

Carbón activado de bagazo de caña como soporte de catalizadores para la obtención de biodiésel

María Guadalupe Hernández Cruz; Alida Elizabeth Cruz Pérez; José Armando Olmos López; Ma. Guadalupe Rivera Ruedas; Lorena González Díaz

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la actividad del carbón activado como soporte de catalizadores para la producción de biodiesel. Se sintetizaron carbones activados a partir del bagazo de caña, se activaron con HNO_3 y se calcinaron a 550 °C y 650 °C; posteriormente se impregnaron con un contenido de 15 y 3 % p/p de Mo y Ni, respectivamente. Los materiales sintetizados se caracterizaron mediante fisisorción de N_2 , difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Asimismo, la evaluación catalítica se realizó en la transesterificación del aceite de palma en presencia de metanol a 60 °C con diferentes tiempos de reacción. Luego, las muestras de biodiesel obtenido se caracterizaron fisicoquímicamente. Los resultados mostraron una baja dispersión de los metales en el soporte, lo que originó pocos sitios activos catalíticos, debido principalmente a la baja área superficial de los carbones activados, lo cual disminuyó la actividad de los materiales y condujo a un bajo rendimiento, que fue significativamente menor que los reportados en la literatura. Sin embargo, este puede mejorar al aumentar el contenido de catalizador y mediante la optimización de las condiciones de reacción, con lo que también se podría mejorar considerablemente la calidad del biodiesel obtenido.

Palabras clave: carbón activado, bagazo de caña, biodiesel, catalizadores.

Cómo citar: Hernández, M., Cruz, A., Olmos, J., Rivera, M., González, L. (2026). Carbón activado de bagazo de caña como soporte de catalizadores para la obtención de biodiésel. En Peña Guzmán, C. *Mujeres y su impacto en la ciencia y tecnología latinoamericana*. High Rate Consulting. <https://doi.org/10.38202/mujeresimpacto12>

Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon as a Catalyst Support for Biodiesel Production

ABSTRACT

In this work, the activity of activated carbon as a catalyst support for biodiesel production was evaluated. Activated carbons were synthesized from sugarcane bagasse, activated with HNO_3 , and calcined at 550 °C and 650 °C; subsequently, they were impregnated with 15 and 3 wt % of Mo and Ni, respectively. The synthesized materials were characterized by N_2 physisorption, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. The catalytic evaluation was carried out in the transesterification of palm oil in the presence of methanol at 60 °C with different reaction times; subsequently, the obtained biodiesel samples were physicochemically characterized. The results showed low metal dispersion on the support, which led to few active catalytic sites, mainly due to the low surface area of the activated carbons. This decreased the activity of the materials and resulted in low yield, which was significantly lower than those reported in the literature. However, this can be improved by increasing the catalyst content and optimizing the reaction conditions, which could also considerably enhance the quality of the obtained biodiesel.

Keywords: activated carbon, sugarcane bagasse, biodiesel, catalysts.

INTRODUCCIÓN

El reemplazo de combustibles fósiles es un tema de suma importancia a nivel global, dadas las actuales repercusiones ambientales, económicas y políticas que se presentan como consecuencias de su uso desmedido durante décadas (Catalán, 2021). Por lo que, con la finalidad de reducir la dependencia del petróleo y sus derivados, se ha optado por la generación de energías renovables, entre ellas, la utilización de combustibles sostenibles como el biodiesel.

La producción de biodiesel se produce mediante un proceso de transesterificación, que es la reacción de un aceite con un alcohol (metanol o etanol) (Baskar et al., 2018), en presencia o no de un catalizador. En este proceso, los triglicéridos de la materia prima se transforman en ésteres alquilo y glicerol como subproducto (Bardhan et al., 2021; Vilas Bôas & Mendes, 2022) y, por lo general, se requiere de un catalizador heterogéneo que permita con facilidad la separación del catalizador del biodiesel y la eliminación de desechos (Maleki et al., 2022; Nasreen et al., 2018). Por su bajo precio, los metales como cobalto, molibdeno, hierro y níquel pueden ser usados como fase activa en catalizadores alternativos (Hongloi et al., 2019), aunque también pueden usarse precursores de precio más elevado como es el caso del tungsteno, platino, paladio y rutenio (Kumar et al., 2019). Dado que la combinación de Mo o W y Co o Ni en los catalizadores aumenta la actividad catalítica, se han hecho diversas investigaciones para la obtención de biodiesel usando fases activas como NiW, NiMo, NiMoW con diversos soportes, como Zr-SBA-15, alúmina (Al_2O_3), así como el carbón

activado, atractivo por su superficie inerte y por el diámetro y distribución de sus poros (Balboa Palomino, 2018; Iwanow et al., 2020; Vázquez-Garrido et al., 2021).

Las materias primas para la producción de biodiesel pueden ser fuentes vegetales comestibles, como los aceites de soja, cacahuate, girasol, aceituna, linaza, palma, coco, maní, salvado de arroz, o fuentes vegetales no comestibles, como los aceites de colza, jatropha, jojoba, tabaco, ricino, de semilla de albaricoque, aceite de pescado, la moringa olifera, el dáttil del desierto, aceite de cocina usado, en el caso de biodiesel de primera generación (Alalwan et al., 2019; Elgharbawy et al., 2021; Rizwanul Fattah et al., 2020; Singh et al., 2021). Además de metanol, también pueden ser usados etanol, butanol, isopropanol y otros alcoholes, aunque generalmente se usan los dos primeros debido a su bajo costo.

El biodiesel de segunda generación puede usarse como materia prima para cultivos energéticos, al igual que el de primera generación, restos agrícolas, residuos de madera y grasas animales. El principal problema con este tipo de biodiesel es que aún no se han encontrado tecnologías para el aprovechamiento de los residuos de su producción. El biodiesel de tercera generación se genera con base en microalgas autótrofas y heterótrofas, con un rendimiento diferente dependiendo de la naturaleza de la microalga elegida (Alalwan et al., 2019). Las características fisicoquímicas del biodiesel son determinadas, principalmente, por los ésteres metílicos de ácidos grasos con respecto a su proporción, longitud de cadena de carbonos y grado de

insaturación (Freire Ordóñez & Medrano Barboza, 2019).

El aceite de palma se deriva de las palmas de aceite, científicamente conocidas como *Elaeis guineensis* (Mahlia et al., 2019). En México, se cultiva principalmente en la región del sureste y se prevé que para el 2030 se alcance la producción de 1.14 millones de toneladas por año (SAGARPA, 2017). Este aceite posee una gran resistencia a la oxidación y soporta la exposición a altas temperaturas durante un tiempo considerablemente largo. Contiene los ácidos: palmítico, oleico monoinsaturado, linoleico poliinsaturado y esteárico, así como fracciones de otros ácidos grasos. Este es usado en diversos productos industriales como son mantequillas, mantecas, panificación, helados, detergentes, pinturas, cosméticos, lubricantes, biodiesel, etc. (Gesteiro et al., 2018).

Se puede definir al carbón activado (CA) como un carbón caracterizado por su capacidad de adsorción por sus pequeños poros. Puede ser obtenido de diversas fuentes, como los residuos de agricultura: paja, cáscara de arroz, bagazo, bambú, residuos de algodón, cáscaras de nuez, huesos de fruta, cáscaras de coco, residuos de café, mazorcas de maíz, residuos de palma aceitera, entre otros. Es una opción conveniente como soporte de catalizadores metálicos por su superficie inerte, en especial en condiciones ácidas y básicas elevadas; su distribución de tamaño de poro (micro y mesoporos) y las propiedades químicas en su superficie pueden ajustarse dependiendo de la aplicación a la que se destine. Además, presenta resistencia a la formación de coque, que es uno de los principales agentes que desactivan a los catalizadores (Iwanow et al., 2020; Robles et al., 2006).

Asimismo, existen diferentes trabajos sobre el uso del carbón activado como soporte de catalizadores para la producción de biodiesel; uno de ellos es el realizado por Ruangdomsakul et al., en el que obtuvieron carbón activado a partir de madera de plomo por horno Iwasaki. Los carbones activados obtenidos se impregnaron Ni_2P ; los autores observaron altos rendimientos en la producción de biodiesel por hidrodeseoxigenación (2021).

Por otro lado, Tapia y colaboradores usaron catalizadores NiMo soportados en carbón activado comercial para la producción de biodiesel a través de hidrotratamiento de aceite de *jatropha*; dicho catalizador mostró un rendimiento similar al de los catalizadores soportados en alúmina en la producción de biodiesel por hidrodeseoxigenación (Tapia et al., 2017). También se han utilizado CA provenientes de cáscaras de cacao (Younis Al-Ani et al., 2026), de coco (Babatunde et al., 2025), de banana (Saikia et al., 2024), además de semillas de aguacate (Akream et al., 2024), e incluso hojas de guayaba (Das et al., 2024) y de palma (Younis Al-Ani et al., 2026). Los residuos de café (Tian et al., 2021) y el bagazo de malta (Ali et al., 2024) también son aprovechados para su producción. Estos CA se han empleado por sí solos como catalizadores (Babatunde et al., 2025), funcionalizados (Ali et al., 2024; Das et al., 2024; Naji & Tye, 2022; Tian et al., 2021; Younis Al-Ani et al., 2026) o bien con alguna fase activa soportada como el K_2CO_3 o el ZrO_2 (Akream et al., 2024; Younis Al-Ani et al., 2026).

El bagazo de caña es un residuo fibroso que se genera en grandes cantidades en la industria azucarera; se obtienen, aproximadamente, 136 kg por cada tonelada de caña que es procesada y, considerando que en México se procesan al año 56 300 000 toneladas de caña (Solís-Fuentes et al., 2019), su reutilización en diferentes procesos resulta prometedora. Existen trabajos que reportan el uso del CA obtenido a partir del bagazo de caña en remoción de fármacos (Abo El Naga et al., 2019), compuestos aromáticos (Greish et al., 2021), metales pesados (Nguyen et al., 2025) y nitratos (Khademi et al., 2018) de medios acuosos; en la adsorción de H_2S (Greish et al., 2022) y en la clarificación de algunos licores (Solís-Fuentes et al., 2019). Acá se propone su uso como soporte para catalizador para la producción de biodiesel por medio de la transesterificación del aceite de palma.

El objetivo de este trabajo es, en una primera aproximación, evaluar el uso del carbón activado de bagazo de caña como soporte de catalizadores para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma, con la finalidad de contribuir al desarrollo sostenible, dando valor agregado a los desechos de la industria azucarera y también aprovechar la producción del aceite de palma del país. De esta manera, se podría beneficiar directamente a la fuerza laboral de estos sectores, del cual el 20 % está constituido por mujeres (Instituto Nacional de las Mujeres, 2024). De igual modo, a través del desarrollo de proyectos de investigación, se busca fomentar las vocaciones científicas STEM en las estudiantes y fortalecer las líneas de investigación de las profesoras-investigadoras que integran el grupo de investigación.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El soporte empleado fue carbón activado proveniente de bagazo de caña, este se sintetizó por el método de activación química con HNO_3 3.5 M durante 24 horas y posteriormente por pirólisis a 550 y 650 °C, los carbones activados se nombraron CA1 y CA2, respectivamente.

Los carbones activados se impregnaron con soluciones acuosas de heptamolibdato de amonio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{41}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (J.T. Baker, 81 %) y nitrato de níquel [$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$] (Sigma-Aldrich, ≥ 97 %). Estos se prepararon por el método de coimpregnación húmeda con un contenido de 15 % p/p de Mo y tomando en cuenta una relación molar Ni/(Ni+Mo)=0.3, aproximadamente el 3 % p/p. Los sólidos obtenidos se secaron a 120 °C durante 12 horas y se calcinaron a 400 °C durante 4 horas. En la Tabla 1 se muestra la nomenclatura que se empleó para identificar a los catalizadores sintetizados.

La caracterización fisicoquímica de los materiales se realizó por medio de las técnicas de difracción de rayos X en un equipo Bruker modelo D8 Advance; fisisorción de N_2 en un equipo AUTOSORB-iQ-XR-2 y microscopía electrónica de barrido en un equipo FEI Quanta 250 FEG.

La reacción se llevó a cabo con las siguientes condiciones: se emplearon metanol (Meyer, ≥ 99.8 %) y aceite de palma crudo (Abreiko, grado cosmético) en la mezcla de reacción

Tabla 1.

Nomenclatura de los materiales sintetizados

CATALIZADOR	Contenido de Mo% p/p	Contenido de Ni% p/p
Mo/CA1	15	-
Mo/CA2	15	-
NiMo/CA1	15	3
NiMo/CA2	15	3

con una relación 6:1 y el catalizador en una proporción de 0.5 % p/p con respecto a la cantidad de aceite. La mezcla se mantuvo a reflujo a 60 °C, 1 atm de presión, con tiempos de dos, tres y cuatro horas de reacción.

Posterior a la reacción, el producto se mantuvo en reposo durante 24 horas para la separación completa de las fases de biodiesel y glicerina. Subsecuentemente, el biodiesel obtenido se analizó por medio de cromatografía de gases.

La caracterización fisicoquímica del biodiesel se llevó a cabo mediante la evaluación de su densidad, viscosidad y poder calorífico. La densidad del biodiesel se midió en un densímetro Anton Paar DMA 4500 M; lasimismo, la medición de la viscosidad se hizo con un viscosímetro Anton Paar SVM 4001 y el poder calorífico del biodiesel se midió con el equipo de calorimetría marca KL, modelo LRY-900-1.

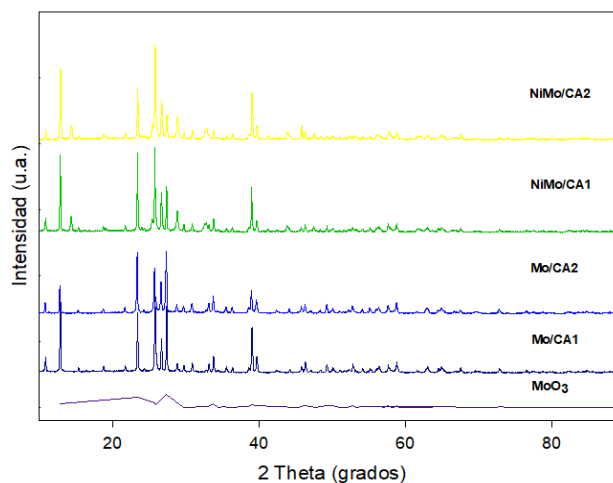
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Difracción de rayos X

La Figura 1 muestra los difractogramas de los catalizadores sintetizados; en todos se observan señales en $2\theta = 27.72^\circ$, 33.68° , 38.88° y 45.76° , y dos picos asimétricos en $2\theta = 13.58^\circ$ y 26.46° , los cuales corresponden a la presencia de carbono en forma de grafito (ICSD 75-0444) (Adinaveen et al., 2013). Esto demuestra que la estructura del soporte se mantiene durante el proceso de síntesis de los catalizadores.

También se observan señales en $2\theta = 23.20^\circ$, 27.15° , 45.76° y 57.58° , que se asocian con la presencia de MoO_3 en fase ortorrómbica (ICSD 01-089-7112); por otro lado, los picos en $2\theta = 26^\circ$ y 44° (002) y (100), respectivamente, indicaron la presencia de $\text{MoO}_3/\text{NiMoO}_4$; este no es un buen promotor y podría disminuir la actividad catalítica (Nath Prajapati & Verma, 2018).

Además se observa que los picos para cada uno de los cuatro catalizadores son fuertes y poco anchos en su mayoría, lo que indica un tamaño de partícula grande y una baja dispersión de los metales (Kohli et al., 2020). Esto puede conducir a un bloqueo significativo de los poros del soporte del carbón activado (Foroozandeh et al., 2023), de modo que la dispersión de los metales (Ni y Mo) y, por ende, la actividad catalítica se ven afectadas de modo negativo.

**Figura 1.**

Difractogramas de los catalizadores sintetizado.

Fisiorción de N_2

En la Tabla 2, con fines comparativos, se muestran las propiedades texturales de los carbones activados sintetizados en este trabajo, así como el de un carbón activado de bagazo de caña reportado en la literatura (Somyanonthanakun et al., 2023). Se puede observar que el área superficial de los carbones activados usados en este trabajo es inferior al área superficial del carbón activado reportado (Somyanonthanakun et al., 2023).

Tabla 2.

Propiedades texturales de los carbones activados CA1 y CA2 y del reportado en la literatura

SÓLIDO	ABET (m^2/g)	DIÁMETRO DE PORO (nm)	Volumen de poro (cm^3/g)
CA1	1.9×10^2	5.6	2.6×10^{-2}
CA2	3.0×10^2	4.7	7.4×10^{-2}
CA	$5.1 \times 10^2 - 6.7 \times 10^2$	4.2-5.4	$5.4 \times 10^{-2} - 9.2 \times 10^{-2}$

Nota. Elaboración de Somyanonthanakun et al., 2023.

Esto tiene su causa en las diferencias en la materia prima y al método de elaboración; sin embargo, los valores que se han obtenido en los carbones CA1 y CA2 indican que estos son adecuados para el funcionamiento como soportes de catalizadores heterogéneos en la producción de biodiesel por transesterificación de aceites. Por otro lado, de acuerdo con el diámetro de poro, los materiales están compuestos en su mayoría por mesoporos.

Las Figuras 2 y 3 muestran gráficos de las isotermas generadas por la fisiorción de N_2 del CA1 y CA2, respectivamente, en las que se muestran los volúmenes y presiones relativas en las que ocurrió la adsorción y desorción del nitrógeno en la superficie de los materiales.

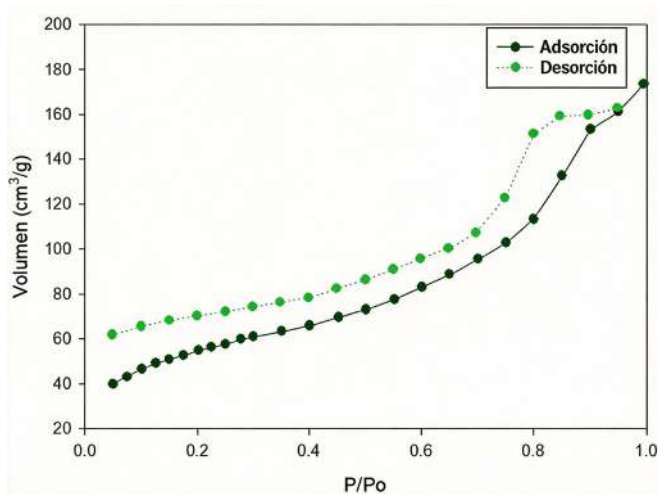


Figura 2. Isotherma de adsorción-desorción de N₂ del carbón activado CA1

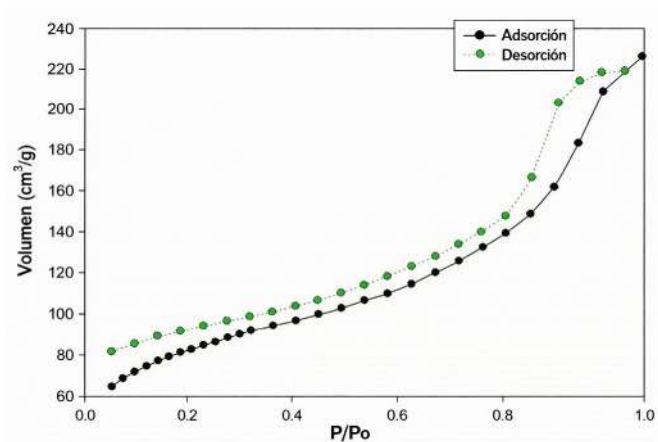


Figura 3. Isotherma de adsorción-desorción de N₂ del carbón activado CA2

En ambas se puede observar que la curva no cierra al final de la desorción, como sería idealmente; esto, probablemente, se debe a la presencia de una cantidad considerable de microporos con diámetros menores de 2 nm, lo cual dificulta su medición en ciertos equipos de fisisorción de N₂.

Asimismo, es posible advertir que, de acuerdo con la clasificación de las isothermas e histéresis dada por la IUPAC, ambas isothermas son tipo IV, con formas similares, característica de sólidos mesoporosos (cuyos diámetros de poro se encuentran entre 2 y 50 nm). El tipo de histéresis que presentan es del tipo H1, lo que indica una distribución de poros muy estrechos, probablemente espacios entre placas o partículas esferoidales con un tamaño y distribución aproximadamente uniformes (Cabello Mendoza, 2019). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Somyanonthanakun et al. (2023) para el carbón activado obtenido del bagazo de caña.

Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 4 se muestran las micrografías electrónicas de barrido de los catalizadores sintetizados. En general, los catalizadores mostraron morfologías similares, lo cual indica que los carbones activados son estables durante el proceso de la síntesis de los catalizadores, ya que no se modificaron significativamente sus características morfológicas.

La morfología de los CA se caracteriza por la presencia de fibras unidas por la acción de la hemicelulosa junto a la lignina (Adinaveen et al., 2013), que se observan en las micrografías; también se observan fibras alargadas, características del carbón activado de bagazo de caña (Adinaveen et al., 2013; Gonçalves et al., 2016).

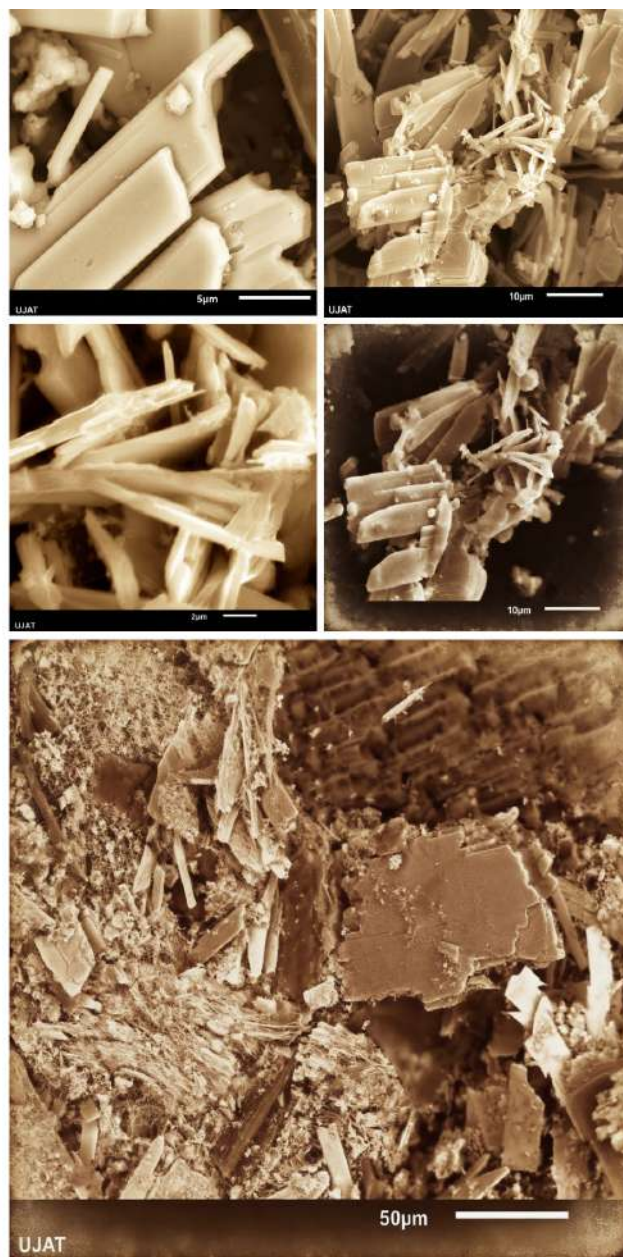


Figura 4. IMicrografías MEB representativas de los catalizadores sintetizados.

Asimismo, se visualiza una disposición amorfa de placas de carbono con espacios entre ellas; estos pueden ser los micro o mesoporos responsables de la baja área superficial obtenida.

La Figura 5 y la Tabla 3 muestran la composición en masa y molar porcentual promedio de Mo y Ni en cada uno de los catalizadores sintetizados; estos indican la presencia de Mo y Ni en la superficie de los catalizadores.

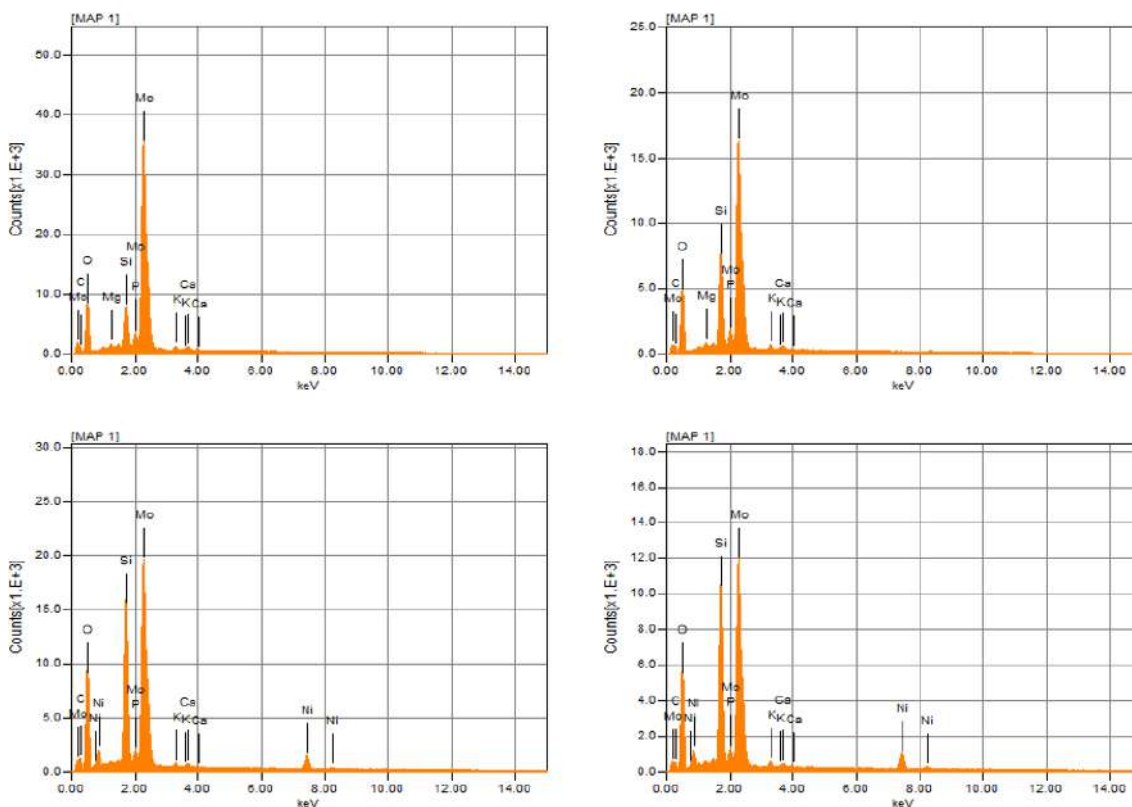


Figura 5. Espectros EDS del análisis elemental de los catalizadores sintetizados.

Tabla 3. Composición porcentual de Mo y Ni de los catalizadores sintetizados.

CATALIZADOR	Mo	Ni	Mo	Ni
	% mol			
Mo/CA1	53.476	-	17.14	-
Mo/CA2	49.813	-	15.146	-
NiMo/CA1	41270	6426	11.926	3.05
NiMo/CA2	43.423	6676	13.34	3.35

Nota. Elaboración de Somyanonthanakun et al., 2023.

Las micrografías representativas de los catalizadores Mo sintetizados se muestran en la Figura 6. Allí se puede observar la presencia no uniforme de Mo en la superficie; por lo que es probable que se encuentre acumulado en mayor cantidad en determinadas zonas, lo cual satura los poros y disminuye su actividad catalítica.

De igual forma, las micrografías de los catalizadores NiMo sintetizados, que se ilustran en la Figura 7, mostraron la presencia de Ni y Mo en la superficie. Puede apreciarse en la imagen que su distribución no es uniforme; sin embargo, a pesar de ello el catalizador NiMo/CA1 muestra una mejor dispersión de las especies.

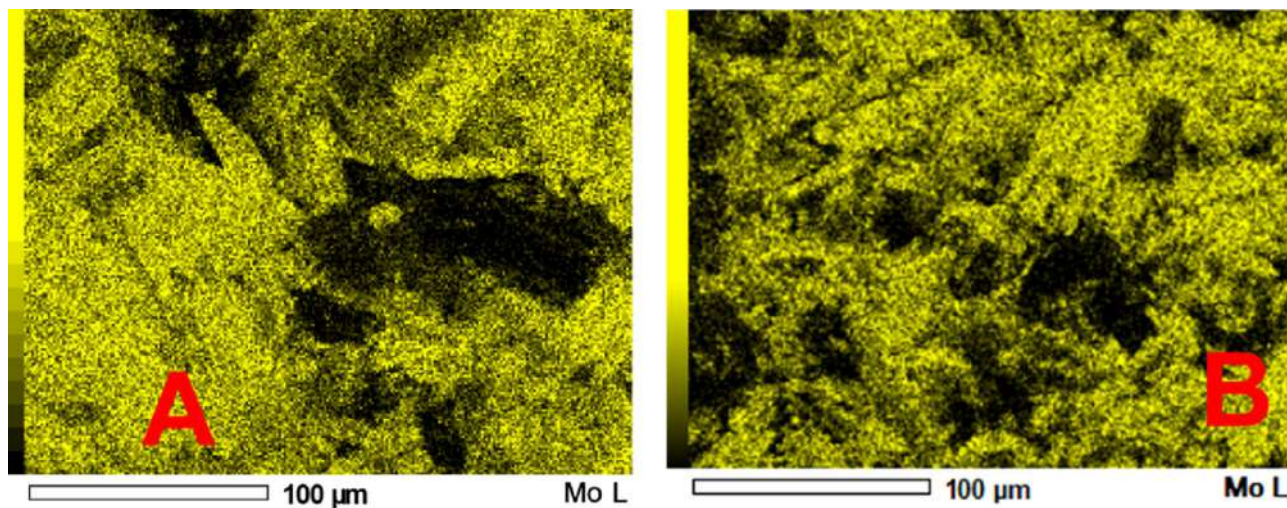


Figura 6. Micrografías MEB de los catalizadores A) Mo/CA1 y B) Mo/CA2 a 100 µm.

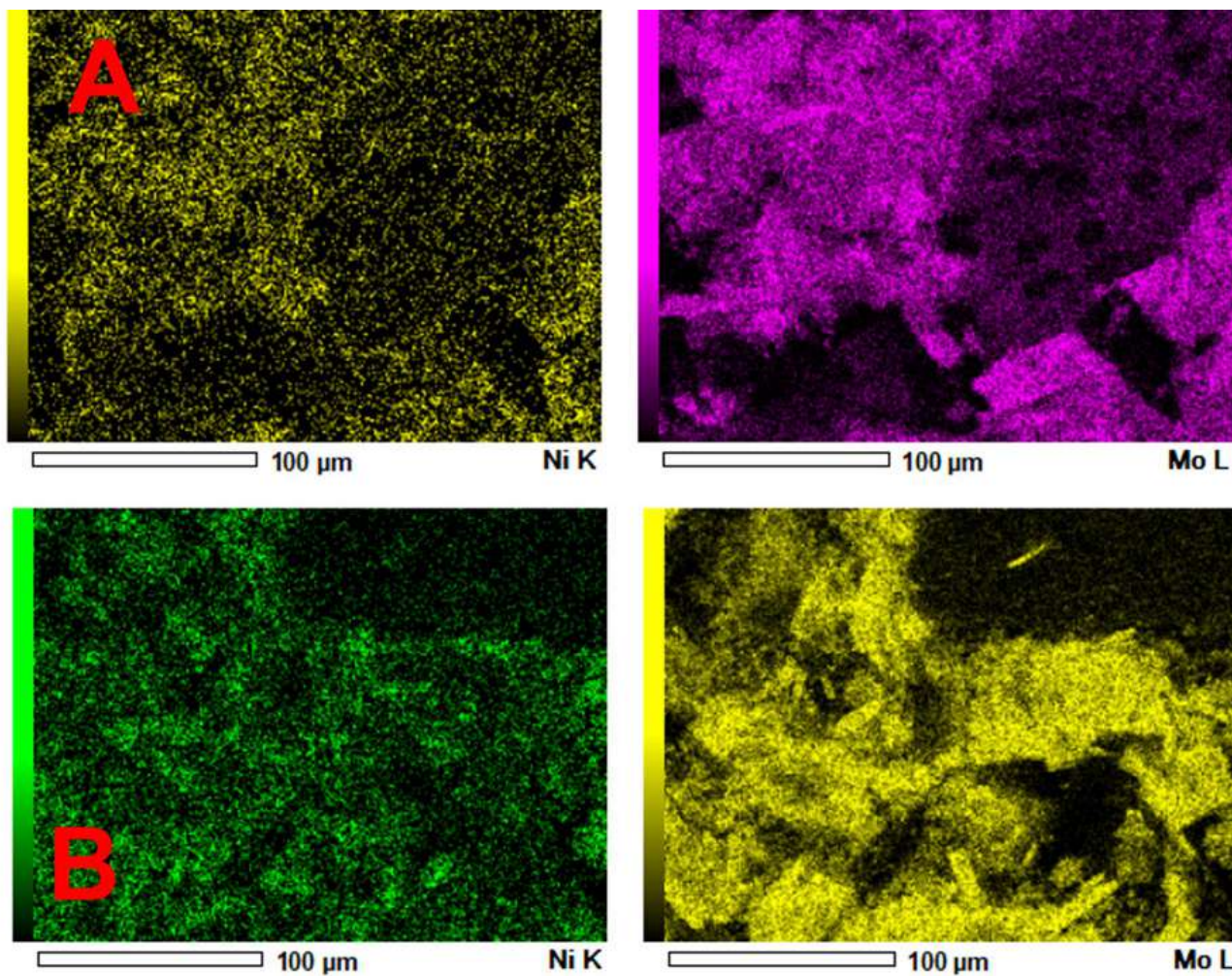


Figura 7. Micrografías MEB de los catalizadores A) NiMo/CA1 y B) NiMo/CA2 a 100 µm.

Evaluación catalítica

La reacción de transesterificación en la que se emplea un catalizador heterogéneo se muestra en la Figura 8.

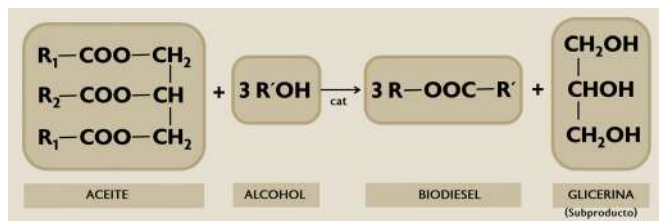


Figura 8.

Reacción de transesterificación.
Elaboración de Quader & Ahmed, 2017.

Para calcular el rendimiento de la reacción, primero se requiere calcular la masa final de biodiesel (m_{FB100}), asumiendo un 100 % de conversión:

$$m_{FB100} = \frac{(m_{\text{aceite de palma}} + m_{\text{metanol}})(PM_{Mo} + 4)}{PM_{Mo}}$$

Donde $PM_{Mo} = 849.1929$ g/mol, y las masas de aceite de palma ($m_{\text{aceite de palma}}$) y metanol (m_{metanol}) que se emplearon durante la reacción de transesterificación.

Con lo anterior, ya puede calcularse el rendimiento porcentual de la reacción por medio de la siguiente fórmula:

Con lo anterior, ya puede calcularse el rendimiento porcentual de la reacción por medio de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{(m_{\text{biodiesel}})}{m_{FB100}} (100)$$

La Figura 9 indica los rendimientos porcentuales de la reacción de los catalizadores durante los diferentes tiempos de reacción.

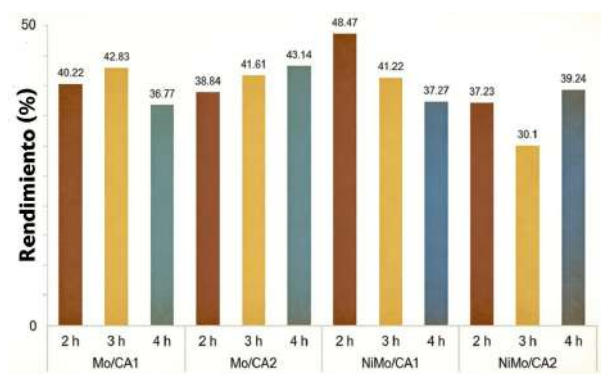


Figura 9.

Rendimiento obtenido con los catalizadores Mo y NiMo en el proceso de transesterificación del aceite de palma.

De acuerdo con los resultados mostrados, el mayor rendimiento, 48.47 %, fue el obtenido por el catalizador NiMo/CA1 después de dos horas de reacción. Esto puede deberse al efecto promotor del Ni y por la mejor dispersión del Mo superficial. Sin embargo, al contrario del NiMo/CA2, presenta un proceso de desactivación con el transcurso del tiempo, probablemente debido a un bloqueo de poros.

El rendimiento obtenido es significativamente menor al obtenido con catalizadores soportados en CAs provenientes de otra biomasa, los cuales son mayores al 80 % (Naji & Tye, 2022); sin embargo, estos utilizan cantidades de material catalítico que oscilan entre 2 y 5 % p/p con respecto a la cantidad de aceite, mientras que en este trabajo solo se empleó el 0.5 % p/p, por lo que su uso podría ser viable al aumentar la cantidad de catalizador.

Caracterización fisicoquímica del biodiesel

Las propiedades fisicoquímicas de las muestras de biodiesel fueron analizadas en función de la temperatura, de 20 °C a 90 °C con intervalos de 10 °C. Se debe mencionar que únicamente se analizaron muestras del producto de las reacciones con las que se obtuvo mayor rendimiento.

La Figura 10 muestra los datos ajustados linealmente y las ecuaciones generadas de dicho ajuste, con lo que se determinó la densidad.

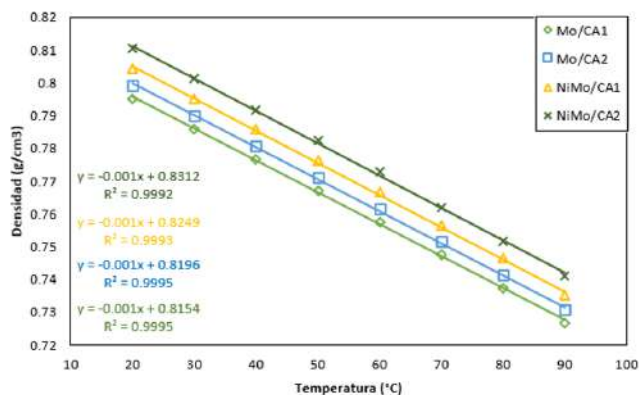


Figura 10.

Ajuste polinomial de la densidad del biodiesel obtenido en función de la temperatura ajustada linealmente.

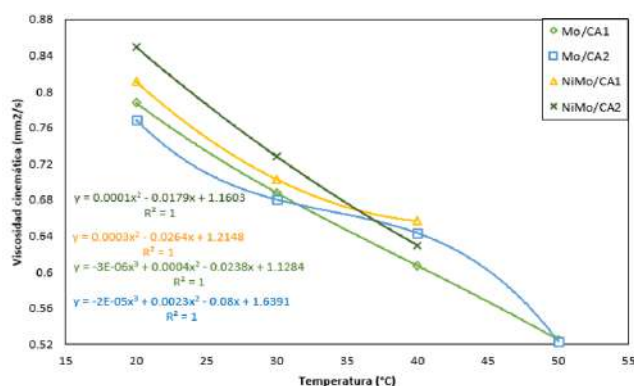
Por lo tanto, dado que los valores del coeficiente de correlación de los cuatro ajustes lineales son mayores que 0.999, se considera que no es necesario hacer ajustes polinomiales, de modo que las ecuaciones obtenidas son apropiadas para el cálculo de densidades de biodiesel a la temperatura que se desee. La Tabla 4 muestra la densidad del biodiesel calculada a 15 °C, dependiendo del catalizador usado, con el fin de compararla con las normativas ASTM D6571 y EN 14214.

La ASTM D6571 indica que la densidad del biodiesel debe ser de 0.880 g/cm³, mientras que la normativa EN 14214 indica que se debe encontrar entre 0.860 y 0.900 g/cm³. Aunque la densidad más alta registrada es del biodiesel obtenido usando NiMo/CA2, las densidades calculadas se encuentran por debajo de lo indicado por ambas normativas.

Tabla 4.

Densidad del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculado a 15°C.

CATALIZADOR USADO	TIEMPO DE REACCIÓN (h)	DENSIDAD CALCULADA a 15 °C (g/cm ³)
Mo/CA1	3	0.8004
Mo/CA2	4	0.8045
NiMo/CA1	2	0.8099
NiMo/CA2	4	0.8162

**Figura 11.**

Ajuste polinomial de la densidad del biodiesel obtenido en función de la temperatura ajustada linealmente.

La viscosidad cinemática de las muestras de biodiesel se exhiben en la Figura 11 y en la Tabla 5. Se hicieron ajustes polinomiales a los datos: el ajuste hecho para las muestras de biodiesel usando Mo/CA1 y Mo/CA2 fueron de segundo grado, ya que un ajuste lineal mostraba un coeficiente de correlación menor que 0.999; los ajustes de las muestras de biodiesel usando NiMo/CA1 y NiMo/CA2 fueron de tercer grado, dado que los ajustes lineal y polinomial de segundo grado mostraban un coeficiente de correlación menor que 0.999.

Las normativas para el biodiesel establecen que la viscosidad cinemática debe encontrarse entre 1.9-6.0 mm²/s (ASTM D6571) o 3.5-5.0 mm²/s (EN 14214), por lo tanto, según los datos de la Tabla 5, las viscosidades cinemáticas obtenidas están muy por debajo de lo establecido.

La Tabla 6 muestra los valores de poder calorífico obtenidos; el mayor dato registrado fue el del biodiesel obtenido usando el catalizador Mo/CA1 después de tres horas de reacción.

Las propiedades del biodiesel dependen fuertemente de la materia prima utilizada, es decir, dependen de la composición de ácidos grasos contenidos en los aceites y grasas,

formando diferentes mezclas de metiléster. El contenido de carbonos de los biocombustibles está relacionado con el poder calorífico; en el caso del biodiesel, las cadenas de carbono se encuentran en un rango de C12-C22.

Los parámetros establecidos de poder calorífico por la ASTM para el diésel (ASTM D975) y biodiesel (ASTM D6571) son 45 000 J/g y 37 300 J/g, respectivamente; es decir, el biodiesel tiene un poder calorífico 12 % menor respecto al diésel, una menor energía, lo que puede impactar en el desempeño del motor, tanto en el nivel de ruido como en los gases de emisiones. El biodiesel con mayor poder calorífico obtenido presenta valores significativamente menores que los parámetros establecidos, es decir, que su uso presentaría dificultades para el desempeño de los automotores en los que podría emplearse.

Tabla 5.

Viscosidad cinemática del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculada a 40 °C.

CATALIZADOR USADO	TIEMPO DE REACCIÓN (h)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (mm ² /s)
Mo/CA1	3	0.6170
Mo/CA2	4	0.6432
NiMo/CA1	2	0.6568
NiMo/CA2	4	0.6248

Tabla 6.

Poder calorífico del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados.

CATALIZADOR USADO	TIEMPO DE REACCIÓN (h)	PODER CALORÍFICO (J/g)
Mo/CA1	3	19 975.51
Mo/CA2	4	19 402.95
NiMo/CA1	2	11 605.95
NiMo/CA2	4	18 295.85

En general, las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido presentan valores menores que los establecidos por la normatividad; sin embargo, estas podrían mejorarse por la optimización de las condiciones de reacción en trabajos futuros.

CONCLUSIONES

Los carbones activados obtenidos a partir del bagazo de caña son materiales que pueden emplearse como soportes para la producción de biodiesel a partir del aceite de palma por el método de transesterificación, ya que presentan propiedades texturales como área superficial y diámetro de poro adecuados para este proceso. Sin embargo, su baja porosidad, comparada con la de otros carbones activados, dificulta la dispersión de las especies de Ni y Mo y puede sufrir desactivación por bloqueo de poros, lo cual conduce a una baja actividad catalítica en comparación con la obtenida con otros catalizadores soportados en CAs; sin embargo, esta podría mejorar al aumentar el contenido de catalizador en la reacción.

El biodiesel obtenido por la transesterificación de aceite de palma presentó propiedades fisicoquímicas simila-

res empleando los catalizadores Mo y NiMo sintetizados, aunque por debajo de los límites establecidos en la normatividad. Esto podría mejorarse modificando las técnicas de preparación de los carbones activados, así como el contenido de Mo y Ni de los catalizadores.

La principal limitación del estudio fue la baja área superficial de los carbones activados, lo que ocasionó una deficiente dispersión de Mo y Ni, lo que generó una baja actividad catalítica y rendimientos de biodiesel inferiores a los reportados en la literatura.

A futuro, se propone mejorar el proceso de activación del carbón, optimizar la carga metálica y las condiciones de reacción, así como evaluar la estabilidad y reutilización del catalizador.

REFERENCIAS

- Abo El Naga, A. O., El Saied, M., Shaban, S.A., & El Kady, F.Y. (2019). Fast removal of diclofenac sodium from aqueous solution using sugar cane bagasse-derived activated carbon. *Journal of Molecular Liquids*, 285(1), 919. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2019.04.062>
- Adinaveen, T., Kennedy, L.J., Vijaya, J.J., & Sekaran, G. (2013). Studies on structural, morphological, electrical and electrochemical properties of activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(5), 1470-1476. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.01.010>
- Akream, N. S., Hamd, M. I., Gheni, S. A., Al-Sudani, F.T., Mohammed, A.E., Mohammed, H.R., Ali, M.M., Ahmed, S.M.R., Türköz Karakullukcu, N., & Tahah, A.K. (2024). High-yield activated carbon based ZnO-Ce bifunctional catalyst for production of biodiesel from waste cooking oil. *Energy Conversion and Management*, 321, 119054. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.119054>
- Alalwan, H.A., Alminshid, A.H., & Aljaafari, H.A.S. (2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *In Renewable Energy Focus*, 28, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>
- Ali, A.H., Wanderlind, E.H., & Almerindo, G.I. (2024). Activated carbon obtained from malt bagasse as a support in heterogeneous catalysis for biodiesel production. *Renewable Energy*, 220, 119656. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119656>
- Catalán, H. (2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México (Impact of renewable energies on greenhouse gas emissions in Mexico). *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204). <https://doi.org/10.22201/IIEC.20078951E.2021.204.69611>
- Babatunde, E.O., Enomah, S., Akwenuke, O.M., Adepoju, T.F., Okwelum, C.O., Mundu, M.M., Aiki, A., & Oghenejabor, O.D. (2025). Novel-activated carbon from waste green coconut husks for the synthesis of biodiesel from pig fat oil blends with tallow seed oil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101058. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2024.101058>
- Balboa Palomino A. (2018). *Síntesis y caracterización de catalizadores NiMo/Zr-SBA-15: Efecto de la relación Zr/Si sobre las propiedades del SBA-15* (Synthesis and Characterization of NiMo/Zr-SBA-15 Catalysts: Effect of the Zr/Si Ratio on the Properties of SBA-15). [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero].
- Bardhan, P., Deka, A., Bhattacharya, S.S., Mandal, M., & Katak, R. (2021). *Economical aspect in biomass to biofuel production. In: Value-Chain of Biofuels: Fundamentals, Technology, and Standardization* (pp.395-427). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00003-8>
- Baskar, G., Kalavathy, G., Aiswarya, R., & Abarnaebenezer Selvakumari, I. (2018). Advances in bio-oil extraction from nonedible oil seeds and algal biomass. In: K. Azad (Ed.). *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (pp. 187-210). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00007-3>
- Cabello Mendoza, L.P. (2019). *Investigación y desarrollo de óxido de calcio como material sorbente de CO₂, proveniente de la cáscara de huevo, de tamaño nanométrico, dopado con TiO₂, PET y carbón activado* (Research and Development of Calcium Oxide as a CO₂ Sorbent Material, Derived from Eggshell, of Nanometric Size, Doped with TiO₂, PET, and Activated Carbon). [Tesis de Doctorado, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial]. <https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/390>
- Das, A., Jati, A.P., Selvaraj, M., Katak, R., Baskar, G., Halder, G., & Rokhum, S.L. (2024). Psidium guajava (guava) leaves derived functional activated carbon as a heterogeneous catalyst for conversion of Jatropha curcas oil to biodiesel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181, 106636. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2024.106636>

- Elgharbawy, A.S., Sadik, W.A., Sadek, O.M., & Kasaby, M.A. (2021). A review on biodiesel feedstocks and production technologies. In *Journal of the Chilean Chemical Society*, 66(1), 5098-5109. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072021000105098>
- Foroozandeh, A., Hatefirad, P., Safaei Mahmoudabadi, Z., & Tavasoli, A. (2023). Catalytic Activity of Synthesized Nimo Catalysts on Walnut Shell Activated Carbon for Heavy Naphtha Hydrotreating. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(1), 38-50. <https://doi.org/10.30492/IJCCCE.2022.542314.5010>
- Freire Ordóñez, C., & Medrano Barboza, J. (2019). Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación (Optimization of the process of obtaining biodiesel from a production company, through simulation). *Perspectivas*, 4(16), 105-116. <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Pers/article/view/2081>
- Gesteiro, E., Galera-Gordo, J., & González-Gross, M. (2018). Aceite de palma y salud cardiovascular: consideraciones para valorar la literatura (Palm Oil and Cardiovascular Health: Considerations for Evaluating the Literature). *Nutrición Hospitalaria*, 35(5), 1229-1242. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0212-16112018000900032&script=sci_abstract
- Gonçalves, G. da C., Pereira, N.C., & Veit, M.T. (2016). Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses. *Biomass and Bioenergy*, 85, 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.013>
- Greish, A.A., Sokolovskiy, P.V., Finashina, E.D., Kustov, L.M., Vezentsev, A.I., & Chien, N.D. (2021). Adsorption of phenol and 2,4-dichlorophenol on carbon-containing sorbent produced from sugar cane bagasse. *Mendeleev Communications*, 31(1), 121-122. <https://doi.org/10.1016/J.MENCOM.2021.01.038>
- Greish, A.A., Sokolovskiy, P.V., Finashina, E.D., Kustov, L.M., Vezentsev, A.I., Chien Nguyen, D., & Chau Nguyen, H. (2022). Efficient carbon adsorbent for hydrogen sulfide produced from sugar cane bagasse. *Mendeleev Communications*, 32(6), 828-830. <https://doi.org/10.1016/J.MENCOM.2022.11.040>
- Hongloi, N., Prapainainar, P., Seubsai, A., Sudsakorn, K., & Prapainainar, C. (2019). Nickel catalyst with different supports for green diesel production. *Energy*, 182, 306-320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.020>
- Instituto Nacional de las Mujeres. (2024). Las mujeres en el sector agropecuario, Desigualdad en cifras (Women in the Agricultural Sector, Inequality in Figures).
- Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., & König, B. (2020). Activated carbon as catalyst support: Precursors, preparation, modification and characterization. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 16, 1188-1202. <https://doi.org/10.3762/bjoc.16.104>
- Khademi, D., Mohammadi, M.J., Shokri, R., Takdastan, A., Mohammadi, M., Momenzadeh, R., & Yari, A.R. (2018). Application of cane bagasse adsorption on nitrate removal from groundwater sources: adsorption isotherm and reaction kinetics. *Desalination and Water Treatment*, 120, 241-247. <https://doi.org/10.5004/DWT.2018.22730>
- Kohli, K., Prajapati, R., Maity, S.K., & Sharma, B.K. (2020). Effect of silica, activated carbon, and alumina supports on NiMo catalysts for residue upgrading. *Energies*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/en13184967>
- Kumar, P., Maity, S.K., & Shee, D. (2019). Role of NiMo Alloy and Ni Species in the Performance of NiMo/Alumina Catalysts for Hydrodeoxygenation of Stearic Acid: A Kinetic Study. *ACS Omega*, 4(2). <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03592>
- Mahlia, T.M.I., Ismail, N., Hossain, N., Silitonga, A.S., & Shamsuddin, A.H. (2019). Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04563-x>
- Maleki, B., Ashraf Talesh, S.S., & Mansouri, M. (2022). Comparison of catalysts types performance in the generation of sustainable biodiesel via transesterification of various oil sources: a review study. *Materials Today Sustainability*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100157>
- Naji, S.Z., & Tye, C.T. (2022). A review of the synthesis of activated carbon for biodiesel production: Precursor, preparation, and modification. *Energy Conversion and Management: X*, 13, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.ECMX.2021.100152>
- Nasreen, S., Nafees, M., Qureshi, L.A., Asad, M.S., Sadiq, A., & Ali, S.D. (2018). Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production. In K. Biernat (Eds.), *Biofuels - State of Development*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75534>
- Nath Prajapati, Y.N. & Verma, N. (2018). Hydrodesulfurization of Thiophene on Activated Carbon Fiber Supported NiMo Catalysts. *Energy and Fuels*, 32(2). <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03407>
- Nguyen, T.H., Nguyen, T.H., Nguyen, T.N., Nghiem, X.S., Le Minh, T., & Vu, A.T. (2025). Preparation of functional materials based on activated carbon from bagasse and its application in Pb2+ adsorption in an aqueous environment. *Materials Today Communications*, 47, 113158. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2025.113158>
- Quader, M.A., & Ahmed, S. (2017). Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): Future prospects of carbon-negative technologies. In: M.G. Rasul, A.K. Azad and S.C. Sharma (Eds.), *Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805423-9.00004-1>
- Rizwanul Fattah, I.M., Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., Mofijur, M., Silitonga, A.S., Ashrafur Rahman, S.M., & Ahmad, A. (2020). State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00101>
- Robles, S., Silva Rodrigo, R., García Alamilla, R., Ramos Galván, C.E., Carrizales Martínez, G., Sandoval Robles, G. & Castillo Mares, A. (2006). Carbón activado modificado como soporte para catalizadores prototipo de HDS (Modified Activated Carbon as a Support for Prototype HDS Catalysts). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(3), 279-284. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62050314.pdf>
- Ruangudomsakul, M., Osakoo, N., Keawkumay, C., Kongmanklang, C., Butburee, T., Kiatphuengporn, S., Faungnawakij, K., Chanlek, N., Wittayakun, J., & Khemthong, P. (2021). Influential properties of activated carbon on dispersion of nickel phosphides and catalytic performance in hydrodeoxygenation of palm oil. *Catalysis Today*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.04.068>
- SAGARPA (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación) (2017). Palma de aceite mexicana (Mexican Palm Oil). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257081/Potencial-Palma_de_Aceite.pdf

- Saikia, K., Das, A., Sema, A.H., Basumatary, S., Shaemningwar Moyon, N., Mathimani, T., & Rokhum, S.L. (2024). Response surface optimization, kinetics, thermodynamics, and life cycle cost analysis of biodiesel production from *Jatropha curcas* oil using biomass-based functional activated carbon catalyst. *Renewable Energy*, 229, 120743. <https://doi.org/10.1016/j.RENENE.2024.120743>
- Singh, R., Kunzru, D., & Sivakumar, S. (2021). Enhanced catalytic activity of ultrasmall NiMoW trimetallic nanocatalyst for hydrodesulfurization of fuels. *Fuel*, 288, 119603. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119603>
- Solis-Fuentes, J.A., Galán-Méndez, F., Hernández-Medel, M. del R., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Mendoza-Pérez, S., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. del C. (2019). Effectiveness of bagasse activated carbon in raw cane juice clarification. *Food Bioscience*, 32, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.FBIO.2019.100437>
- Somyanonthanakun, W., Greszta, A., Roberts, A.J., & Thongmee, S. (2023). Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon as a Potential Material for Lead Ions Removal from Aqueous Solution and Supercapacitor Energy Storage Application. *Sustainability*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15065566>
- Tapia, J., Acelas, N.Y., López, D., & Moreno, A. (2017). NiMo-sulfide supported on activated carbon to produce renewable diesel. *Universitas Scientiarum*, 22(1). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC22-1.nsoa>
- Tian, H., Zhou, T., Huang, Z., Wang, J., Cheng, H., & Yang, Y. (2021). Integration of spent coffee grounds valorization for co-production of biodiesel and activated carbon: An energy and techno-economic case assessment in China. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129187. <https://doi.org/10.1016/j.JCLEPRO.2021.129187>
- Vázquez-Garrido, I., López-Benitez, A., Guevara-Lara, A., & Berhault, G. (2021). Synthesis of NiMo catalysts supported on Mn-Al₂O₃ for obtaining green diesel from waste soybean oil. *Catalysis Today*, 365, 327-340. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.06.001>
- Vilas Bôas, R.N., & Mendes, M.F. (2022). A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids. *J. Chil. Chem. Soc.*, 67(1). <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072022000105433>
- Younis Al-Ani, Y.M., Ridha, A.M., Abbas, T.K., Ahmadlouydarab, M., & Kamar, F.H. (2026). Modeling and enhanced biodiesel production using a sustainable green catalyst based on palm frond-activated carbon supported with zirconium oxide. *Fuel*, 403, 136118. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2025.136118>