales desde fases acuosas*. In First Round Table with the subject of Goal 6, Clean water and sanitation (UNO/ONU 2030) of the Tenth International DAAD Alumni-Alumnae Seminar on Green Engineering and Applications to Water Management (Quality and Availability) in Honor of Dr. Peter Kuschik and Dr. Hanns Sylvester. June 07, 2019. University City, Mexico City, Mexico.
- Kamel, D.A., Farag, H.A., Amin, N.K., Zatout, A.A., Ali, R.M. 2018. Smart utilization of jatropha (*Jatropha curcas* L.) seeds for biodiesel production: Optimization and mechanism. *Industrial Crops and Products*. 111:407-413.
- Khairil, Rizki, A., Silitonga, A.S., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I. 2018. The potential biodiesel production from *Cerbera odollam* oil (Bintaro) in Aceh. In *MATEC Web of Conferences*. Vol. 159, p. 01049. EDP Sciences.
- Kiss, A.A. 2010. Separative reactors for integrated production of bioethanol and biodiesel. *Computers & Chemical Engineering*. 34(5):812-820. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.09.005>
- Kumbhar, V., Pandey, A., Varghese, A., Wanjari, S. 2020. An overview of production, properties and prospects of tamarind seed oil biodiesel as an engine fuel. *International Journal of Ambient Energy*. 1-9. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1824946>.
- Li, H., Niu, S., Lu, C., Liu, M., Huo, M. 2014. Use of lime mud from paper mill as a heterogeneous catalyst for transesterification. *Sci. China Technol. Sci*. 57:438-444.
- Luquea, R., Pineda, A., Colmenares, J.C., Campelo, J.M., Romero, A.A., Serrano Riza, J.C. 2012. Carbonaceous residues from biomass gasification as catalysts for biodiesel production. *J. Nat. Gas Chem*. 21:246-250.
- Mamtani, K., Shahbaz, K., Farid, M.M. 2021. Deep eutectic solvents–Versatile chemicals in biodiésel production. *Fuel*. 295:1-16.
- Marwaha, A., Dhir, A., Mahla, S.K., Mohapatra, S.K. 2018. An overview of solid base heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Catalysis Reviews*. 60:594-628.
- Meira, M., Quintella, C.M., Ribeiro, E.M.O., Silva, H.R.G., Guimarães, A.K. 2015. Overview of the challenges in the production of biodiesel. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 5(3):321-329.
- Moreira, K.S., MouraJunior, L.S., Monteiro, R.R., de-Oliveira, A.L., Valle, C.P., Freire, T.M., dos-Santos, J.C. 2020. Optimization of the production of enzymatic biodiesel from residual babassu oil (*Orbignya* sp.) via RSM. *Catalysts*. 10:1-20.
- Nakatani, N., Takamori, H., Takeda, K., Sakugawa, H. 2009. Transesterification of soybean oil using combusted oyster shell waste as a catalyst. *Bioresource Technology*. 100:1510-1513.
- Nayak, M.G., Vyas, A.P. 2022. Parametric study and optimization of microwave assisted biodiesel synthesis from *Argemone mexicana* oil using response surface methodology. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 170:1-17.
- Onoji, S.E., Iyuke, S.E., Igbafe, A.I., Nkazi, D.B. 2016. Rubber seed oil: A potential renewable source of biodiesel for sustainable development in sub-Saharan Africa. *Energy Conversion and Management*. 110:125-134.
- Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., Du, W. 2021. An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnol. Biofuels*. 14:129. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>
- Placci, G., Di Bitetti, M. 2005. Situación ambiental en la ecorregión del bosque Atlántico del Alto Paraná (selva paranaense). *La Situación Ambiental Argentina* (Corcuera editores. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires, Argentina). 2005:195-225.
- Raven, P.H., Gereau, R.E., Phillipson, P.B., Chatelain, C., Jenkins, C.N., Ulloa-Ulloa, C. 2020. The distribution of biodiversity richness in the tropics. *Science Advances*. 6:1-5.
- Riegelhaupt, E., Odenthal, J., Janeiro, L. 2016. Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento. *Red Mexicana de Bioenergía*. 129 pp. Ciudad de México, México.
- Ruesgas-Ramón, M., García-Sosa, K., Peña-Rodríguez, L.M. 2023. Solventes eutécticos profundos naturales (NaDES) y su probable función en las plantas. *BioTecnología*. 27:49-55.

- 
- Santamaría-Hernández, D., Galán-Méndez, F., Hernández-Medel, M.R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Solís-Fuentes, J.A. 2019. La cal viva como catalizador heterogéneo de alta disponibilidad y bajo costo para la producción de biodiésel. *Ambiens Techné et Scientia México*. 7:87-94.
- SENER, 2023. Balance de energía 2022. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética Dirección General de Planeación e Información Energéticas. Secretaría de Energía. Ciudad de México. México.
- Shahbaz, K., Mjalli, F.S., Hashim, M.A., Nashef, I.M. 2011a. Using deep eutectic solvents based on methyl triphenyl phosphonium bromide for the removal of glycerol from palm-oil-based biodiesel. *Energy & Fuels*. 25:2671-2678.
- Shahbaz, K., Mjalli, F.S., Hashim, M.A., Nashef, I.M. 2011b. Eutectic solvents for the removal of residual palm oil-based biodiesel catalyst. *Separation and Purification Technology*. 81:216-222.
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Investigación de materiales para la producción sostenible de biodiésel a costos más bajos en contextos subdesarrollados. En *Sustainability and Development: II. Socioeconomical Aspects*. Durán-Domínguez de Bazúa, M.d.C., ed. Ch. 13, pp. 271-287. AM Editores, Ciudad de México, México.
- Su, C.H., Nguyen, H.C., Pham, U.K., Nguyen, M.L., Juan, H.Y. 2018. Biodiesel production from a novel nonedible feedstock, soursop (*Annona muricata* L.) seed oil. *Energies*. 11:2562. doi:10.3390/en11102562
- Sunkel, O., Paz, P. 1980. El subdesarrollo latinoamericano y la teoría del desarrollo. Siglo XXI Editores, Ciudad de México, DF, México.
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehghani, M., Panahi, H.K.S., Mollahosseini, A., Hosseini, M., Soufiyan, M.M. 2019. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 74:239-303.
- Tacias-Pascacio, V.G., Rosales-Quintero, A., Rodrigues, R.C., Castañeda-Valbuena, D., Díaz-Suárez, P.F., Torrestiana-Sánchez, B., Fernández-Lafuente, R. 2021. Aqueous extraction of seed oil from mamey sapote (*Pouteria sapota*) after Viscozyme L treatment. *Catalysts*. 11:2-15.
- Takase, M., Feng, W., Wang, W., Gu, X., Zhu, Y., Li, T., Yang, L., Wu, X. 2014. *Silybum marianum* oil as a new potential non-edible feedstock for biodiesel: A comparison of its production using conventional and ultrasonic assisted method. *Fuel Process. Technol.* 23:19-26.
- Torroba, A. 2020. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020. IICA. San José, Costa Rica.
- Troter, D.Z., Todorović, Z.B., Đokić-Stojanović, D.R., Stamenković, O.S., Veljković, V.B. 2016. Application of ionic liquids and deep eutectic solvents in biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 61:473-500.
- Wei, Z., Xu, C., Li, B. 2009. Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 100:2883-2885.
- Worldometer. 2024. Population by country. Consultado el 5/01/2024. [Population by Country \(2024\) - Worldometer \(worldometers.info\)](https://www.worldometers.info/population/)
- Yang, L., Zhang, A., Zheng, X. 2009. Shrimp shell catalyst for biodiesel production. *Energy Fuel*. 23:3859-3865.