

**Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado.**

**Biodiesel production performance by transesterification from used soybean oil.**

Josué Iván Rodríguez Bustamante<sup>1</sup>

irodriguezbsutamante@gmail.com

**Universidad Peruana Unión, Lima-Perú**

Dennys José Meza Gago<sup>2</sup>

dennysmeza@upeu.edu.pe

**Universidad Peruana Unión, Lima-Perú**

Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez<sup>3</sup>

ili@upeu.edu.pe

**Universidad Peruana Unión, Lima-Perú**

---

**Artículo Recibido:** 06-04-2021

**Artículo Aceptado:** 31-01-2022

---

**Resumen**

**E**l objetivo fue evaluar el rendimiento de producción de biodiesel a partir de aceite de soja usado para un mejor aprovechamiento de los aceites usados por el método de transesterificación, se evaluaron el Óxido de Calcio (2 y 6%) y la Relación Molar de etanol: aceite (9:1 y 15:1). Se planteó un diseño experimental factorial 2<sup>2</sup> con cinco puntos centrales para evaluar el efecto de los parámetros

1 Ingeniero Ambiental de la Universidad Peruana Unión. Especialización en sistemas integrados de gestión ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 e ISO 45001:2018. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-1274>

2 Ingeniero Ambiental de la Universidad Peruana Unión con énfasis a la implementación de sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, sistema de gestión ambiental y sistema de gestión de calidad. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3295-6130>.

3 Ingeniero en Industrias Alimentarias de la UNCP, Ingeniero Ambiental de la UAP, Maestría en Salud Pública con mención en Salud Colectiva y Promoción de la Salud en la UPEU, estudios concluidos Doctorado en Ingeniería Ambiental en UNFV. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0510-3709>

relación molar etanol: aceite y el porcentaje de concentración de Óxido de Calcio en el rendimiento de biodiesel. El rendimiento mayor de biodiesel fue de 60.9%, con relación molar 15:1 etanol: aceite y concentración de óxido de calcio 6%. Cabe señalar que se podría optimizar este rendimiento aplicando la metodología de superficie respuesta, la viscosidad fue de 8,70 centistokes, resultado que estuvo cercano a la norma ASTM D6751-09. Por último, las variables de control con relaciones molares mayores a 15:1 y concentraciones de catalizador próximas al 6%, son aplicables para optimizar el rendimiento de producciones del biodiesel.

**Palabra clave:**

Transesterificación, catalizador, relación molar, viscosidad

**Abstract**

The objective was to evaluate the yield of biodiesel production from used soybean oil for a better use of used oils by the transesterification method, Calcium Oxide (2 and 6%) and the Molar Ratio of ethanol were evaluated: oil (9:1 and 15:1). A 22 factorial experimental design with five central points was proposed to evaluate the effect of the ethanol:oil molar ratio parameters and the percentage of Calcium Oxide concentration on biodiesel yield. The highest biodiesel yield was 60.9%, with a 15: 1 ethanol:oil molar ratio and a 6% calcium oxide concentration. It should be noted that this performance could be optimized by applying the response surface methodology, the viscosity was 8.70 centistokes, a result that was close to the ASTM D6751-09 standard. Finally, the control variables with molar ratios greater than 15:1 and catalyst concentrations close to 6% are applicable to optimize the yield of biodiesel production.

**Key words:**

Transesterification, catalyst, molar ratio, viscosity

---

**Introducción**

El uso de la energía se ha convertido en un requisito básico para la subsistencia de la humanidad, es así, que los combustibles, a base de petróleo, continúan siendo la fuente principal de energía utilizada a nivel global; sin embargo, el uso de estos produce un incremento de la

contaminación en forma exponencial. Por otro lado, en la actualidad el uso de biodiésel ha adquirido más fuerza debido a que este es un combustible alternativo y sostenible (Sánchez et al., 2019; Mahlia et al., 2019) ya que el uso de estos conlleva propiedades ecológicas entre las cuales se destacan la reducción de emisiones gaseosas tales como: SO<sub>2</sub> hasta 0 %, CO<sub>2</sub> en un 10% aproximado, CO entre 10-50 %, hollín entre 40-60 %, compuestos poliaromáticos y aldehído con índices de hasta 13% (Marquín et al., 2020). Por consiguiente el uso de biodiesel minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Akubude et al., 2018), generando un menor impacto en el clima global (Mansir et al., 2018).

Por lo general el biodiesel se obtiene de aceites vegetales de alto valor entre los cuales se destacan el algodón, girasol, colza, palma y maní; representando así el 95% de la materia prima para la producción del mismo (Hernández et al., 2021). Sin embargo, su costo representa un 75 % del costo total de fabricación, en otras palabras la producción del mismo es costosa (Abed et al., 2019). No obstante, existe la posibilidad de emplear aceite de cocina usado (ACU) como materia prima, cuyo costo de obtención varía desde ser gratuito hasta un 60 % menor que los aceites vegetales crudos (Kataria et al., 2018). Por lo tanto el ACU se considera el mejor candidato como materia prima para la producción del biodiesel por ser económico (Singh, Sharma, Soni, Inda, et al., 2020). Por otro lado, nos permite el reaprovechar el ACU de modo que se reduce la generación de residuos, evitando así la contaminación de los cuerpos de agua ocasionado por la descarga directa en los sistemas de drenaje, reduce la obstrucción y daños de tuberías, minimiza los costos de los tratamientos de efluentes y causa menor impacto al suelo y ecosistemas (Moyo et al., 2020). Así mismo, el ACU demuestra ser viable permitiendo un 21% en ahorro del petróleo y un 96% de ahorro de energía fósil (Sarno y Iuliano, 2019).

Otro factor determinante para la producción del biodiesel, es la aplicación del método de transesterificación, debido a su bajo costo, simplicidad técnica y eficiencia (Mirhashemi y Sadri, 2020). Asimismo, cabe resaltar que las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son la calidad de materia

prima, el tipo de catalizador (homogéneo y heterogéneo), la cantidad del catalizador (desde 0.25 a 6 %) con respecto con el peso del aceite, el tipo de alcohol (metanol o etanol), la relación molar alcohol/aceite (desde 0,1:1 a 24:1) y las condiciones de reacción como la temperatura del aceite (entre 37 y 75 °C), presión y agitación constante (Ramírez et al., 2020, Saavedra et al., 2019 y Moazeni et al., 2019).

Para una producción sostenible se recomienda el uso del etanol en reemplazo del metanol, como solvente en la transesterificación (Rezania et al., 2019), permitiendo la obtención de un biodiesel más renovable, no tóxico y su producción no depende de los recursos petroquímicos (Chen et al., 2017) *crystallization behavior and rheological property of methyl and ethyl biodiesels were investigated. Differential scanning calorimeter* (DSC. Respecto al catalizador heterogéneo (CaO) y el homogéneo (KOH, NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (Singh, Sharma, Soni, Sharma, et al., 2020), el uso del catalizador heterogéneo en reemplazo de un catalizador homogéneo como reactivo en la transesterificación, permite reducir los impactos generados en la producción de biodiesel, como son la cantidad de agua usada y la generación de residuos. (Latchubugata et al., 2018).

Por las razones expuestas anteriormente, este trabajo busca estimar el rendimiento de producción de biodiesel mediante el método de transesterificación a partir del aceite usado de soja (ASU) empleado el etanol y como catalizador el óxido de calcio (CaO).

## **Metodología**

### **Recolección de Materia Prima**

El Aceite de Soja Usado (ASU) fue recolectada en las instalaciones de la cocina del cafetín de la Universidad Peruana Unión (11°59'24"S 76°50'29"O) en un envase de polietileno de alta densidad de ocho litros, para luego, ser transportados a los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Ambiental y el Centro de Investigación de Ciencias Alimentarias, para la evaluación de la Viscosidad y la obtención del biodiesel.

### **Pretratamiento**

El ASU fue filtrado a través de un papel filtro Whatman cuantitativo N°4, que permite retener hasta 25  $\mu\text{m}$ , para retirar sólidos suspendidos presentes en la muestra. Para favorecer la fluidez del filtrado, se calentó la muestra a 40°C con el fin de reducir la viscosidad. Asimismo, fue necesario evaporar el contenido de agua del ASU calentando la muestra a 60°C durante 15 minutos, esto para evitar la saponificación durante la reacción de transesterificación. (Lafont et al., 2011 y Medina et al., 2015)

### **Medición de la Viscosidad del ASU**

Se determinó la viscosidad del ASU con el equipo Reómetro Brookfield Modelo DV-III, Serie RP6 2232 a 40 °C mediante la Progresión de la Viscosidad Geométrica con un ajuste de velocidad a 10 rpm, ejecutada cada 5 tiempos, con espera de 30 segundos y un aumento de velocidad en 5 rpm.. Estos datos se programaron externamente a través del Software Rheocalc V2.3. Se usó el Spindle RV1.

Se adaptó de Hamze et al. (2015) *transesterification of the waste cooking oil has been studied*. Response surface methodology (RSM la densidad del aceite de cocina usado igual a 0.96 g/ml y la masa molar igual a 866.31 g/mol. Asimismo se aplicó la metodología de uso del Reómetro Brookfield donde la viscosidad cinemática se multiplica por el factor de corrección del Spindle #1 , con la viscosidad obtenida a 60 RPM a esto se le dividió entre la densidad para obtener el resultado esperado.

### **Preparación del Catalizador (Alcóxido)**

En esta investigación se evaluó dos variables asociadas con la producción del biodiesel, como son: el Óxido de Calcio (CaO Cal nieve al 50% Worsal) como catalizador; en concentraciones de 2 y 6% en relación a la masa del ASU. Asimismo, se usó etanol (96° pureza JENFARMA ) para elaborar soluciones molares de etanol/aceite en relación de 9:1 y 15:1 (Sanli et al., 2018). Para formar el alcóxido se mezcló la concentración del alcohol y la cantidad de catalizador a 40 °C, para esto se hace el uso de los cálculos

estequiométricos para hacer el uso adecuado de cada insumo, teniendo como base el uso de 200 ml de aceite usado de soja.

### **Aplicación de la Metodología de Transesterificación**

Para separar el Ester, del Glicerol del ASU, se vertió el alcóxido en la muestra, que preliminarmente fue calentada para no alterar la temperatura de reacción. Asimismo, la reacción estequiométrica requirió 1 mol de triglicérido y 3 moles de alcohol, no obstante, se utilizó un exceso del alcohol para incrementar el rendimiento de los ésteres de alquilo y para permitir su separación de fases desde el glicerol que se forme” (Anwar et al., 2018), siendo la relación molar de 9:1 y 15:1 recomendadas para la reacción. Los parámetros son fijos, tales como tiempo de reacción 3 horas, 70°C la temperatura de reacción, y 1000 rpm la velocidad de reacción en un agitador magnético (Yeom y Go, 2018).

### **Separación de Biodiesel y Glicerina**

Posterior a la transesterificación, la mezcla se mantuvo en reposo durante 24 h en Matraz Erlenmeyer de 500 mL, para la diferenciación del subproducto glicerol del biodiesel. La capa superior se compone por ésteres etílicos (biodiesel) mientras que la inferior por glicerol, etanol en exceso y el catalizador restante junto con jabón (Pirouzmand et al., 2018).

### **Obtención de biodiesel y evaluación del rendimiento**

Posterior a la separación de fases, se obtiene la separación del glicerol con el Ester resultante (biodiesel), para ser filtrado en un matraz, para impedir la presencia de jabones en el producto final. El rendimiento de la producción de biodiesel se estimó mediante la Ecuación 1. (Bateni & Karimi, 2016)

$$\text{Rendimiento de biodiesel (\%)} = \frac{BP \text{ (g)}}{ASU \text{ (g)}} \times 100 \quad (1)$$

Donde; BP son los mililitros del Biodiesel producido y ASU es los mililitros

de Aceite de Soja Usados.

### **Medición de Viscosidad del Biodiesel y Comparación**

Para el análisis de la viscosidad del biodiesel, se evalúa la muestra, utilizando el mayor rendimiento obtenido de ASU a temperatura ambiente y a 40 °C, la prueba de viscosidad fue ejecutada con los mismos parámetros que se sometió para el aceite de soja usado (ASU).

Además, se determinó el tipo de fluido siguiendo la metodología de P. Mitschka.

La viscosidad obtenida se compara con la viscosidad del Diesel B5 S-50 la cual es una mezcla del Diésel 2 con un 5% de Biodiesel con el objetivo de ver si el ensayo analizado puede tener la propiedad de viscosidad adecuada. Asimismo, el reporte del análisis de Diesel B5 S-50 fue obtenido de La Estación de Servicios con Gasocentro de GLP “Multiservicios ECOGAS S.A.C.”, la cual comercializa este producto.

### **Diseño experimental**

Para el análisis estadístico se aplicó dos diseños estadísticos el primero un diseño experimental  $2^2$  con 5 puntos centrales (Modelo de primer orden), luego se aplicó un diseño Central Compuesto Rotacional, a cada diseño se realizó el análisis de varianza, asimismo, se elabora graficas de superficie de respuesta para cada uno de ellos; los datos encontrados fueron analizados en el software Statsoft Statistica V. 13

### **Modelo de primer orden**

Para el análisis y procesamiento de datos se aplicó un diseño experimental  $2^2$  con cinco puntos centrales, en el cual se evaluaron los efectos que tienen los parámetros de relación molar etanol-aceite y el porcentaje de concentración de Oxido de Calcio. Esta se ajustó a un modelo de primer orden y se aplicó el método de ascenso rápido mostrado en la Tabla 1.

Por lo tanto,  $E_1$  representa la variable natural Relación Molar de Etanol/

Aceite, y  $E_2$  la variable natural Concentración de Catalizador (%), entonces las variables codificadas son  $X_1$  y  $X_2$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_1 = \frac{E_1 - 12:1}{3} \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{E_2 - 4}{2} \quad (3)$$

**Tabla 1**  
*Modelo de Primer Orden Diseño  $2^2$  con arreglo factorial*

Corrida	Variables			
	Variables de proceso		Variables Codificadas	
	$E_1$	$E_2$	$X_1$	$X_2$
1	09:01	2	-1	-1
2	09:01	6	-1	1
3	15:01	2	1	-1
4	15:01	6	1	1
5	12:01	4	0	0
6	12:01	4	0	0
7	12:01	4	0	0
8	12:01	4	0	0
9	12:01	4	0	0

Fuente: Elaboración Propia

### Modelo de segundo orden

Asimismo, se aplicó un modelo de segundo orden para simplificar



Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado.

los Cálculos, para la cual se seleccionó un diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR), cuyas Variables independientes se codificaron (-1,1).

Este diseño consto de 13 experimentos, que incluyen a 4 puntos factoriales, 4 puntos axiales ( $\alpha$  de rotabilidad = 1.4142) y 5 puntos centrales. La distribución de este modelo se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Diseño Central Compuesto Rotacional con puntos axiales y puntos centrales*

Corrida	Variables			
	Variables de proceso		Variables Codificadas	
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	09:01	2	-1	-1
2	09:01	6	-1	1
3	15:01	2	1	-1
4	15:01	2	1	-1
5	16.24:1	4	1.41421	0
6	7.76:1	4	-1.41421	0
7	12:01	1.17	0	-1.41421
8	12:01	6.83	0	1.41421
9	12:01	4	0	0
10	12:01	4	0	0
11	12:01	4	0	0
12	12:01	4	0	0
13	12:01	4	0	0

**Fuente:** Elaboración Propia

## Resultados

### Viscosidad del Aceite de Soja Usado

Los análisis del comportamiento de la viscosidad del ASU se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 1, en ellas se puede observar el principio de la viscosimetría rotacional, puesto que miden la viscosidad captando el par de torsión (Torque) necesario para hacer girar a velocidad constante una aguja inmersa en el fluido de estudio. El par de torsión (Torque) es proporcional a la resistencia viscosidad (Velocidad), llegando mostrar una viscosidad con un valor de 54.80 mili Pascal a una velocidad de 100 RPM y un torque de 54.80%, en donde se usó el Spindle RV1.

**Tabla 3**

*Comportamiento de la viscosidad Ascendente del Aceite de Soja Usada (ASU)*

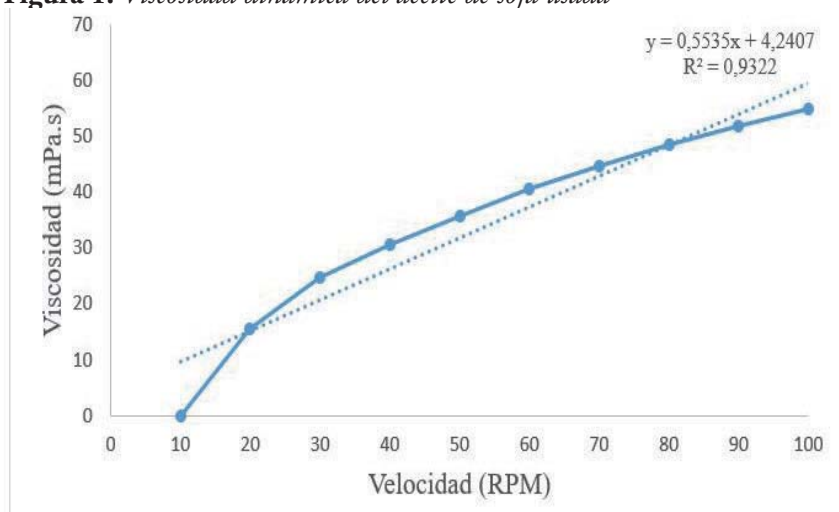
Viscosidad (mPa.s)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	Spindle
0.00	10.00	-0.54	RV1
15.50	20.00	3.11	RV1
24.67	30.00	7.36	RV1
30.50	40.00	12.21	RV1
35.80	50.00	17.90	RV1
40.67	60.00	24.35	RV1
44.71	70.00	31.26	RV1
48.38	80.00	38.71	RV1
51.78	90.00	46.57	RV1
54.80	100.00	54.80	RV1

*Fuente:* Elaboración Propia

García et al. (2018), en su estudio de aceite de *Jatropha curcas* L. mostro una viscosidad de 30.85 mPa.s a una temperatura de 40 °C presentando valores semejantes a los nuestros con un valor de 30.50; por otro lado, Cedrón et al., (2014), mostraron en su estudio de caracterización del ASU

encontró una viscosidad de 168.3 mPa.s a una temperatura de 22°C siendo superior a lo encontrado. Asimismo, la Figura 1 confirma lo hallado ya que se puede apreciar un comportamiento lineal, con un valor de  $R^2$  de 0.9322, asimismo, se encontró en este análisis del comportamiento de la viscosidad con respecto a la velocidad dándonos el valor  $p = 0.231$ , indicando que existe una relación directa en los ya mencionados.

**Figura 1.** Viscosidad dinámica del aceite de soja usada



*Fuente:* Elaboración Propia

Delgado y Aperador (2014), explican este fenómeno a que a mayor incremento de velocidad mayor formación de emulsión haciendo que las moléculas de aceite empiezan a realizar micelas mostrando así que los aceites son fluidos no Newtonianos.

### Modelo de Primer Orden

La tabla 4 muestra el rendimiento de biodiesel en la que se puede apreciar que la corrida 4 con un valor de 60.9%, seguido de la corrida 3 con un valor de 55.2%, por otro lado, el valor más bajo fue obtenido por la corrida 1 con valor de 10.5%.

Al respecto, Barbosa et al. (2014) mencionan que una de las variables que más afecta en la conversión del biodiesel es la relación molar alcohol: aceite. Por lo que en la Tabla 4 se observa que la relación molar más alta etanol: aceite de 15:1 con la mayor concentración del catalizador 6 % obtuvo un mayor rendimiento de 60.9. Así mismo para Ullah et al. (2015) el mayor rendimiento que obtuvieron fueron con la relación molar etanol /aceite de 15:1.

**Tabla 4**

*Rendimiento de biodiesel de ASU*

Corrida	Variables de Proceso		Variables Codificadas		Rendimiento
	$E_1$	$E_2$	$X_1$	$X_2$	Y (%)
1	9:1	2	-1	-1	10.5
2	9:1	6	-1	1	13.7
3	15:1	2	1	-1	55.2
4	15:1	6	1	1	60.9
5	12:1	4	0	0	38.7
6	12:1	4	0	0	38.4
7	12:1	4	0	0	39.1
8	12:1	4	0	0	39.9
9	12:1	4	0	0	38.3

*Fuente:* Elaboración Propia

Asimismo, el análisis de varianza observado en la Tabla 5, indica que la variable de estudio Relación etanol: aceite (REA) tiene como valor p,  $0.000 < 0.05$ , por tanto se considera significativo; asimismo, la variable Concentración del Catalizador (CC) cuyo valor p fue es  $0.002821 < 0.05$  arrojando un valor de significancia. Se observa que la REA genera mayores diferencias que la Concentración del Catalizador (CC), porque tiene mayor

Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado.

suma de cuadrados, además, del nivel de significancia de las variables de estudio, la curvatura fue significativa, no hay interrelación entre las variables de estudio esto significó la aplicación del modelo central compuesto que se muestra en la Tabla 6, para obtener un modelo de segundo orden.

**Tabla 5**

*Análisis de Varianza de Rendimiento en el modelo de primer orden*

Factor	Suma de cuadrados	GL	F	P - valor
Curvatura	30.505	1	72.286	0.001050*
REA mol/ mol ( $X_1$ )	2129.822	1	5046.973	0.000000*
CC % ( $X_2$ )	18.062	1	42.802	0.002821*
$X_1$ por $X_2$	1.102	1	2.613	0.181326
Error puro	1.688	4		
Total SS	2181.180	8		

*Nota:* \* Términos significativos ( $p \leq 0.05$ ), a un nivel de significancia de 95%

*Fuente:* Elaboración Propia

**Modelo de Segundo Orden**

Los experimentos a realizar por medio del DCCR tomando el nuevo punto (0,0) en (85, 175) y agregando puntos axiales en  $\pm 1.414$  queda como:

**Tabla 6**

*Resultados de Diseño Central Compuesto con puntos axiales y puntos centrales*

Corrida	Variables de Proceso		Variables Codificadas		Rendimiento
	$E_1$	$E_2$	$X_1$	$X_2$	Y
1	9:1	2	-1	-1	10.5
2	9:1	6	-1	1	13.7

3	15:1	2	1	-1	55.6
4	15:1	6	1	1	60.9
5	12:1	4	0	0	38.7
6	12:1	4	0	0	38.4
7	12:1	4	0	0	39.1
8	12:1	4	0	0	39.9
9	12:1	4	0	0	38.3
10	16.24:1	4	1.414	0	65.7
11	7.76:1	4	-1.414	0	11.2
12	12:1	1.17	0	-1.414	36.1
13	12:1	6.83	0	1.414	43.2

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 7 muestra que el análisis de varianza para el rendimiento el componente lineal de la relación molar etanol:aceite (REA) es significativo (0.00000), así mismo el componente cuadrático de REA es significativo (0.0086). El componente lineal de la concentración del catalizador (CC) es significativo (0.000543) en cambio el componente cuadrático no es significativo (0.0768), tampoco se encuentra una interrelación entre las variables estudiadas.

Se observa que en el modelo de segundo orden no es necesario aumentar la Concentración del Catalizador. Keera et al. (2018) Mencionan que el aumento adicional de la concentración del catalizador (CC) produce una disminución del rendimiento de biodiesel, este comportamiento se debe a la alta concentración del catalizador en la que predomina la reacción de saponificación que crea glicerina en representación de ácidos grasos generando como resultado emulsión entre jabones y átomos de agua, por lo que no es recomendable aumentar las concentraciones de catalizador.

Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado.

**Tabla 7**  
*Análisis de Varianza del rendimiento de biodiesel*

Factor	ANOVA; R-sqr=.98352				
	SS	df	MS	F	p
(1)REA mol/mol(Lineal)	3585.971	1	3585.971	8497.562	0.000000
REA mol/mol(Cuadrático)	9.748	1	9.748	23.099	0.008609
(2)CC %(Lineal)	42.971	1	42.971	101.826	0.000543
CC %(Cuadrático)	2.371	1	2.371	5.617	0.076813
1L by 2L	1.102	1	1.102	2.613	0.181326
Pure Error	1.688	4	0.422		
Total SS	3702.089	12			

*Nota:*  $X_1$ : Relación Molar etanol: aceite y  $X_2$ ; \*Términos significativos ( $p \leq 0.05$ )

Fuente: Elaboración Propia

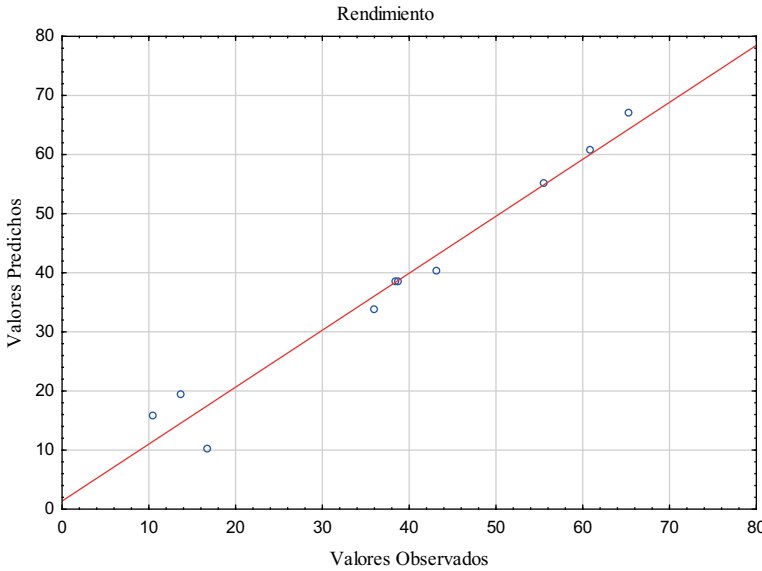
El modelo estudiado presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = -67.5 + 9.86X_1 + 1.28X_2 - 0.132X_1 * X_1 - 0.146X_2 * X_2 + 0.087X_1 * X_2 \quad (4)$$

En la figura 2 se muestra los valores observados y predichos para la variable de rendimiento. Se observa que los puntos están cerca de la línea de referencia, esto da a entender que los datos son similares a los datos obtenidos por los modelos de regresión, por lo tanto, son adecuados.

**Figura 2.**

*Valores Predichos y Valores Observados para la variable de Rendimiento (%)*



*Fuente:* Elaboración Propia

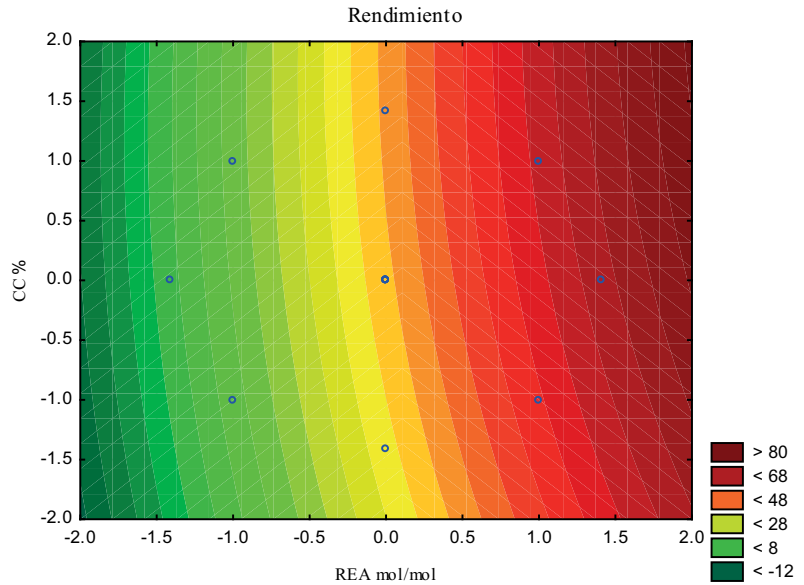
**Superficie Respuesta**

Se trabajó con la metodología superficie de respuesta para evaluar si se podría realizar una optimización para un rendimiento mayor de biodiesel, siendo estudiados los valores que representan mayor significancia en los ensayos realizados. Las condiciones óptimas para obtener un mejor rendimiento están a partir de valores mayores a 15:1 de relación molar etanol:aceite y una concentración de 6% de óxido de calcio que es el catalizador, estas condiciones se muestran en las figuras 3 y 4.



Figura 3

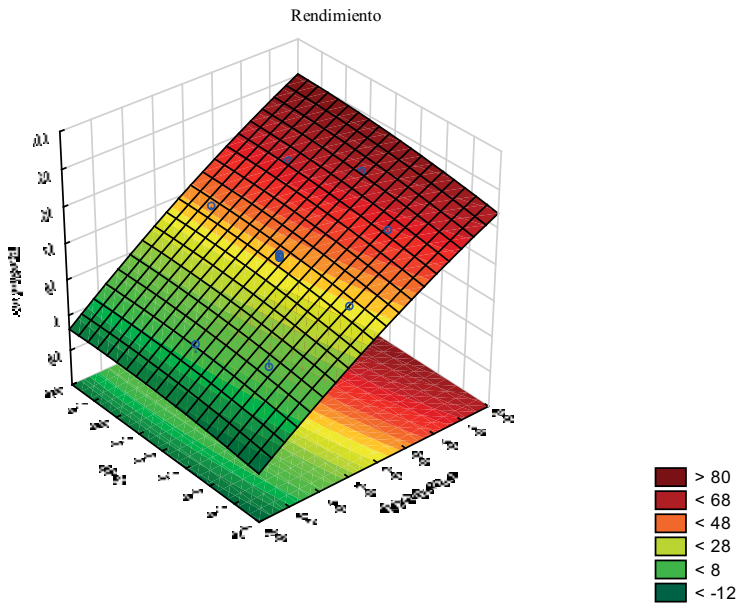
Diagrama de contorno de Rendimiento de Biodiesel (%)



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.

*Diagrama de superficie de respuesta del rendimiento de biodiesel (%)*



Fuente: Elaboración Propia

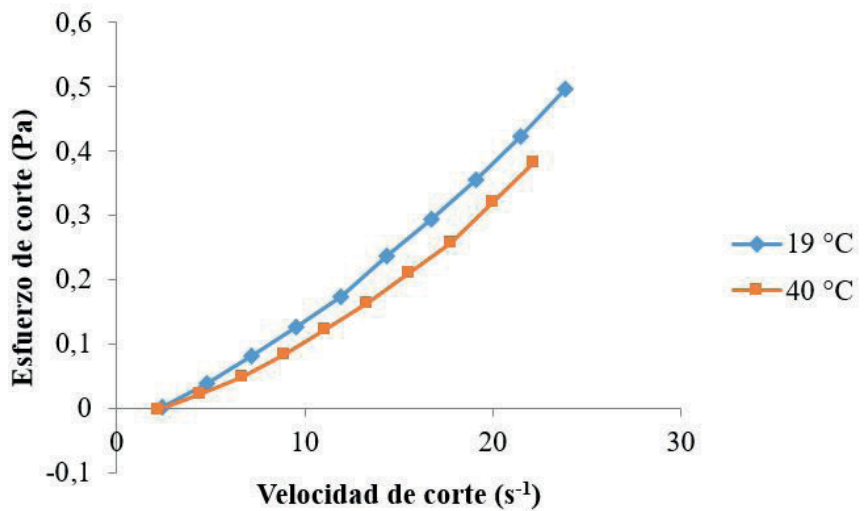
Al respecto, Claudia et al. (2014) mencionan que una de las variables que más afecta en la conversión del biodiesel es la relación molar alcohol:aceite (Alenezi et al., 2013). Esto también es confirmado por Musa (2016), al indicar sobre la dinámica de la relación molar en el rendimiento del biodiesel. Las pruebas obtenidas de los ensayos realizados, confirman que la relación molar etanol:aceite fue la que más influyó en el rendimiento de biodiesel, donde hay un crecimiento exponencial en el rendimiento a partir de tener una mayor relación molar.

## Viscosidad

Los valores obtenidos reométricamente del biodiesel, se interpretó en Excel, tanto a temperatura ambiente como a 40°C, siendo su comportamiento

dilatante, es decir como fluido no-newtoniano, tal como se aprecia en la figura 5, además su índice de comportamiento ( $n$ ) da mayor a 1 ( $n > 1$ ). A 19 °C el  $n=1.574$  y a 40°C el  $n=1.750$ , de esta manera se pudo ver que a mayor temperatura el biodiesel tiende a comportarse como un fluido dilatante. García et al. (2018) mencionan que el biodiesel tiende a comportarse como un fluido no-newtoniano dilatante cuando su temperatura aumenta, y que, a temperatura ambiente, tiende a comportarse como un fluido newtoniano, posiblemente debido a la presencia de algunos glicerolés presentes el biodiesel.

Figura 5.  
*Comportamiento de flujo del biodiesel a 19°C y 40°C*



Fuente: Elaboración Propia

Para la medición de la viscosidad cinemática, se trabajó con la densidad del biodiesel cuyo resultado fue 0.91 gr/cm<sup>3</sup>, y se trabajó con el factor de viscosidad dinámica a 60 rpm cuya viscosidad fue de 7.83 mPas. Luego de obtenido estos datos, se procedió a obtener la viscosidad cinemática y se comparó con la norma ASTM para biodiesel D6751-09, cuyo rango

establecido para el uso de motores de automóviles es desde 1.9 a 6.0 Centistokes (cSt). Con esta medición de viscosidad del ensayo con mayor rendimiento, se comparó con el reporte de análisis de Diesel B5 S-50, proveniente de la Refinería La Pampilla de la cual su viscosidad cinemática a 40 °C fue de 3.1 cSt, la cual está dentro de los parámetros de la norma ASTM. La viscosidad cinemática del ensayo trabajado (Biodiesel 100%) con 15:1 de relación etanol: aceite y 6% de catalizador a 40 °C, nos dio 8.60 mm<sup>2</sup>/s, esto convertido en Centistokes (cSt) es igual a 8.60 cSt., como se mencionó anteriormente, no está dentro de la normativa ASTM.

El resultado de viscosidad cinemática a 40 °C del Biodiesel al 100% del ensayo con mayor rendimiento obtenido en laboratorio, no cumple con la norma ASTM. Sin embargo Bilgin et al. (2015) mencionan que al aumentar el rendimiento de la reacción, la viscosidad del biodiesel tiende a disminuir. De esta forma, con un mejor rendimiento se podrá tener referencias de la disminución de la viscosidad.

### **Discusión**

Siendo el objetivo principal de la presente investigación evaluar el rendimiento de obtención de biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el método de Superficie de Respuesta, siendo la relación molar una variable que afecta directamente en el rendimiento del biodiesel. Investigaciones como de Musa (2016) y Pighinelli et al., (2011), mencionaron que el mejor rendimiento de biodiesel fue con una relación molar no mayor a 9:1. Sin embargo, las concentraciones de alcohol con mayor concentración de relación molar 9:1 pueden dar como resultado un mayor rendimiento según la presente investigación. Esto se ve reflejado por el tipo de catalizador que se empleó siendo de 50% de pureza, por lo que se puede obtener un mayor rendimiento con mayores concentraciones de alcohol, además la pureza del catalizador podría tener una incidencia en las relaciones molares requeridas para la producción de biodiesel.

Cabe señalar que la obtención del biodiesel se obtiene por muchos procesos,

siendo usado en esta investigación el proceso de Transesterificación. El proceso de transesterificación es común y ampliamente utilizado según Ambat et al., 2018, el cual requiere de catalizadores y alcohol para transformar el aceite, sin embargo este proceso puede implicar demanda de tiempo por ser un proceso lento (Sharma et al., 2018), por lo cual es necesario trabajar con parámetros óptimos (Temperatura, velocidad de agitación) para el mayor rendimiento del biodiesel.

Para la producción de biodiésel se usa una variedad de biolípidos como las grasas animales, aceites vegetales, aceites usados de cocinas entre otros. Para Lin et al., 2011, la obtención de la materia prima del biodiesel depende en gran medida del clima, las condiciones del suelo y la disponibilidad. Por otro lado, al usar aceites vegetales vírgenes para obtener biodiésel, se necesita tener plantaciones y mucho recurso económico para extraer el aceite y luego hacer el posterior proceso de obtención de biodiesel. Esto ha incentivado que la presente investigación se centre en el uso de aceite reciclado de soja obtenido del cafetín de la Universidad Peruana Unión, con el fin de reducir la eliminación de desechos y minimizar los costos de obtención de la materia prima.

### **Conclusiones**

En la evaluación del rendimiento del biodiesel, la relación molar etanol: aceite obtuvo un efecto significativo en el rendimiento de biodiesel respecto al porcentaje de concentración de óxido de calcio, el cual podría llegar a optimizarse logrando mayor rendimiento a 60,9% del mayor resultado de los ensayos estudiados.

La relación molar 15:1 etanol aceite y 6% de CaO, consiguen ser los nuevos factores a trabajar para la optimización, ya que se pudo obtener el rendimiento más alto con estos ensayos, además se pudo visualizar que trabajar con alcohol de 96° y CaO al 50% de grado comercial, sí es factible para obtener buenos resultados en el rendimiento.

La viscosidad del biodiesel no está dentro de los límites para su uso en

motores de automóviles; sin embargo, al obtener mayores rendimientos de biodiesel, la viscosidad será menor y será apropiado para el parque automotor.

### **Agradecimiento**

Se agradece a Dios, por brindarnos la oportunidad de vivir, por permitirnos disfrutar cada momento de nuestras vidas y guiarnos en el camino que ha trazado para nosotros.

### **Referencias Bibliográficas**

- Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.03.001>
- Akubude, V. C., Nwaigwe, K. N., & Dintwa, E. (2018). Production of biodiesel from microalgae via nanocatalyzed transesterification process: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(2), 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.12.006>
- Alenezi, R., Santos, R. C. D., Raymahasay, S., & Leeke, G. A. (2013). Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time. *Renewable Energy*, 53, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.019>
- Ambat, I., Srivastava, V., & Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(February 2017), 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.069>
- Barbosa, C., Ramírez, L., & Morales, N. (2014). Obtención de Biodiesel (etil-éster) Mediante Catálisis Básica a Nivel Planta Piloto Derivado de Aceites Usados de la Industria Alimenticia. *Publicaciones e Investigación*, 8(1), 99–116. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/25394088.1293>
- Bateni, H., & Karimi, K. (2016). Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach.

- Chemical Engineering Research and Design*, 107, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.014>
- Bilgin, A., Gülüm, M., Koyuncuoglu, İ., Nac, E., & Cakmak, A. (2015). Determination of Transesterification Reaction Parameters Giving the Lowest Viscosity Waste Cooking Oil Biodiesel. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2492–2500. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.318>
- Cedron, J. C., Moncada, A., & Mendoza, P. (2014). ANÁLISIS DE BODIESEL PREPARADO A PARTIR DE RESIDUOS DE ACEITE DOMÉSTICO, MEDIANTE RMN. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 80(1), 3–8. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v80i1.206>
- Chen, W., Wang, Y., Ding, M., Shi, S., & Yang, Z. (2017). Crystallization behaviors and rheological properties of biodiesel derived from methanol and ethanol. *Fuel*, 207, 503–509. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.121>
- Delgado, A. E., & Aperador, W. A. (2014). Estudio Comparativo del Poder Lubricante y Estabilidad Oxidativa entre el Aceite de Ajonjolí y Aceite Mineral 360 Arnoldo. *Información Tecnológica*, 25(4), 79–90. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400011>
- García, S., Sánchez, A., Labrada, B., Manuel, D., Lafargue, F., & Díaz, M. (2018). Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador. *Tecnología Química*, 38(2), 281–297. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2224-61852018000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852018000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=en)
- Hamze, H., Akia, M., & Yazdani, F. (2015). Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.12.005>
- Ho, S.-H., Wong, Y.-D., & Chang, V. W.-C. (2014). Evaluating the potential of biodiesel (via recycled cooking oil) use in Singapore, an urban city. *Resources, Conservation and Recycling*, 91, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.08.003>

- Kataria, J., Mohapatra, S. K., & Kundu, K. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalysts and its operational characteristics on variable compression ratio CI engine. *Journal of the Energy Institute*, 92(2), 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.008>
- Keera, S. T., El Sabagh, S. M., & Taman, A. R. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 979–984. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.02.007>
- Lafont, J. J., Páez, M. S., & Torres, Y. C. (2011). Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. *Informacion Tecnologica*, 22(4), 35–42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400005>
- Latchubugata, C. S., Kondapaneni, R. V., Patluri, K. K., Virendra, U., & Vedantam, S. (2018). Kinetics and Optimization Studies using Response Surface Methodology in Biodiesel Production using Heterogeneous Catalyst. *Chemical Engineering Research and Design*, 135, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.022>
- Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., & Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.029>
- Luque, R., & Melero, J. A. (2012). Introduction to advanced biodiesel production. In *Advances in Biodiesel Production* (Issue January). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857095862.1>
- Mahlia, T. M. I., Syazmi, Z. A. H. S., Mofijur, M., Abas, A. E. P., Bilal, M. R., Ong, H. C., & Silitonga, A. S. (2019). Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 118). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109526>
- Mansir, N., Teo, S. H., Rashid, U., Saiman, M. I., Tan, Y. P., Alsultan, G. A., & Taufiq-Yap, Y. H. (2018). Modified waste egg shell derived bifunctional catalyst for biodiesel production from high FFA waste cooking oil. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(May), 3645–3655. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.098>



- Marquínez, A., Loor, N., Guamán, C., Vélez, J., Solórzano, K., Rodríguez, J., & Riera, M. (2020). Obtención de biodiesel a partir de aceite de coco (*Cocos nucifera* L.). *Revista de Iniciación Científica*, 6(1), 9–14. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v6.1.2605>
- Medina, M., Roa, Y. O., & Tejada Benítez, L. (2015). Esterificación y Transesterificación de Aceites Residuales Para Obtener Biodiesel. *Luna Azul*, 40. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.3>
- Mirhashemi, F. S., & Sadrnia, H. (2020). NOX emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review. *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 129–151. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.04.003>
- Moazeni, F., Chen, Y.-C., & Zhang, G. (2019). Enzymatic transesterification for biodiesel production from used cooking oil, a review. *Journal of Cleaner Production*, 216, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.181>
- Moyo, L. B., Iyuke, S. E., Muvhiiwa, R. F., Simate, G. S., & Hlabangana, N. (2020). Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production parameters from waste cooking oil using a membrane reactor. *South African Journal of Chemical Engineering*, 35, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.10.002>
- Musa, I. A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>
- Pighinelli, B. A. L. M. T., Ferrari, R. A., Miguel, M. R. O., & Park, K. J. (2011). High oleic sunflower biodiesel: quality control and different purification methods. *Grasas y Aceites*, 62(2), 171–180. <https://doi.org/10.3989/gya.067010>
- Pirouzmand, M., Anakhaton, M. M., & Ghasemi, Z. (2018). One-step biodiesel production from waste cooking oils over metal incorporated MCM-41; positive effect of template. *Fuel*, 216, 296–300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.138>
- Ramírez, A., López, L., & Orozco, M. (2020). Optimización del proceso de transesterificación del aceite de palma usando la técnica

- basada en Ultrasonido. *Ciencia En Desarrollo*, 11(2). <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11142>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112155>
- Saavedra, R. M., García, H. J., Sánchez de Pinto, M. I., & Baigorí, M. D. (2019). Biodiesel a partir de aceite usado de locales gastronómicos: efecto de la temperatura de reacción. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 320. <https://doi.org/10.30972/eitt.503767>
- Sánchez, E., Eimer, G., Ferrero, G., & Dias, J. (2019). Síntesis y Caracterización de Catalizadores Sólidos Ácido-alcalinos para la Producción de Biodiesel. *AJEA*, 4. <https://doi.org/10.33414/ajea.4.391.2019>
- Sanli, H., Alptekin, E., & Canakci, M. (2018). Production of Fuel Quality Ethyl Ester Biodiesel: 1. Laboratory-Scale Optimization of Waste Frying Oil Ethanolysis, 2. Pilot-Scale Production with the Optimal Reaction Conditions. *Waste and Biomass Valorization*, 10(7), 1889–1898. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0195-z>
- Sarno, M., & Iuliano, M. (2019). Biodiesel production from waste cooking oil. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 828–836. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0053>
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., & Pandey, L. M. (2018). Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.05.002>
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. (2020). A comprehensive review of physicochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock: *Jatropha curcas*. *Fuel*, 285, 119110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119110>

- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., Kumar Sharma, P., & Jhalani, A. (2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*, 262, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>
- Ullah, Z., Bustam, M. A., & Man, Z. (2015). Biodiesel production from waste cooking oil by acidic ionic liquid as a catalyst. *Renewable Energy*, 77, 521–526. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.040>

