

Evaluating cocoa pod ash as a heterogeneous catalyst for biodiesel production: The case of Fundo Gibaja, Quillabamba, Cusco

Pilar Conza Guzman¹; Armenia Justo Chacon²; and Jose-Carlos Lama³

^{1,2,3} *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú*, u20211d800@upc.edu.pe, u202120788@upc.edu.pe,
pcigilam@upc.edu.pe

Abstract– This study presents a heterogeneous catalyst synthesized from calcined cocoa pod residue (CMC) for biodiesel production from used vegetable oil (UVO). Although this residue has been little explored as a base material for catalyst synthesis, this work demonstrates its potential as a source of potassium carbonate (K_2CO_3), responsible for basicity and catalytic activity. The material was obtained by calcination at 700 °C for 4 h and characterized using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and Brunauer–Emmett–Teller surface area analysis (BET). The catalytic activity was evaluated in the transesterification process under conditions of 60 minutes, a methanol-to-oil molar ratio of 6:1, stirring speed of 250 rpm, and catalyst loadings of 2–3 wt%. The CMC catalyst was compared to a commercial potassium carbonate (K_2CO_3) catalyst. The biocatalyst achieved a maximum biodiesel yield of 99.0% (at 2 wt%), maintaining it at 98.9% (at 3 wt). In comparison, the commercial catalyst yielded 96.5% and 98.0%, respectively. The resulting biodiesel was evaluated using physicochemical tests, confirming that its density and kinematic viscosity met the values established by ASTM D1298 and ASTM D445, respectively.

Keywords–Biodiesel; heterogeneous catalyst; transesterification; cocoa pod; potassium carbonate; catalytic conversion

Evalando la ceniza de mazorca de cacao como catalizador heterogéneo para la producción de biodiésel: Caso Fundo Gibaja, Quillabamba, Cusco

Pilar Conza Guzman¹; Armenia Justo Chacon²; and Jose Carlos Lama³

^{1,2,3} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211d800@upc.edu.pe, u202120788@upc.edu.pe, pcigilam@upc.edu.pe

Resumen— Este estudio presenta un catalizador heterogéneo sintetizado a partir de mazorca de cacao residual calcinada (CMC) para la producción de biodiésel desde aceite vegetal usado (AVU). Aunque este residuo ha sido poco explorado como material base para la síntesis de catalizadores, este trabajo demuestra su potencial como fuente de carbonato de potasio (K_2CO_3), responsable de la basicidad y la actividad catalítica. El material fue obtenido mediante calcinación a 700 °C durante 4 h y caracterizado a través de espectroscopía de energía dispersiva (EDS), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de área superficial Brunauer–Emmett–Teller (BET). La actividad catalítica se evaluó en la transesterificación bajo condiciones de 60min, relación molar metanol - aceite de 6:1, velocidad de agitación de 250rpm y cargas de catalizador de 2–3 % en peso, comparando el catalizador de CMC con uno de carbonato de potasio (K_2CO_3) comercial. El biocatalizador alcanzó un rendimiento máximo de biodiésel de 99.0 % (a 2% en peso), manteniéndose en 98.9 % (a 3% en peso). En comparación, el catalizador comercial presentó rendimientos de 96.5 % y 98.0 %, respectivamente. El biodiésel obtenido fue evaluado mediante ensayos fisicoquímicos, confirmando que la densidad y la viscosidad cinemática cumplen con los valores establecidos por las normas ASTM D1298 y ASTM D445, respectivamente.

Palabras clave— Biodiésel; catalizador heterogéneo; transesterificación; mazorca de cacao; carbonato de potasio; conversión catalítica.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel global, el interés por los biocombustibles como el biogás, el bioetanol y el biodiésel ha aumentado considerablemente, debido a que representan fuentes de energía renovables frente a problemáticas ambientales, económicas y de seguridad energética asociadas al consumo y agotamiento de los combustibles fósiles [1]. Entre estas alternativas, el biodiésel se ha posicionado como una de las principales opciones para reemplazar al diésel convencional, debido a su carácter biodegradable, baja toxicidad y menor emisión de gases contaminantes [2].

Una de las principales ventajas del biodiésel radica en que puede emplearse directamente en motores de combustión interna (MCI) sin requerir modificaciones, o mezclarse con diésel fósil. La producción de biodiésel se basa, en la reacción de triglicéridos con alcoholes de bajo peso molecular por lo general, metanol o etanol en presencia de un catalizador, ya sea este homogéneo o heterogéneo [3]. Este proceso, conocido como transesterificación, constituye el método más empleado

para su obtención a nivel industrial y laboratorio; en la Figura 1 se muestra el esquema general del proceso de producción de biodiésel.

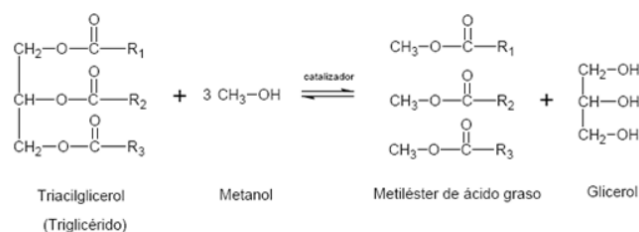


Fig. 1. Esquema del proceso de producción de biodiesel [4].

En la producción convencional de biodiésel, es común el uso de catalizadores homogéneos alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), debido a su elevada eficiencia catalítica y alta conversión que consiguen alcanzar [5]. Sin embargo, el costo global del proceso utilizando este tipo de catalizadores resulta considerablemente alto, principalmente por los tratamientos necesarios posteriores a la reacción, tales como neutralización, lavado y separación de fases [6]. Asimismo, diversos estudios reportan que la catálisis homogénea genera grandes volúmenes de aguas residuales, incrementa el consumo de reactivos y energía, y emplea catalizadores no reutilizables, lo que conlleva un mayor impacto ambiental y una mayor huella de carbono indirecta asociada al proceso [2].

Estas limitaciones han motivado la búsqueda de alternativas de menor impacto para la producción de biodiésel. En este contexto, el uso de catalizadores heterogéneos ecológicos y de bajo costo ha cobrado creciente importancia en el desarrollo de procesos de producción más limpia. En los últimos años, se han investigado el desempeño de catalizadores obtenidos a partir de residuos agroindustriales, tales como bagazo de caña de azúcar [7], cáscara de mazorca de cacao [8], cáscara de coco [9], cáscara de mango [10], entre otros. Estos catalizadores contienen potasio en formas alcalinas principalmente como óxidos y/o carbonatos responsables de la actividad catalítica similar a la de los catalizadores homogéneos.

Por otro lado, las mazorcas de cacao, cuyo principal componente mineral es el potasio, se generan como residuo una vez extraído el grano del fruto: se estima que, por cada 1000 kg de cacao, alrededor de 750 corresponden a las mazorcas, las cuales generalmente se desechan en los alrededores de las plantaciones [11].

A nivel internacional, Costa de Marfil y Ghana se posicionan como los dos mayores productores de cacao, representando aproximadamente el 44.4 % y 16.3 % de la producción mundial de cacao en grano, respectivamente. En particular, Costa de Marfil se consolida como el principal productor mundial, con una producción estimada entre 2 y 2.5 millones de toneladas métricas anuales, lo que evidencia su relevancia económica [12]. Por su parte, Indonesia lidera la producción de cacao en Asia, habiendo alcanzado aproximadamente 668 mil toneladas producidas en 2021 [13].

En el caso peruano, la producción de cacao alcanzó más de 170 mil toneladas de grano seco en 2022, ubicando al país entre los principales productores de América Latina [14]. Este volumen genera más de 945 000 toneladas anuales de mazorcas residuales, las cuales suelen ser desechadas o quemadas, ocasionando impactos negativos como la contaminación al suelo y a los cuerpos de agua [15].

Diversos estudios han reportado que la ceniza de la mazorca de cacao presenta propiedades catalíticas favorables para la producción de biodiésel. Tarigan et al. [13] muestran que los grupos funcionales $-OH$ y $-COOH$ presentes en la ceniza influyen positivamente en la actividad catalítica. Los grupos $-OH$ proporcionan sitios activos para la reacción de transesterificación, mientras que los grupos $-COOH$ pueden favorecer la esterificación de ácidos grasos libres presentes en el aceite vegetal, contribuyendo a una mayor eficiencia en la conversión a biodiésel. Asfaw et al. [16] demostraron que las cenizas de cáscara de cacao calcinadas a 500 y 700 °C presentan contenidos de potasio comparables, indicando una relativa estabilidad del elemento en dicho intervalo térmico; en contraste, temperaturas superiores a 800 °C mostraron variaciones mínimas en la masa del residuo, evidenciando que el material alcanza una etapa de estabilidad térmica.

Es así como resulta relevante considerar las mazorcas de cacao debido a su carácter ecológico, bajo costo y potencial catalítico. En la ceniza de estas mazorcas se encuentran carbonatos de metales alcalinos, principalmente el carbonato de potasio (K_2CO_3). Por ello, se ha empleado como catalizador en la transesterificación del aceite vegetal usado para la producción de biodiésel [1]. Estudios recientes destacan el alto potencial de la ceniza de mazorca de cacao como catalizador heterogéneo para producir biodiésel a partir de aceite de

palmiste esterificado, grasa de pollo y aceite de cocina usado [13], [17]-[18]

Recientemente, Tarigan et al. [13] evaluaron el uso de ceniza de mazorca de cacao calcinada como catalizador heterogéneo en la transesterificación de aceite de palma, utilizando un homogeneizador a temperatura ambiente (25 °C). Los resultados mostraron una conversión del 96.2 % en 30 minutos, empleando una relación molar aceite: metanol de 1:15 y una carga catalítica del 5 % en peso. Por su parte, Betiku et al. [19] demostraron que las cáscaras de plátano, tras su calcinación, pueden transformarse en un catalizador heterogéneo eficaz, donde el óxido de potasio (K_2O) actúa como componente predominante y responsable de la actividad catalítica. Bajo condiciones intensificadas de proceso mediante homogeneización (velocidad de rotación de 6000 rpm), aplicaron 7% de catalizador y una relación molar aceite: metanol de 1:15, logrando una alta conversión a biodiésel de $96,2 \pm 0,3\%$ en un tiempo óptimo de 20 minutos.

De manera similar, Buasri et al. [20] aplicaron un catalizador obtenido de la ceniza de cáscara de cacao calcinada a 700 °C durante 4 horas en la transesterificación de aceite de ricino, alcanzando una conversión del 88 % bajo condiciones de 60 °C, una relación molar aceite - metanol de 1:9 y 3% en peso de catalizador. Estos resultados confirmaron que los óxidos de potasio, calcio y magnesio presentes en la ceniza son relevantes durante la actividad catalítica. Por su parte, Falowo et al. [3] desarrolló un catalizador mixto a partir de residuos agroindustriales, entre ellos la mazorca de cacao y la cáscara de plátano, sometidos a calcinación a 750 °C por 5 horas. Dicho catalizador fue utilizado en la transesterificación de aceite de *Thevetia peruviana*, obteniendo una conversión del 95 % en 60 minutos a temperatura ambiente, con una relación molar aceite: metanol de 1:12 y 4 % en peso de catalizador, demostrando una elevada estabilidad durante varios ciclos de reacción.

Asimismo, Amos et al. [21] estudiaron la ceniza de cáscara de coco como catalizador heterogéneo en la producción de biodiésel a partir de aceite de palma usado. El material fue calcinado a 700 °C durante 3 horas, logrando una conversión del 93 % con una relación molar aceite - metanol de 1:6, una carga catalítica del 2 % y una temperatura de 60 °C. Como vemos, estos autores destacaron la efectividad de los catalizadores derivados de residuos lignocelulósicos como alternativas de bajo costo para la producción de biocombustibles sostenibles [22].

Por ello, el objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de ceniza de mazorca de cacao (variedad CCN-51), obtenida a partir de biomasa residual del fundo Gibaja, ubicado en Quillabamba (Cusco), como catalizador heterogéneo para la

producción de biodiésel desde aceite vegetal usado. El catalizador será caracterizado mediante las técnicas analíticas Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) para identificar los elementos presentes, Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para confirmar la presencia de carbonatos y grupos funcionales asociados, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para evaluar la morfología y el tamaño de partícula, y Brunauer Emmett Teller (BET) para determinar el área superficial específica.

Asimismo, se analizará el efecto del catalizador obtenido de mazorca de cacao en comparación con un catalizador convencional, analizando el rendimiento y la conversión del biodiésel obtenido. Este estudio busca aportar evidencia relevante para el desarrollo de catalizadores alternativos, ecológicos y de bajo costo, promoviendo la valorización de residuos agroindustriales locales y fortaleciendo la sostenibilidad del proceso de producción de biodiésel.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y toma de muestras

El estudio se desarrolló utilizando residuos agroindustriales generados en el fundo Gibaja, ubicado en Quillabamba, provincia de La Convención, departamento de Cusco (ver fig.2). El fundo se dedica a la producción de cacao de la variedad CCN-51, actividad que constituye una de sus principales líneas productivas.

De acuerdo con los registros proporcionados por los responsables del fundo, durante el año 2024, se obtuvo una producción mensual promedio de 426.5 kg de fruto. Considerando la proporción reportada de 75% de mazorca respecto al fruto para esta variedad, se estimó una generación promedio mensual de 1079 kg de mazorca residual.



Fig. 2. Ubicación del fundo Gibaja (Quillabamba, Cusco).

1) Muestreo de la mazorca de cacao

La recolección de las mazorcas de cacao se realizó aplicando un muestreo no probabilístico por conveniencia,

metodología comúnmente empleada en estudios de valorización de residuos agroindustriales cuando se dispone de un residuo homogéneo y de acceso limitado. Esta técnica fue seleccionada considerando restricciones logísticas y la disponibilidad controlada del material en el fundo.

Las mazorcas correspondieron exclusivamente a la variedad CCN-51, recolectadas durante el periodo regular de cosecha. Se seleccionaron mazorcas libres de contaminantes visibles y se tomaron tres submuestras representativas, las cuales fueron posteriormente mezcladas para conformar una muestra compuesta, utilizada en los análisis posteriores. Este procedimiento permitió asegurar la representatividad del residuo generado en el fundo.

2) Muestreo del aceite vegetal usado

El aceite vegetal usado (AVU) se obtuvo gratuitamente de pollerías de un comedor popular de comida rápida de la ciudad de Quillabamba, departamento de Cusco, Perú. Todos los productos químicos empleados, como el metanol y el carbonato de potasio (K_2CO_3), fueron de grado analítico.

B. Síntesis y caracterización del catalizador

La muestra seleccionada de mazorcas de cacao se lavó con agua destilada y se trozó en fragmentos pequeños, los cuales se secaron al sol durante cinco días hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 10 % [21]. Posteriormente, el material seco se sometió a calcinación en una mufla a 700 °C durante 4 horas, obteniéndose la ceniza de mazorca de cacao (CMC). Para la obtención del catalizador, se disolvieron 200 g de CMC en agua destilada (1:5 p/v) bajo agitación constante durante una hora [1]. La mezcla resultante se filtró, y el filtrado se evaporó a 100°C hasta la cristalización de sales inorgánicas, principalmente carbonato de potasio (K_2CO_3), identificadas como fase activa del catalizador.

La caracterización del catalizador se realizó mediante la aplicación de diversas técnicas instrumentales en el laboratorio de Geología de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI): la microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS) se utilizó para determinar la morfología superficial y el perfil elemental [20], la difracción de rayos X (XRD) permitió identificar las fases cristalinas y amorfas presentes en el material calcinado [1] y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se aplicó para detectar los grupos funcionales y confirmar la presencia de carbonatos y óxidos metálicos activos [17]. Además, el área superficial específica y la distribución de tamaño de poro se determinaron mediante el método Brunauer–Emmett–Teller (BET) utilizando adsorción de nitrógeno [1].

C. Caracterización del aceite vegetal usado

El aceite vegetal usado se caracterizó de acuerdo con los métodos estandarizados de la American Society for Testing and Materials (ASTM) [16]. Se determinaron los parámetros de densidad a 20°C (ASTM D1298), viscosidad cinemática a 40°C (ASTM D445), valor ácido (ASTM D664), índice de yodo (ASTM D1959) y valor de saponificación (ASTM D5558) [23].

En los casos donde el valor ácido fue superior a 1 mg KOH g⁻¹, se realizó una etapa de pretratamiento por esterificación con metanol y ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 2 % p/p, a una relación molar metanol - aceite de 6:1, manteniendo la mezcla a 60 °C durante 30 min bajo agitación constante [24]. La reacción se repitió hasta alcanzar un valor ácido inferior al límite establecido.

D. Diseño experimental para la etapa de transesterificación

La reacción de transesterificación se efectuó en un reactor de vidrio de doble cuello equipado con refrigerante de reflujo y agitador magnético (Fig. 3) [25]. Se utilizó una relación molar metanol: aceite de 6:1, una velocidad de agitación de 250 rpm y una temperatura de 65 °C [18]. Se aplicó un diseño de 2 factores, considerando como variable independiente el porcentaje de catalizador en peso (2 % y 3%) y tipo de catalizador y como dependiente el rendimiento del biodiésel. Los datos de rendimiento de biodiésel fueron evaluados mediante el análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de errores. Las diferencias significativas se analizaron mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05.

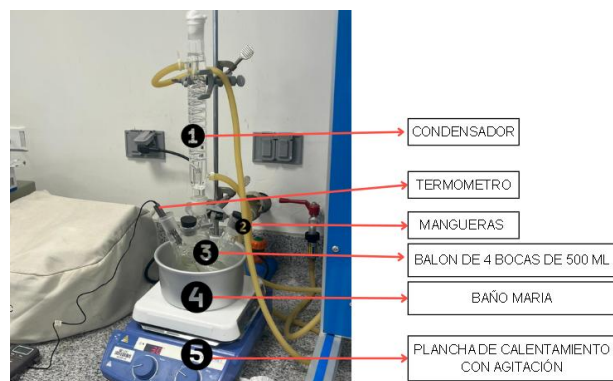


Fig. 3. Montaje experimental para el proceso de transesterificación.

Con base en el diseño unidireccional se realizaron 4 tratamientos con 4 réplicas para seleccionar el tratamiento óptimo para el trabajo y evaluar la variable dependiente.

Finalizada la reacción, la mezcla se decantó por 24 horas para separar las fases. La fase superior correspondió al biodiésel crudo y la inferior al glicerol. El rendimiento de biodiésel se determinó gravimétricamente mediante la ecuación 1 [26]:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{masa de biodiesel obtenida}}{\text{masa inicial de aceite}} \times 100 \quad (1)$$

E. Caracterización del biodiésel

El biodiésel con mayor rendimiento fue caracterizado mediante análisis fisicoquímicos, evaluando la densidad según la norma ASTM D1298, la viscosidad cinemática conforme a la norma ASTM D445 y el color y la claridad por inspección visual [27]. Los resultados fueron comparados con los obtenidos mediante el uso del catalizador convencional de K₂CO₃, con el objetivo de determinar la eficacia y estabilidad del catalizador derivado de la mazorca de cacao en la reacción de transesterificación del aceite vegetal usado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La ceniza de mazorca de cacao (CMC) se considera un material con alto contenido de óxidos y carbonatos metálicos, principalmente de potasio y calcio, que le confiere una marcada basicidad y potencial catalítico en la transesterificación de aceites para la obtención de biodiésel [1], [18]-[28].

A. Resultado de la caracterización de CMC

1) Composición elemental y morfología

El análisis EDS reveló que la CMC contiene metales como K, Mg, Ca, Na, Fe y Al (Fig. 4), siendo el potasio el elemento predominante con 50.95 %, seguido del magnesio (2.49 %) y calcio (2.30 %) tras la calcinación a 700 °C. La composición varió con la temperatura, mostrando que la intensidad de calcinación influiría en la distribución elemental; estudios previos confirman que el potasio es el principal metal en la ceniza calcinada de mazorca de cacao [1], [13]-[21], [27].

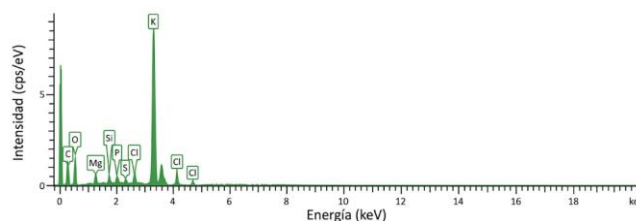


Fig. 4. Espectro EDS para CCPA a 700 °C.

Por su parte, las micrografías SEM (Fig.5) mostraron una superficie porosa, fibrosa y parcialmente aglomerada, atribuida

al calor de calcinación, con partículas compactas y elevada área superficial. Esta morfología favorece la actividad catalítica, pues una mayor área de contacto y tamaño de poro optimizan la accesibilidad de los reactivos [29], [29].

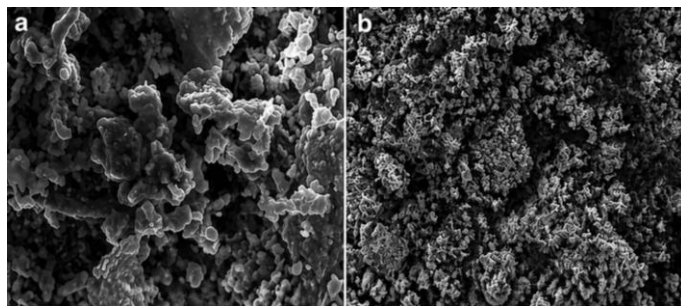


Fig. 5. Imágenes SEM de CMC con tamaños de partícula de (a) 10 µm y (b) 100 µm.

2) Características texturales de las CMC

El análisis BET mostró un área superficial de 18.86 m²/g y un volumen de poro de 0.04297 cm³/g, con un diámetro de poro promedio de 9.11 nm, lo que clasifica a la CMC como mesoporosa (Fig. 6). La isoterma tipo IV con histéresis H3 confirma esta estructura.

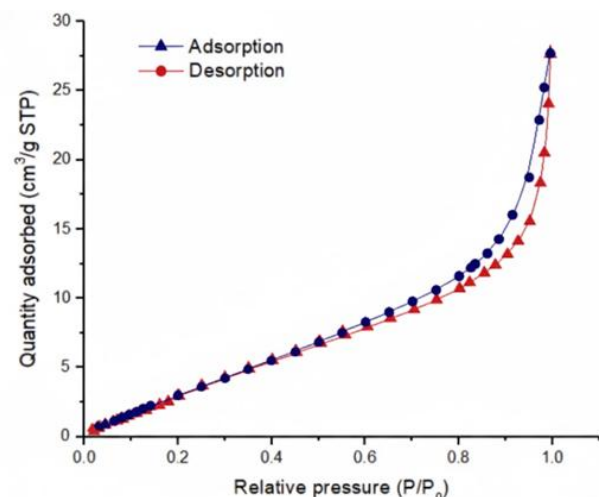


Fig. 4. Isoterma de fisisorción de N₂ de la CMC.

En comparación con otros estudios, otras biocenizas presentan áreas superficiales mucho menores, como 2.76 m²/g para mazorca de cacao a condiciones similares [31]; 7.038 m²/g para *B. nigra* [12] o 4.44 m²/g para cáscara de plátano [32]. Por tanto, la CMC posee una superficie significativamente mayor, lo que se traduce en mayor potencial catalítico frente a otros materiales de origen biogénico.

3) Análisis FTIR de CMC

El espectro FTIR (Fig.7) de la CMC calcinada a 500 °C evidenció bandas características del carbonato de potasio (K₂CO₃), con picos en 1360 cm⁻¹ (C–O), 1026 cm⁻¹ (K₂CO₃) y 878 cm⁻¹ (CO₃²⁻). También se identificaron señales en 684 cm⁻¹ (K–O, Ca–O) y 1132 cm⁻¹ (C–O de carbonatos), confirmando la presencia de óxidos y carbonatos activos de K y Ca [19], [33]-[34].

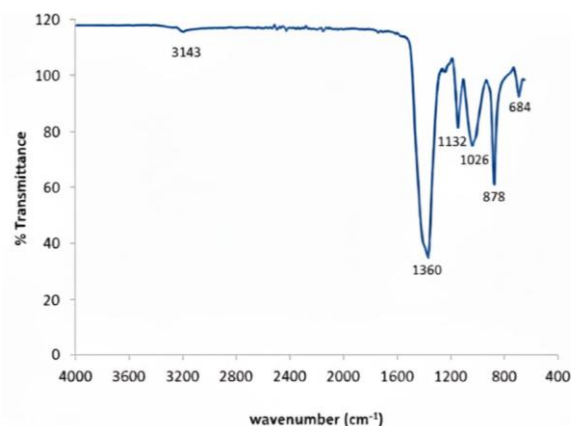


Fig. 7. Espectro FTIR del CMC.

Estos compuestos son los principales responsables de la actividad básica y catalítica del material, tal como se ha observado en otros estudios con cenizas calcinadas de biomasa [19], [32]-[34].

4) Análisis XRD de CMC

El patrón XRD del polvo de mazorca sin calcinación (Fig. 8) mostró una señal mayoritariamente amorfa (banda amplia 20–30° 2θ) y ausencia de fases cristalinas detectables, lo que indica la necesidad de un tratamiento térmico controlado para generar las fases básicas activas requeridas como catalizadores.

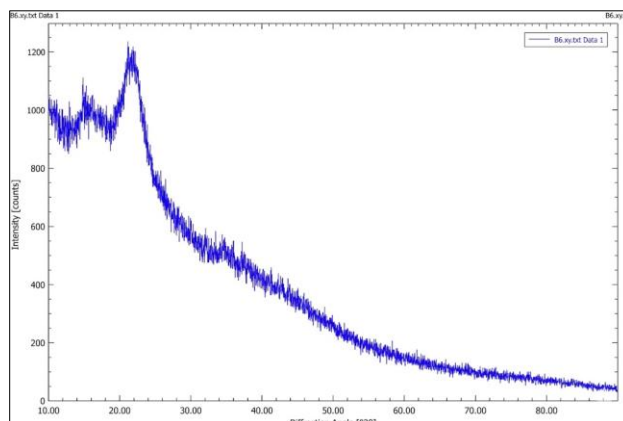


Fig. 8. Cromatograma XRD para mazorca de cacao pulverizada.

El difractograma XRD (Fig. 9) mostró picos definidos en $2\theta = 28.39^\circ$, 31.78° y 32.20° , correspondientes a silvita (KCl) y carbonato de potasio hidratado ($K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$). Otros picos en 26.74° , 33.94° y 43.04° se atribuyen a fairchildita ($K_2Ca(CO_3)_2$) [19], [33]-[34].

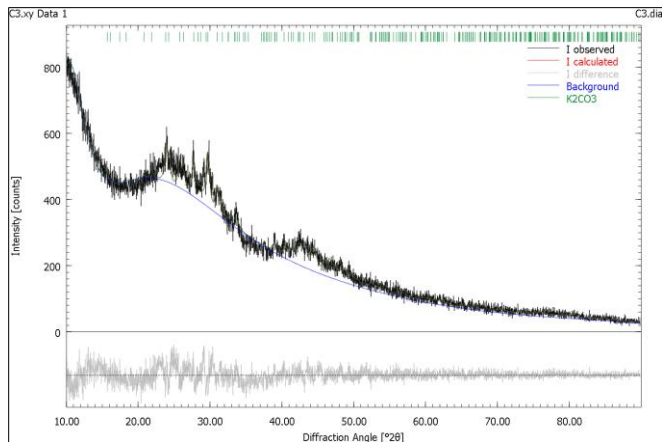


Fig. 9. Cromatograma XRD para CMC.

La presencia dominante de $K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$ y $K_2Ca(CO_3)_2$ confirma el carácter básico y altamente catalítico de la CMC. La concordancia entre los resultados de EDS, FTIR y XRD demuestra una composición rica en potasio y carbonatos, coherente con reportes previos sobre catalizadores derivados de residuos agrícolas [1], [13], [19]-[21], [28], [32], Haga clic o pulse aquí para escribir texto. [34].

B. Resultados de la obtención del biodiesel

1) Rendimiento comparado de catalizadores

El catalizador de mazorca de cacao alcanzó el mayor rendimiento en la transesterificación de aceite de cocina usado, con aproximadamente 99.0 % a una carga de 2% en peso, mientras que al incrementar la dosificación a 3% (en peso) el rendimiento se mantuvo elevado (98.9 %), evidenciando un punto óptimo cercano al 2%. El catalizador comercial de carbonato de potasio presentó rendimientos inferiores, con valores de alrededor de 96.5 % y 98.0 % a 2 % y 3 % en peso, respectivamente (Fig. 10).

Este desempeño superior del CMC concuerda con estudios que emplean catalizadores biogénicos, como los reportados por [13], [28]-[35], [36], [37], quienes alcanzaron altos rendimientos utilizando residuos agrícolas y biocarbones bajo diferentes condiciones operativas.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA de dos vías) indicaron efectos estadísticamente significativos en el rendimiento del biodiésel ($p < 0,05$). El tipo de catalizador

presentó la mayor evidencia estadística de efecto ($p < 0,001$), seguido de la interacción catalizador*cantidad ($p = 0,009$) y la cantidad de catalizador ($p = 0,022$). La significancia de la interacción evidencia que el efecto de la cantidad de catalizador depende del tipo de catalizador empleado, como se muestra en la Tabla I.

TABLA I
Análisis de varianza (ANOVA) del rendimiento de biodiésel

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Catalizador	1	12.076	12.075	41.25	0.000
Cantidad	1	2.031	2.0306	6.94	0.022
Catalizador*Cantidad	1	2.806	2.8056	9.59	0.009
Error	12	3.512	0.2927	-	-
Total	15	20.424	-	-	-

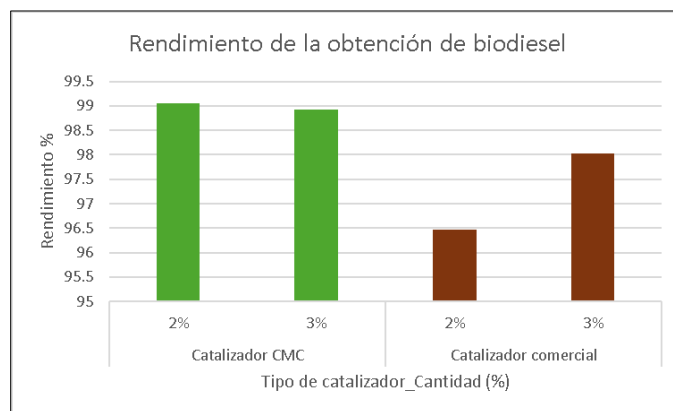


Fig. 10. Rendimiento de la obtención de biodiesel respecto a tipo de catalizador y cantidad.

2) Características comparadas del biodiesel producido

Las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido se evaluaron mediante la comparación de densidad y viscosidad cinemática con los valores establecidos por las normas ASTM D1298 y ASTM D445 respectivamente (Tabla II).

TABLA II
Comparación de las características del biodiésel con los valores de ASTM

Características		Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (mm ² /s)
Tipo de catalizador	K ₂ CO ₃ Extraído (CMC)	860-880	4.66-5.17
	K ₂ CO ₃ Comercial	820-890	5.36-5.51
ASTM D1298; ASTM D445		800-880	1.90-6.00

El biodiésel producido con K_2CO_3 extraído de mazorca de cacao presentó valores de densidad en el rango de 860–880 kg/m³ y viscosidad cinemática entre 4,66 y 5,17 mm²/s, los cuales se encuentran dentro de los límites normativos (800–880 kg/m³ y 1.90–6.00 mm²/s, respectivamente).

Resultados similares han sido reportados para biodiésel obtenido a partir de aceites residuales empleando catalizadores alcalinos, lo que confirma la adecuación de estas propiedades para su posible uso como combustible [18], [38], [39].

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la ceniza de mazorca de cacao como catalizador heterogéneo para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado, alcanzándose un rendimiento máximo de 99.0 % con una carga catalítica de 2 % en peso, mientras que al aumentar la dosificación a 3 % el rendimiento se mantuvo prácticamente igual, en 98.9 %. El catalizador comercial de K_2CO_3 presentó rendimientos inferiores, de 96.5 % y 98.0 % a 2 % y 3 % en peso, respectivamente. El catalizador derivado de mazorca de cacao mostró una composición rica en potasio (50.95 %), una estructura mesoporosa con un área superficial de 18.86 m²/g y la presencia predominante de fases carbonatadas, características que explican su elevada actividad catalítica. El biodiésel obtenido presentó valores de densidad entre 820–890 kg/m³ y viscosidad cinemática entre 5.36–5.51 mm²/s, cumpliendo con los rangos establecidos por las normas ASTM D1298 y ASTM D445 respectivamente.

Esta investigación aporta evidencia para el desarrollo de catalizadores alternativos, ecológicos y de bajo costo, promoviendo la valorización de residuos agroindustriales locales, como los generados en el Fundo Gibaja, ubicado en la provincia de La Convención, región Cusco, fortaleciendo la sostenibilidad productiva regional y contribuyendo a la reducción de los impactos ambientales negativos asociados al proceso de producción de biodiésel.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer la contribución de diversas personas e instituciones que apoyaron la presente investigación, en particular a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), a través de sus instalaciones del laboratorio de Metalurgia y la orientación técnica brindada por la Dra. Ing. Orfelinda Avalo Cortez durante la etapa de caracterización del catalizador. Del mismo modo, se agradece a la Dra. Ing. Magali Camila Vivas Cuellar por su apoyo durante el proceso de producción de biodiésel, así como a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), donde se realizaron los experimentos de biodiésel utilizando el equipamiento de laboratorio disponible.

REFERENCIAS

- [1] E. A. Olatundun, O. O. Borokini, and E. Betiku, "Cocoa pod husk-plantain peel blend as a novel green heterogeneous catalyst for renewable and sustainable honne oil biodiesel synthesis: A case of biowastes-to-wealth," *Renew. Energy*, vol. 166, pp. 163–175, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.131.
- [2] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 1, pp. 14–34, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.001.
- [3] O. A. Falowo and E. Betiku, "A novel heterogeneous catalyst synthesis from agrowastes mixture and application in transesterification of yellow oleander-rubber oil: Optimization by Taguchi approach," *Fuel*, vol. 312, p. 122999, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122999.
- [4] S. G. Pérez-Bravo, L. Aguilera-Vázquez, M. D. R. Castañeda-Chávez, and N. V. Gallardo-Rivas, "Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción," *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 25, Sep. 2022, doi: 10.22201/fesz.23958723e.2022.481.
- [5] M. Jayakumar *et al.*, "Heterogeneous base catalysts: Synthesis and application for biodiesel production – A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 331, p. 125054, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125054.
- [6] J. Sahar, M. Farooq, A. Ramli, A. Naeem, and N. S. Khattak, "Biodiesel production from Mazari palm (Nannorrhops ritchiana) seeds oil using Tungstophosphoric acid decorated SnO₂@Mn-ZIF bifunctional heterogeneous catalyst," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 643, p. 118740, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.apcata.2022.118740.
- [7] F. Ezebor, M. Khairuddean, A. Z. Abdullah, and P. L. Boey, "Oil palm trunk and sugarcane bagasse derived solid acid catalysts for rapid esterification of fatty acids and moisture-assisted transesterification of oils under pseudo-infinite methanol," *Bioresour. Technol.*, vol. 157, pp. 254–262, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.01.110.
- [8] S. Boro, B. Das, S. Brahma, B. Basumatary, S. F. Basumatary, and S. Basumatary, "Biodiesel production using areca nut (Areca catechu L.) leaf ash-K₂CO₃ catalyst via transesterification from an oil blend of three different feedstocks," *Sustainable Chemistry for the Environment*, vol. 8, p. 100164, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scenv.2024.100164.
- [9] V. Vadery *et al.*, "Room temperature production of jatropha biodiesel over coconut husk ash," *Energy*, vol. 70, pp. 588–594, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.04.045.
- [10] I. B. Laskar, R. Gupta, S. Chatterjee, C. Vanlalveni, and S. L. Rokhum, "Taming waste: Waste Mangifera indica peel as a sustainable catalyst for biodiesel production at room temperature," *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 207–220, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.07.061.
- [11] L. Porto de Souza Vandenbergh *et al.*, "Added-value biomolecules' production from cocoa pod husks: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 344, p. 126252, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126252.
- [12] O. Boysen, E. Ferrari, V. Nechifor, and P. Tillie, "Earn a living? What the Côte d'Ivoire–Ghana cocoa living income differential might deliver on its promise," *Food Policy*, vol. 114, p. 102389, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.foodpol.2022.102389.
- [13] J. B. Tarigan *et al.*, "Application of waste cocoa pod husks as a heterogeneous catalyst in homogenizer-intensified biodiesel production at room temperature," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, p. 100966, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100966.
- [14] Y. Lopez, M. Cunias, and Y. Carrasco, "Peruvian cocoa and its impact on the national economy," 2020, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000300344
- [15] MIDAGRI, "Perú, centro de origen y productor mundial de cacao orgánico," Lima, 2023. [Online]. Available:

- <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/841797-peru-centro-de-origen-y-productor-mundial-de-cacao-organico>
- [16] B. T. Asfaw, M. T. Gari, and M. Jayakumar, "Transesterification of biodiesel from non-edible oils using heterogeneous base catalysts: A comprehensive review of potential renewable biomass feedstocks," *Chemical Engineering Journal*, vol. 511, p. 162028, May 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.162028.
 - [17] M. Rahmayanti, I. Fatimah, A. Yahdiyani Ikhsani, and D. Nur Azizah, "The potential of calcium oxide nanocatalyst from chicken eggshells for biodiesel production using chicken fat waste," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 165, p. 112604, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.inoche.2024.112604.
 - [18] O. A. Olatayo, O. D. Sunday, and O. S. Olaluwoye, "Production and Characterization of Biodiesel from Castor Seed Oil Using Cocoa Pod Ash as Catalyst," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 47, no. 3, pp. 448–454, Mar. 2024, doi: 10.1002/ceat.202300351.
 - [19] E. Betiku, A. M. Akintunde, and T. V. Ojumu, "Banana peels as a biobase catalyst for fatty acid methyl esters production using Napoleon's plume (*Bauhinia monandra*) seed oil: A process parameters optimization study," *Energy*, vol. 103, pp. 797–806, May 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.138.
 - [20] A. Buasri, C. Unkaew, P. Sawatkoed, P. Pipattananchaiyanan, and V. Loryuenyong, "Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production parameters from waste vegetable oil using N-(2-hydroxy) propyl-3-trimethyl ammonium chitosan chloride-based catalyst," *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 50–59, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.sajce.2023.10.004.
 - [21] O. Amos, D. S. Ogunniyi, and T. E. Odetoeye, "Production of biodiesel from <i>Parinari polyandra B.<i> seed oil using bio-based catalysts," *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 13, no. 1, p. 26, Sep. 2016, doi: 10.4314/njtd.v13i1.5.
 - [22] I. de Araújo Sobrinho, T. S. Ribeiro, A. C. Dias e Silva, M. Arrais Gonçalves, G. N. da Rocha Filho, and L. R. Vieira da Conceição, "Catalytic solid derived from residual bean husk biomass applied to sustainable biodiesel production: preparation, characterization, and regeneration study," *RSC Adv.*, vol. 15, no. 9, pp. 7050–7068, 2025, doi: 10.1039/D5RA01195G.
 - [23] D. Rachmat, L. J. Mawarani, and D. D. Risanti, "Utilization of Cacao Pod Husk (*Theobroma cacao* L.) as Activated Carbon and Catalyst in Biodiesel Production Process from Waste Cooking Oil," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 299, p. 012093, Jan. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/299/1/012093.
 - [24] C. Ofori-Boateng and K. T. Lee, "The potential of using cocoa pod husks as green solid base catalysts for the transesterification of soybean oil into biodiesel: Effects of biodiesel on engine performance," *Chemical Engineering Journal*, vol. 220, pp. 395–401, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.01.046.
 - [25] A. A. Babadi *et al.*, "Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities," *Biomass Bioenergy*, vol. 163, p. 106521, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106521.
 - [26] Md. S. Mujaheed Khan, P. Kumar, I. Ansari, and N. Sahoo, "Experimental analysis of diesel engine characteristics powered with Al₂O₃ doped mesua ferrea linn vegetable oil-diesel blend," *Fuel*, vol. 381, p. 133251, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2024.133251.
 - [27] Ali Nasr Abdulkareem and Nurul Fitriah Nasir, "A Comprehensive Review of Biodiesel Production using Heterogeneous Catalyst," *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 103–115, Aug. 2024, doi: 10.37934/armne.22.1.103115.
 - [28] T. F. Soares and M. B. P. P. Oliveira, "Cocoa By-Products: Characterization of Bioactive Compounds and Beneficial Health Effects," *Molecules*, vol. 27, no. 5, p. 1625, Mar. 2022, doi: 10.3390/molecules27051625.
 - [29] Monika, S. Banga, and V. V. Pathak, "Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts," *Energy Nexus*, vol. 10, p. 100209, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100209.
 - [30] S. Modupe Abati *et al.*, "Biodiesel production from spent vegetable oil with Al₂O₃ and Fe₂O₃-biobased heterogenous nanocatalysts: Comparative and optimization studies," *Fuel*, vol. 364, p. 130847, May 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130847.
 - [31] M. Gohain *et al.*, "Carica papaya stem: A source of versatile heterogeneous catalyst for biodiesel production and C–C bond formation," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 541–555, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.016.
 - [32] A. K. Rajak *et al.*, "Valorising orange and banana peels: Green catalysts for transesterification and biodiesel production in a circular bioeconomy," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, p. 105804, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jtice.2024.105804.
 - [33] M. Gohain *et al.*, "Carica papaya stem: A source of versatile heterogeneous catalyst for biodiesel production and C–C bond formation," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 541–555, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.016.
 - [34] M. Sharma, A. A. Khan, S. K. Puri, and D. K. Tuli, "Wood ash as a potential heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis," *Biomass Bioenergy*, vol. 41, pp. 94–106, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.02.017.
 - [35] C. B. Ezekannagha, O. D. Onukwuli, I. A. Nnanwube, U. L. Ezeamaku, and C. M. Ohaegbulam, "Green hetero-alkali catalyst in optimized waste lard oil transesterification for biodiesel synthesis," *Results Chem.*, vol. 11, p. 101797, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101797.
 - [36] R. Foroutan, M. Foroughi, A. Tutunchi, B. Ramavandi, D. Terrón, and M. Pazos, "Production of biodiesel from waste cooking oil and non-edible *M. oleifera* oil utilizing a CaO/CuFe₂O₄/LaTiO₃ Perovskite@Na bifunctional heterogeneous nanocatalyst," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 4, p. 117261, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.117261.
 - [37] H. C. L. dos Santos, M. A. Gonçalves, G. N. da Rocha Filho, and L. R. V. da Conceição, "Environmentally sustainable production of biodiesel from waste edible oil using Mn–Fe supported magnetic acid heterogeneous catalyst: Optimization via Taguchi L9 technique," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 45, p. 102030, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.scp.2025.102030.
 - [38] O. J. Anekwe-Nwekeaku, C. O. Aniagor, and L. C. Osuji, "Biodiesel production from selected seed oils: Characterization, effect of process variables on biodiesel yield and engine performance testing," *Next Energy*, vol. 8, p. 100322, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.nxener.2025.100322.
 - [39] Z. Al-Hamamre, A. Sandouqa, B. Al-Saida, R. A. Shawabkeh, and M. Alnaief, "Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous KNO₃/Oil shale ash catalyst," *Renew. Energy*, vol. 211, pp. 470–483, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.025.