

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.2034>

Análisis económico del proceso de producción de biodiesel por medio de mezclas de aceites vegetales

Economic Analysis of Biodiesel Production Using Vegetable Oil Blends

Daniel Álvarez Barrera

daniab29@hotmail.com

Universidad politécnica de Santa Rosa Jáuregui
Querétaro, México

Jorge Bello Cantú

Facultad de ciencias Físico-Matemáticas, BUAP
Puebla, México

Artículo recibido: 18 enero 2026-Aceptado para publicación: 20 febrero 2026

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

El presente estudio centra su atención en la evaluación económica del proceso de producción de biodiesel por medio de mezclas de aceites vegetales. Se simuló el proceso productivo por medio del software SuperPro Designer utilizando aceite de palma africana sola y en mezcla con aceites de girasol y colza, con la finalidad de estudiar la influencia que tiene la concentración de los diferentes ácidos grasos (saturados e insaturados) en la evaluación de costos del sistema. Los resultados muestran que la adición de aceite de colza al proceso guarda una tasa de retorno que oscila al de la palma sola (22.41%), mientras que el aceite de girasol decremента el valor de esta variable de proceso en un 44% al agregarse al aceite de palma.

Palabras Claves: Biodiesel, Evaluación económica, Aceites vegetales, Simulación de procesos, Tasa de retorno

ABSTRACT

This study focuses on the economic evaluation of biodiesel production using vegetable oil blends. The production process was simulated using SuperPro Designer software with African palm oil alone and in blends with sunflower and rapeseed oils, in order to study the influence of the concentration of different fatty acids (saturated and unsaturated) on the system's cost evaluation. The results show that adding rapeseed oil to the process yields a rate of return similar to that of palm oil alone (22.41%), while adding sunflower oil to palm oil decreases this process variable by 44%.

Keywords: Biodiesel, Economic evaluation, Vegetable oils, Process simulation, Rate of return

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un biocombustible producido generalmente por transesterificación de aceites vegetales o grasas residuales con alcoholes de cadena corta (metanol o etanol), catalizada por ácidos, bases o enzimas. Su uso se da como consecuencia de objetivos de descarbonización del transporte, seguridad energética y valorización de residuos. La simulación de procesos ofrece una forma de integrar fenómenos de reacción, separación y utilidades, permitiendo estudiar la factibilidad técnica y económica antes de la construcción de plantas piloto o industriales (Ma & Hanna, 1999; Gerpen, 2005). Por otro lado, el análisis tecnoeconómico proporciona balances de materia y energía con modelos de costos de capital y operativos, sensibilidades y evaluación de riesgos (Turton et al., 2018; Sinnott & Towler, 2020, Arias-Tapia & Valarezo, 2023).

El biodiésel se define como una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos (FAME) que obedece a normas internacionales como EN 14214 y ASTM D6751. Se obtiene por transesterificación de triglicéridos con alcohol en presencia de catalizador, generando FAME y glicerol como subproducto. Algunas materias primas para la producción de este biocombustible incluyen aceites comestibles (soya, canola), no comestibles (jatropha, camelina) y aceites/grasa residuales, cuyos costos y disponibilidad influyen en gran medida en la viabilidad del proyecto (Gui, Lee, & Bhatia, 2008; Banković-Ilić, Stamenković, & Veljković, 2014).

La simulación rigurosa del proceso productivo de biodiesel conlleva modelos termodinámicos, cinéticos y de separación para predecir conversiones, composiciones y requerimientos energéticos. En plataformas como Aspen Plus/HYSYS o ChemCAD se representan las etapas principales: pretratamiento, transesterificación, separación de fases, purificación de fases, recuperación de metanol y tratamiento de glicerol (West, Posarac, & Ellis, 2008; Marchetti & Errazu, 2008). La correcta elección del modelo termodinámico es crítica para la determinación de la viabilidad técnica de este proceso. Para alcoholes ligeros y triglicéridos se suelen emplear NRTL o UNIQUAC con parámetros ajustados; para vapores se utiliza de manera frecuente SRK o Peng–Robinson (Soares et al., 2008; Nouredini & Zhu, 1997). Los modelos cinéticos utilizados en la simulación varían desde pseudo-homogéneos de primer orden hasta mecanismos Eley–Rideal o Langmuir–Hinshelwood para catálisis heterogénea (Leung, Wu, & Leung, 2010; Lam, Lee, & Mohamed, 2010). La validación del modelo más adecuado se realiza comparando conversiones y selectividades con datos experimentales y ejecutando análisis de sensibilidad sobre relaciones molares alcohol:aceite, carga de catalizador, temperatura y tiempo de residencia (Álvarez et al, 2021).

El análisis técnico considera el tipo de proceso, materia prima, condiciones de operación y esquema de purificación. En transesterificación con catálisis homogénea con NaOH/KOH, conversiones >98% son factibles con relaciones metanol:aceite de 6:1–9:1, 0.5–1.0% p/p de catalizador y 50–65 °C, siempre y cuando el contenido de agua y ácidos grasos libres (AGL) sea

bajo (Freedman, Butterfield, & Pryde, 1984; Ma & Hanna, 1999). Para aceites con alto contenido de ácidos grasos libres (AGL), se realiza esterificación ácida previa o se consideran catalizadores heterogéneos o enzimáticos resistentes a AGL (Atadashi et al., 2012; Meher, Vidya Sagar, & Naik, 2006). Las operaciones unitarias del proceso incluyen decantación, centrifugación, lavado y secado; la recuperación de metanol mediante destilación/flash es necesaria para asegurar tanto la economía como la calidad del producto (West et al., 2008). La intensificación —reactores de flujo pistón, microreactores, ultrasonido o reactores con membrana— permiten reducir tiempos de reacción y consumo energético a cambio de complejidad y CAPEX adicional (Stankiewicz & Moulijn, 2000; Kralova & Sjöblom, 2010).

La catálisis básica homogénea es ampliamente usada por su alta conversión y bajo costo, pero requieren aceites con bajos niveles de AGL y generan corrientes de lavado (Ma & Hanna, 1999; Lam et al., 2010). Los ácidos homogéneos permiten esterificar AGL altos, aunque son más lentos para transesterificación (Leung et al., 2010). Los catalizadores heterogéneos facilitan la separación y reutilización, con menor efluente, pero pueden sufrir desactivación por agua/AGL y difusión limitada (Marchetti & Errazu, 2008; Banković-Ilić et al., 2014). Las lipasas inmovilizadas permiten llevar el proceso reactivo a baja temperatura, con alta selectividad y tolerancia a AGL, aunque su costo y vida útil son críticos (Fukuda, Kondo, & Noda, 2001; Shah, Gupta, & Sharma, 2007). Tendencias emergentes incluyen catalizadores bifuncionales ácido-base y materiales mesoporosos que combinan esterificación y transesterificación en una sola etapa (Atadashi et al., 2012; Lam et al., 2010).

El análisis económico inicia dimensionando los resultados de simulación (equipos de reacción, separación y utilidades) para estimar el costo de capital fijo (FCI) mediante factores de Lang o enfoques basados en costos por módulo (Turton et al., 2018; Sinnott & Towler, 2020). Los costos operativos (OPEX) se dividen principalmente en materia prima, utilidades, catalizadores/consumibles, mano de obra, mantenimiento y disposición de efluentes (Marchetti, Miguel, & Errazu, 2008; Haas et al., 2006). Las principales variables de proceso incluyen costo mínimo de producción (USD/L), valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de recuperación (Patterson et al., 2006; West et al., 2008). La optimización energética y la valorización del glicerol impactan significativamente en la economía (Turton et al., 2018; Johnson & Taconi, 2007).

Los análisis de ciclo de vida (ACV) muestran que el uso de aceites residuales puede reducir en manera importante las emisiones de GEI frente al diésel fósil, siempre y cuando se controlen consumos de metanol, energía y tratamientos de efluentes (Pradhan et al., 2011; Hoekman et al., 2012). El cumplimiento de las normas internacionales (EN 14214/ASTM D6751) conlleva controlar contenido de metales, mono/di/triglicéridos, glicerina libre/total, agua y estabilidad oxidativa, lo que debe modelarse de manera indirecta en la simulación a través de especificaciones de pureza y operaciones de pulido (Knothe, 2005; Gerpen, 2005).

METODOLOGÍA

La simulación del proceso de producción de biodiesel se realizó por medio del software SuperPro Designer utilizando como materia prima aceite de palma africana sola y en combinación con aceites de girasol y canola.

La composición utilizada del aceite de palma africana sola y en mezcla con otras materias primas, así como la cinética de transesterificación de los ácidos grasos contenidos en ellas para su paso a la formación de biodiesel y jabones fue tomada de la literatura y se reporta en las tablas 1 y 2 (Álvarez et al, 2021; Álvarez & Bello, 2026; Álvarez & Bello, 2026).

Tabla 1

Composición de las mezclas de aceites estudiados para simulación

Ácido graso	Composición %		
	Aceite de palma	Mezcla Palma / girasol	Mezcla palma/colza
Láurico	0.44	0.26	0.26
Mirístico	2.33	1.40	1.40
Palmítico	41.53	31.69	26.85
Estearico	4.74	32.29	3.22
Oleico	38.22	24.24	47.54
Linoleico	12.59	10.15	16.94
Linolénico	0.15	0.09	3.18

Tabla 2

Parámetros cinéticos de la transesterificación de mezclas analizadas para simulación

Reacción	Palma africana		Mezcla palma/girasol		Mezcla palma/colza	
	Ea [=] KJ/mol	A	Ea [=] KJ/mol	A	Ea [=] KJ/mol	A
Biodiesel Directa	238.33	6.50 E 35	256.70	1.27 E 42	255.70	1.04 E 40
Biodiesel Inversa	196.32	1.99 E 29	223.93	9.16 E 35	212.30	9.65 E 31
Jabones Directa	289.49	1.88 E 46	303.29	3.68 E 50	312.27	1.62 E 50
Jabones Inversa	153.29	3.14 E 22	194.71	4.30 E 30	150.40	6.61 E 21

De la misma forma, el proceso simulado se dividió en 2 partes para su mejor comprensión, mismas que son mostradas en las figuras 1 y 2.

Figura 1

Esquematzación del proceso de extracción y refinación de los aceites estudiados de palma africana, girasol y canola. Reproducido de Álvarez & Bello (2026)

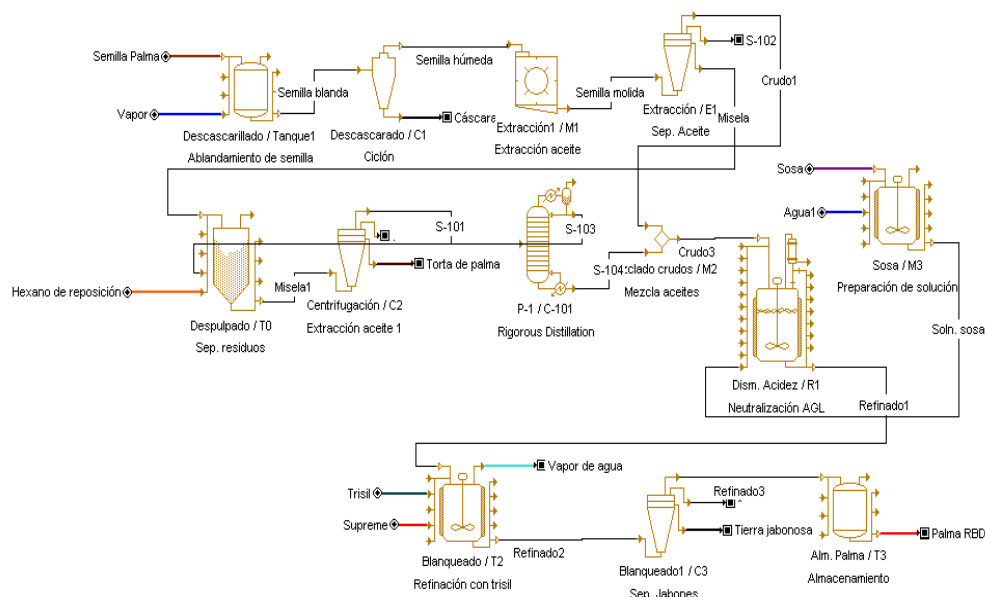
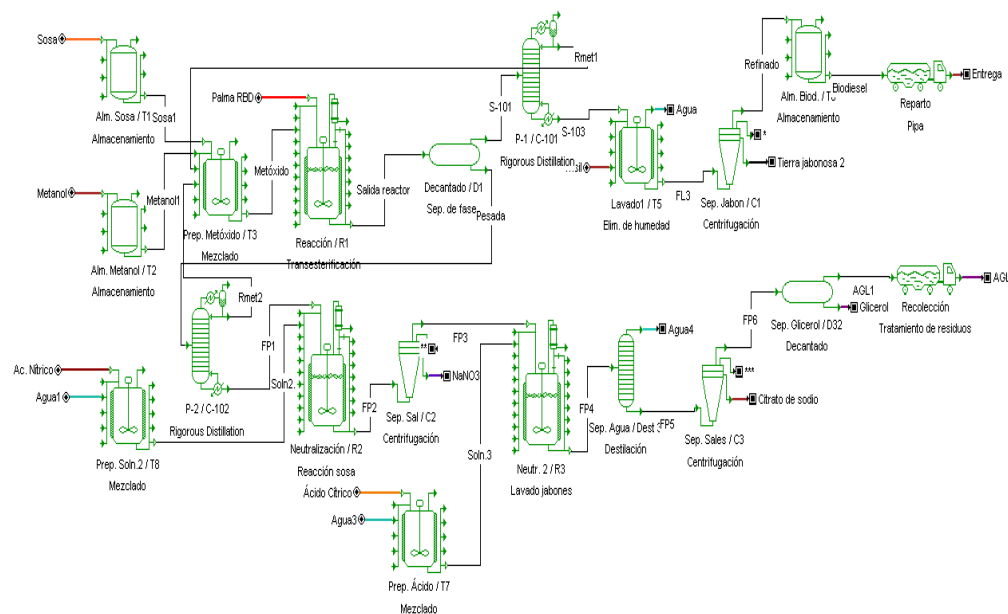


Figura 2

Esquematzación del proceso de transesterificación de aceites vegetales y refinación de las fases obtenidas en el reactor. Reproducido de Álvarez & Bello (2026)



El proceso de extracción de aceites comienza con la molienda de la semilla, seguido de la separación del bagazo y aceites por centrifugación. Posteriormente el bagazo es sometido a lixiviación con hexano, que es separado y recirculado. El aceite obtenido es refinado mediante una sílica (que luego es separada y recirculada también) para dejar un aceite con bajo nivel de ácidos grasos libres.

La segunda parte del proceso obtiene el aceite refinado de la sección anterior y lo pone a reaccionar con metóxido (previamente preparado). El producto de reacción se separa mediante

decantación y cada una de las fases se refina a fin de obtener el biodiesel como producto principal y el glicerol como subproducto del proceso.

Las relaciones utilizadas de aceites de girasol y canola en las mezclas estudiadas fueron producto de la optimización de materias primas disponibles en México (Santibañez et al, 2011), mientras que los costos de materias primas y consumibles del proceso se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Precios de materia prima utilizados en el comparativo de alternativas

Materia prima	Precio (USD)
Metanol (l ⁻¹)	0.65
Hidróxido de sodio grado industrial (Kg ⁻¹)	1.12
Ácido nítrico (l ⁻¹)	0.56
Nitrato de sodio (Kg ⁻¹)	2.48
Glicerol (l ⁻¹)	1.79
Biodiésel (l ⁻¹)	1.02
Semilla de Girasol (Kg ⁻¹)	0.41
Semilla de Palma Africana (Kg ⁻¹)	0.13
Semilla de Colza (Kg ⁻¹)	0.41
Torta de Girasol (Kg ⁻¹)	0.20
Torta de Palma (Kg ⁻¹)	0.15
Torta de Colza (Kg ⁻¹)	0.18
Ácido cítrico (Kg ⁻¹)	2.98
Citrato de sodio (Kg ⁻¹)	3.07
Hexano (l ⁻¹)	1.57
Tierra Blanqueadora (Kg ⁻¹)	0.50
Sílica (Kg ⁻¹)	2.48

De la misma forma, los costos relacionados a la mano de obra de proceso son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4

Puestos y salarios base tomados en cuenta para el análisis de costo de mano de obra de los procesos simulados en SPD

Puesto	Salario (USD / h)
Obrero	1.45
Supervisor	3.50
Gerente	9.54
Analista químico	2.80

RESULTADOS

De acuerdo con las simulaciones realizadas y con los costos mencionados, las variables económicas obtenidas de los reportes generados por SuperPro Designer para la producción de biodiesel por medio de aceite de palma africana refinada sola, así como su mezcla con aceites de colza y girasol se muestran en la tabla 5.

Tabla 5*Variables económicas de los procesos simulados en SPD*

Materia prima	ROI [=] %	PT [=] años	PUC [=] USD
Palma africana	22.41	4.46	0.95
Mezcla Palma - Girasol	12.63	7.92	1.19
Mezcla Palma - Colza	21.75	4.60	0.99

Estos resultados coinciden con lo reportado por Yusuf & Inambao (2023), donde se expone el impacto del costo de materia prima frente a las fluctuaciones del mercado global.

Es posible observar que el proceso simulado utilizando solo palma africana exhibe una ROI promedio superior a la de 20%, normalmente utilizada como estándar para la aceptación de proyectos de inversión, mientras que, al adicionar colza a esta materia prima, el resultado de la concentración de ácidos grasos contenidos en la mezcla decremanta en un 0.66% la ROI del proceso. Sin embargo, este valor sigue representando una alternativa viable desde el punto de vista financiero como alternativa de inversión.

Contrario a lo anterior, la adición del aceite de girasol a la mezcla tiene un impacto mucho mayor en la economía del proceso, aunque de manera negativa, decrementando el valor de la ROI en casi 10%, lo que se puede atribuir en parte a la cinética química del sistema. Como es posible observar en la tabla 2, la cinética de la transesterificación en este caso se ve afectada, favoreciendo la formación de jabones, lo que impacta de manera directa en las operaciones unitarias posteriores al proceso reactivo aumentando el tamaño de los equipos, así como los requerimientos energéticos de cada uno de ellos y sus condiciones de operación.

A fin de determinar el impacto del contenido de ácidos grasos en la etapa reactiva del proceso, la tabla 6 muestra el cambio en la concentración de cada uno de estos componentes con respecto a la composición química reportada para el aceite de palma africana solo.

Tabla 6*Cambios en las composiciones de ácidos grasos de la materia prima utilizada para el proceso de producción de biodiesel simulado*

Ácido graso	Palma %	Modificación mezcla Palma-Girasol %	Modificación mezcla Palma-colza %
Láurico	0.44	40.00 decremento	40 decremento
Mirístico	2.33	40.00 decremento	40 decremento
Palmítico	41.53	23.70 decremento	35.3 decremento
Estearico	4.74	581.20 incremento	32.15 decremento
Oleico	38.22	36.50 decremento	19.6 incremento
Linoleico	12.79	20.60 decremento	24.52 incremento
Linolénico	0.15	40.00 decremento	2021 incremento

Es posible observar que el decremento en los ácidos grasos saturados de la mezcla al agregar el aceite de girasol al de palma tiene una influencia directa sobre las variables económicas del proceso, afectando de manera negativa los valores obtenidos, mientras el incremento en los ácidos insaturados de la mezcla palma-colza no genera el mismo impacto que su contraparte. Esto coincide con la información reportada por Kishore & Rajasekar (2024).

De la misma forma, se puede atribuir el cambio en las variables económicas del proceso al contenido de aceite obtenido de cada materia prima, ya que la colza presenta un porcentaje masa de aceite de 50.33% con respecto a la semilla, mientras que el girasol baja el valor de esta variable al 40.11% (Alvarez & Bello, 2026).

Respecto al precio de venta del producto, considerando un incremento del 20% sobre el costo de producción de la mezcla palma girasol, que es el proceso menos rentable de los 3 comparados, el valor obtenido de esta variable es incluso inferior al precio de venta actual de su contraparte fósil en México (alrededor de 1.56 dólares por litro), lo que confirma la viabilidad económica y de mercado de los otros 2 procesos estudiados.

CONCLUSIONES

El análisis mostrado de las simulaciones del proceso de producción de biodiesel por medio de mezclas de aceites vegetales realizadas en SuperPro Designer, muestran que la adición de un aceite vegetal a otro ya refinado afecta de manera significativa las variables económicas del sistema. Mientras que la composición es un factor importante para considerar, el costo de la materia prima también juega un rol esencial en el estudio financiero. Se muestra que la adición de aceite de colza mantiene una tasa de retorno del proceso equiparable al de palma sola, mientras que el aceite de girasol impacta de manera negativa la economía de este.

La viabilidad económica obtenida de los sistemas productivos basados en palma y palma/colza, incluso frente a su contraparte fósil, sugiere que estos procesos pueden ser integrados en los ámbitos energético y logístico, aumentando aun más sus variables analizadas (ROI, PUC y PT).

De la misma forma, este trabajo resalta la importancia de considerar el impacto de la cinética de reacción en el diseño de las operaciones unitarias posteriores, lo que abre la posibilidad de realizar la intensificación del proceso analizado en estudios consecuentes.

Desde el punto de vista teórico, este trabajo aporta evidencia sobre la relación entre la composición de ácidos grasos, la cinética general y la economía del proceso productivo. Esto sugiere que la viabilidad económica no se debe abordar de manera aislada de los fenómenos físicoquímicos. Sin embargo, este trabajo abre la posibilidad de explorar el rol de la cinética particular de cada ácido graso en el proceso global.

Estos resultados refuerzan la idea de que el análisis tecno-económico es necesario como base para la construcción de biorrefinerías más eficientes (Tiwari & Kumar, 2025)

REFERENCIAS

- Álvarez, D., & Bello, J. (In press, 2026). Kinetic study and simulation of the biodiesel production process using a mixture of palm and rapeseed oils. *Arandu UTIC Revista Científica Internacional*, 13(1).
- Alvarez, D. & Bello, J. (2026). Análisis del proceso de producción de biodiésel a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y aceite de girasol: Modelado cinético y simulación. *IberoCiencias*, 5(1). <https://doi.org/10.63371/ic.v5.n1.a645>
- Alvarez, D., Chávez, M. & Castro, A. (2021). Kinetic study of methanolysis of African palm oil (*Elaeis guineensis*) for biodiesel production. *Latin American Journal of Development*, 3(5), 3217–3229.
- Arias-Tapia, M., & Valarezo, R. (2023). Tecno-economic and environmental assessment of biodiesel production from waste cooking oil using SuperPro Designer. *Cleaner Engineering and Technology*, 14, 100641.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 337–350.
- Banković-Ilić, I. B., Stamenković, O. S., & Veljković, V. B. (2014). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3621–3647.
- Freedman, B., Butterfield, R. O., & Pryde, E. H. (1984). Transesterification kinetics of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61(10), 1638–1643.
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416.
- Gerpen, J. V. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107.
- Gui, M. M., Lee, K. T., & Bhatia, S. (2008). Feasibility of edible and non-edible feedstocks for biodiesel. *Energy*, 33(11), 1646–1653.
- Haas, M. J., McAloon, A. J., Yee, W. C., & Foglia, T. A. (2006). A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology*, 97(4), 671–678.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169.
- Johnson, D. T., & Taconi, K. A. (2007). The glycerin glut: Options for disposal/utilization of crude glycerol. *Environmental Progress*, 26(4), 338–348.
- Kishore, K., & Rajasekar, R. (2024). Impact of fatty acid composition on the physicochemical properties and economic viability of vegetable oil-based biodiesels. *Fuel Communications*, 18, 100102.

- Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059–1070.
- Kralova, I., & Sjöblom, J. (2010). Biofuels—Renewable energy sources: A review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31(3), 409–425.
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification. *Biotechnology Advances*, 28(4), 500–518.
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095.
- Marchetti, J. M., Miguel, V. U., & Errazu, A. F. (2008). Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 89(8), 740–748.
- Marchetti, J. M., & Errazu, A. (2008). Comparison of different heterogeneous catalysts and homogeneous catalysts in biodiesel production. *Fuel*, 87(10–11), 3477–3480.
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248–268.
- Noureddini, H., & Zhu, D. (1997). Kinetics of transesterification of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(11), 1457–1463.
- Pradhan, A., Shrestha, D. S., McAloon, A., Yee, W., Haas, M., & Duffield, J. A. (2011). Energy life-cycle assessment of soybean biodiesel. *Bioresource Technology*, 102(10), 6617–6625.
- Santibáñez J., Gonzalez J., Ponce J., Serna M. y Halwagi M. (2011), “Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50: 8558-8570
- Sinnott, R. K., & Towler, G. (2020). *Chemical Engineering Design* (6th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Tiwari, A., & Kumar, S. (2025). Future trends in biodiesel production: Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment. *Renewable Energy Focus*, 52, 100589.
- West, A. H., Posarac, D., & Ellis, N. (2008). Assessment of four biodiesel production processes. *Applied Thermal Engineering*, 28(17–18), 1972–1983.
- Yusuf, A. A., & Inambao, F. L. (2023). Technical and economic analysis of biodiesel production from palm oil and its blends: A simulation-based approach. *International Journal of Energy Research*, 47(2), 1145-1162.