



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN QUÍMICA

TESIS

**EVALUACIÓN DE CATALIZADORES DERIVADOS DE RESIDUOS
DE LA CONSTRUCCIÓN IMPREGNADOS CON CaO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.**

Para obtener el título de
Licenciada en Química

PRESENTA

Mary Cruz Espinosa Morales

Directora

Dra. Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez

Codirector

Dr. Jesús Andrés Tavizón Pozos

Pachuca de Soto, Hgo., México, noviembre 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de octubre de 2025

Número de control: ICBI-D/1862/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química **Mary Cruz Espinosa Morales**, quien presenta el trabajo de titulación **"Evaluación de catalizadores derivados de residuos de la construcción impregnados con CaO para la producción de biodiésel"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Claudia Coronel Olivares

Secretario: Dra. Araceli Castañeda Ovando

Vocal: Dra. Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez

Suplente: Dr. Jesús Andrés Tavizón Pozos

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/YCC



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

“En este lugar perdemos demasiado tiempo mirando hacia atrás. Camina hacia el futuro, abriendo nuevas puertas y probando cosas nuevas, se curioso... porque nuestra curiosidad siempre nos conduce por nuevos caminos”

-Walt Disney

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá por haberme ayudado en todo este proceso; sin ella no hubiera podido cumplir mi sueño de estudiar lo que me gusta. También a mi hermana, quien con sus consejos y su apoyo me ayudó a superar varios retos durante estos cinco años. Ojalá que papá este orgulloso de nosotras.

Agradezco al Dr. Andrés Tavizón por ayudarme, guiarme y darme la libertad de elegir e investigar este tema nuevo. Le agradezco por haber confiado en mí para este trabajo y, por último, por todos sus consejos, que me han servido mucho y que pongo en práctica de ahora en adelante.

Agradezco a la Dra. Gabriela Vázquez por haberme adoptado y aceptado en su laboratorio durante este trabajo. También le agradezco todo el tiempo, paciencia, esfuerzo y sabiduría que ha compartido conmigo.

Agradezco a mis amigos que me han acompañado en este proceso, sobre todo a Monse Ibarra. Por todo lo que compartimos y aprendimos durante 5 años, gracias Abril, Gloria, Juanjo, Diego e Iván.

Índice

Resumen	1
Introducción	3
Capítulo 1. Marco teórico	5
1.1. Materias primas del biodiesel	5
1.1.1 Biodiesel de aceites vegetales comestibles	5
1.1.2 Biodiesel de grasas animales	5
1.1.3 Biodiesel de aceites comestibles usados	6
1.1.4 Biodiesel de aceites no comestibles	6
1.1.5 Biodiesel de microalgas	6
1.1.6 Calidad del biodiesel	7
1.2. Reacción de transesterificación	7
1.3. Catalizadores para la producción de biodiesel	9
1.3.1 Catalizadores homogéneos	9
1.3.2 Catalizadores heterogéneos	10
1.4. Óxido de calcio	13
1.5. Residuos de la construcción y la demolición	16
1.6. Zeolitas de tipo mordenita	17
Capítulo 2. Justificación, hipótesis y objetivos.	20
2.1 Justificación	20
2.2. Hipótesis	20
2.3. Objetivo general	21
2.4. Objetivos específicos	21
Capítulo 3. Metodología	22
3.1 Síntesis de catalizadores	22
3.2 Caracterización de los catalizadores	22
3.2.1 Difracción de Rayos X	22
3.2.2. Basicidad y cuantificación de sitios básicos	23
3.2.3. Microscopia digital	23
3.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	23
3.3. Evaluación catalítica	24
3.3.1. Reacción de transesterificación de aceite de canola	24

3.3.2. Evaluación de los ciclos de reutilización	24
3.4. Caracterización del biodiesel	25
3.4.1. Densidad relativa	25
3.4.2. Viscosidad	25
3.4.3. Índice de saponificación	25
3.4.4. Índice de acidez	26
3.4.5. Índice de yodo	26
3.4.6. Índice de peróxido	27
3.4.7. Oxitest.....	27
3.4.8. Espectroscopia de infrarrojo	27
Capítulo 4. Resultados y discusión	28
4.1. Caracterización de catalizadores	28
4.1.1. Difracción de rayos X	28
4.1.2. Basicidad y cuantificación de los sitios básicos totales.....	33
4.1.3 Microscopía digital	35
4.1.4 Microscopía electrónica de barrido.....	37
4.2 Evaluación catalítica	42
4.2.1 Reacción de transesterificación de aceite de canola	42
4.2.2 Evaluación de los ciclos de reutilización.....	44
4.3 Caracterización del biodiesel.....	46
4.3.1 Oxitest.....	47
4.3.2 Espectroscopia de infrarrojo	48
Capítulo 5. Conclusiones	50
Capítulo 7. Referencias.....	52
Capítulo 8. Anexos.....	61
Anexo A.....	61
Anexo B.....	67

Resumen

La creciente demanda de fuentes energéticas alternativas frente a la dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado el desarrollo de biocombustibles como el biodiesel. Este biocombustible, obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante transesterificación, representa una opción renovable y menos contaminante. Sin embargo, su producción enfrenta limitaciones relacionadas con el tipo de catalizadores empleados. Los sistemas homogéneos, aunque efectivos, presentan problemas de separación y reciclaje, lo que incrementa costos e impacto ambiental. En este contexto, los catalizadores heterogéneos, particularmente el óxido de calcio (CaO), surgen como alternativa prometedora por su bajo costo, alta actividad básica y facilidad de recuperación. No obstante, el CaO puro exhibe desventajas como su rápida desactivación, higroscopicidad y lixiviación, lo que motiva la búsqueda de soportes que mejoren su estabilidad y desempeño.

El objetivo general de esta investigación fue evaluar la eficiencia de catalizadores de CaO soportados en materiales derivados de residuos de construcción y demolición —mordenita natural, ladrillo y agregados de concreto— en la producción de biodiesel a partir de aceite de canola fresco. Para ello, se propuso impregnar CaO obtenido de cáscaras de huevo sobre dichos soportes, con el propósito de potenciar la densidad y fortaleza de los sitios básicos superficiales y, en consecuencia, incrementar el rendimiento del biocombustible.

La metodología comprendió la síntesis de catalizadores con diferentes cargas de CaO (60, 70 y 80 % p/p), su caracterización estructural, morfológica y ácido-básica mediante difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, análisis de basicidad y cuantificación de sitios activos. Posteriormente, se evaluó su desempeño en reacciones de transesterificación de aceite de canola bajo condiciones controladas, así como su capacidad de reutilización en ciclos sucesivos. Finalmente, el biodiesel obtenido se sometió a pruebas fisicoquímicas de calidad, incluyendo densidad, viscosidad, índices de acidez, yodo y saponificación, además de análisis de estabilidad oxidativa y espectroscopía infrarroja.

Los resultados evidenciaron que la impregnación de CaO sobre los soportes seleccionados favoreció la formación de fases cristalinas activas (Ca(OH)_2 y CaCO_3), incrementando el número de sitios básicos totales. El catalizador soportado en ladrillo con 80 % de CaO mostró la mayor

basicidad, mientras que los sistemas con mordenita y agregados de concreto presentaron una mejor interacción con las fases de calcio. En las pruebas catalíticas, los materiales demostraron alta actividad en la conversión de aceite de canola a biodiesel, con rendimientos competitivos respecto al CaO puro y con la ventaja de una mayor estabilidad y posibilidad de reutilización.

En conclusión, la investigación confirma que los residuos de construcción y la mordenita natural son soportes viables para estabilizar al CaO, permitiendo el diseño de catalizadores heterogéneos sustentables. Esta estrategia no solo contribuye a optimizar la producción de biodiesel de primera generación, sino que también promueve la valorización de residuos y la transición hacia un modelo energético más limpio y circular.

Introducción

Los aceites vegetales constituyen una combinación compleja de triglicéridos, fosfolípidos, ácidos grasos y otros compuestos que proporcionan nutrientes, color y aroma. A través del proceso de transesterificación, los triglicéridos reaccionan con metanol en presencia de un catalizador básico, comúnmente NaOH o KOH, lo que da lugar a la producción de ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol¹ (Castellar-Ortega et al., 2014). Este procedimiento se realiza a presión atmosférica y una temperatura de 60 - 65 °C, que depende de la temperatura de ebullición del metanol en función de la altitud (Hernández-Martínez et al., 2023). Por consiguiente, el proceso resulta ser simple y económico, tanto en materia prima como de consumo energético.

El NaOH se diluye en metanol, lo que lo hace altamente eficiente por su condición homogénea. Por esta razón, el catalizador es difícil de recuperar, ya que para removerlo se requiere neutralizar los productos y subproductos con ácidos y agua, con el riesgo de saponificar el producto final. Para solucionar esto, se ha propuesto el uso de catalizadores sólidos, tal como el CaO, el cual tiene carácter básico y se obtiene de fuentes naturales, como el cascarón de huevo, piedra caliza o conchas marinas (Shan et al., 2016). Diversos estudios reportan alta actividad catalítica del CaO en la transesterificación de aceites frescos o usados. Por ejemplo, las cáscaras de huevo provenientes de la industria alimentaria pueden transformarse en CaO, ya que se componen principalmente de CaCO₃ y de otros compuestos de Mg y P (Ahmad et al., 2020). No obstante, uno de los principales desafíos asociados con el uso de CaO es su lixiviación, debido a la afinidad que presenta hacia los componentes de la mezcla reaccionante y a su baja resistencia mecánica. Por lo anterior, se ha propuesto combinarlo o soportarlo en otros materiales para que las interacciones del Ca con otro material, tal como sílice o alúmina, le brinden estabilidad (Tangy et al., 2020).

Para acercar más la producción de biodiesel a la sostenibilidad a través de un enfoque de economía circular y química verde, es deseable utilizar en el proceso materiales que se hayan obtenido de residuos. Por ejemplo, los residuos de la construcción y la demolición (RCD) son materiales abundantes cuyo reúso es necesario, ya que pueden contribuir a la contaminación visual y del suelo en el cual son depositados, y tienen efectos negativos en la flora y fauna local (Ceballos-Medina et al., 2021). Por su composición, es posible que algunos de los componentes de los RCD puedan contribuir con sitios activos para la generación de biodiesel. Es el caso del ladrillo que, al

¹ En este proceso también se puede utilizar etanol para generar ésteres etílicos de ácidos grasos.

estar formado principalmente por feldespato dopado con K, Na o Ca, podría contribuir con la actividad catalítica² (Abu-Ghazala et al., 2022). No se han reportado aplicaciones catalíticas previas de estos materiales, lo que justifica su estudio. En ese contexto, se plantea la síntesis y evaluación de catalizadores con CaO y residuos de construcción y demolición tales como ladrillos agregados de concreto y una toba zeolítica, con el objetivo de obtener materiales alcalinos sostenibles para la producción de biodiesel de primera generación a partir de aceite de canola.

² El feldespato puede ser KAlSi_3O_8 (ortoclasa), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albita) o $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anortita).

³El carbonato de calcio (CaCO_3) constituye entre el 94 % y 98 % del peso de la cáscara de huevo.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. Materias primas del biodiesel

El biodiesel es un combustible producido a partir de materias primas renovables tales como aceites vegetales o grasas animales mediante los procesos de transesterificación y esterificación. Cabe señalar que una sola de estas fuentes no es suficiente para cubrir la demanda de combustible (Nasreen et al., 2018). Por lo tanto, se requiere de la combinación de varias de estas formas de producción de biodiesel, otras formas de biocombustibles y energías renovables para lograr la sinergia adecuada.

1.1.1 Biodiesel de aceites vegetales comestibles

Los aceites vegetales comestibles se obtienen, según la NMX-F-223-SCFI-2011, a partir de plantas oleaginosas con semillas como ajonjolí, canola, girasol, maíz, olivo, palma, por mencionar solo algunos, que contienen triglicéridos (Secretaría de Economía, 2011). El uso de aceites vegetales en la producción de biodiesel conlleva algunas limitaciones importantes. Se observa una alta viscosidad en el biocombustible final, junto con una baja volatilidad y reactividad de sus hidrocarburos insaturados. Sumado a esto, la demanda de grandes áreas de cultivo, consumo de agua y deforestación asociados a la obtención de plantas oleaginosas representa un inconveniente significativo (Castellar-Ortega et al., 2014; Palitsakun et al., 2021). Aunado a esto, la producción de biodiesel de aceites comestible entra en competencia directa con la alimentación.

1.1.2 Biodiesel de grasas animales

Los residuos de grasas animales tienen un mayor contenido de ácidos grasos que los aceites vegetales, por lo que son funcionales para la producción de biodiesel (Sandoval et al., 2009). Las grasas animales pueden obtenerse de cerdo, pollo y res, que son las proteínas más utilizadas en la preparación de alimentos. Además, esta materia prima tiene una alta disponibilidad; por ejemplo, se estima que en EUA se producen hasta 470 millones de toneladas de este residuo (Canakci, 2005). Esto eliminaría la controversia sobre el uso de cultivos, semillas oleaginosas y aceites vegetales para producir biodiesel.

1.1.3 Biodiesel de aceites comestibles usados

El aceite vegetal usado se considera un residuo de la industria alimentaria cuya descarga al agua y suelo es altamente contaminante (Moya y Salazar, 2020). Por lo tanto, es conveniente utilizarlo como materia prima para la fabricación de biodiesel o jabones debido a su alto contenido de ácidos grasos libres. Si bien se puede convertir eficientemente este residuo en biodiesel, uno de los principales desafíos de este proceso es adecuarlo, ya que requiere una etapa previa de esterificación que exige el uso de H_2SO_4 o HCl como catalizador, mayores tiempos de reacción, neutralización y el subsiguiente paso de transesterificación alcalina (Villadiego et al., 2015).

1.1.4 Biodiesel de aceites no comestibles

Los aceites no comestibles se extraen de semillas que no son aptas para el consumo humano porque pueden contener sustancias tóxicas (Shaah et al., 2021). Este tipo de aceite es abundante y no compite con su uso alimentario. Algunos ejemplos de aceites no comestibles son los provenientes de semilla de Koroch, lino, caucho, ricino, tabaco, amapola espinosa mexicana, por mencionar algunos (Atabani et al., 2012). Se pueden utilizar para el proceso de transesterificación, aunque producen biodiesel de alta viscosidad y baja volatilidad, lo que sería un problema para los motores de encendido por compresión. Este problema puede solucionarse reduciendo la viscosidad mezclándolo con el diésel tradicional o con otros tipos de biodiesel (Demirbas et al., 2016).

1.1.5 Biodiesel de microalgas

Las algas y microalgas son organismos fotosintéticos que pueden tener un alto contenido de ácidos grasos y polisacáridos, por lo que se puede producir biodiesel o bioetanol a partir de ellos (Marcos-Martín et al., 2008). La ventaja de esta materia prima es requiere menor uso de suelo y agua de las esclusas para generar las microalgas en comparación con la producción de aceites vegetales, la cual demanda un uso considerable de estos recursos. Sin embargo, este método requiere condiciones ambientales de temperatura, pH y nutrimentos adecuados para el crecimiento de las algas (Unpaprom et al., 2015). Además, las algas están constituidas mayormente por agua, por lo que se requieren grandes cantidades para generar biodiesel suficiente para cubrir parte de la demanda (Lan et al., 2018).

1.1.6 Calidad del biodiesel

Las propiedades del biodiesel pueden cambiar en función de la calidad de la materia prima utilizada, es decir, del tipo de aceite y la calidad de la cosecha. A su vez, la calidad, el desempeño y la funcionalidad del biodiesel en los motores se basan en sus propiedades fisicoquímicas. Diversas normas, como las establecidas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) y las Normas Europeas (EN por sus siglas en inglés), definen parámetros de calidad del biodiesel. La norma mexicana NMX-AA-174-SCFI-2015 basa los valores de estos parámetros en la norma estadounidense ASTM D6751. Algunos valores de propiedades fisicoquímicas se exponen en la [Tabla 1](#) junto con su comparación con el diesel.

Tabla 1. Parámetros de calidad del biodiesel y su comparación con diesel.

Propiedad	Unidad	Diésel		Biodiesel	
		ASTM D975	EN 590	ASTM D6751	EN 14214
Viscosidad	mm ² /s ²	1.9-4.1	2.0-4.5	1.9-6.0	2.0-4.5
Densidad a 15 °C	kg/cm ³	0.820- 0.60	0.820-0.845	0.860-0.900	0.860-0.900
Punto de inflamación	°C	52	55	101	101
Valor de ácido	mg KOH/ g	0.5	-	0.50	-
Valor de yodo	g I ₂ / 100	-	120	-	120

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

EN: Normas Europeas

1.2. Reacción de transesterificación

Los componentes principales del biodiesel son ésteres alquílicos de ácidos grasos, obtenidos mediante la reacción de transesterificación y esterificación³ (Ernestina et al., 2025). Este proceso químico involucra la reacción de un triglicérido con tres moléculas de un alcohol de bajo peso molecular, que usualmente es metanol o etanol debido a su alta reactividad y bajo costo. Como productos, se obtienen tres moléculas de ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y una molécula de glicerol. Esta reacción requiere la presencia de un catalizador básico en fase homogénea, tal como NaOH o KOH, para realizar la metanólisis.

⁴ En la esterificación un ácido graso libre reacciona con metanol para dar un éster metílico de ácido graso y agua. Esta reacción es más eficiente en la presencia de un catalizador ácido.

Similar a la transesterificación, la esterificación ocurre cuando se hace reaccionar ácidos grasos libres con un alcohol para producir ésteres y agua en presencia de un catalizador ácido, tal como H_2SO_4 o HCl . Este proceso usualmente es previo a la transesterificación para eliminar los ácidos grasos libres (Arenas et al., 2020). Asimismo, es importante remover el agua producida para evitar la saponificación durante la transesterificación. La generación de ésteres de ácidos grasos no se limita a la producción de biodiesel, sino que también genera glicerol, que es un insumo para otros productos, tales como cosméticos, disolventes, aditivos, lubricantes, humectantes, excipientes, entre otros. Las reacciones globales de esterificación y transesterificación se exponen en la [Figura 1](#).

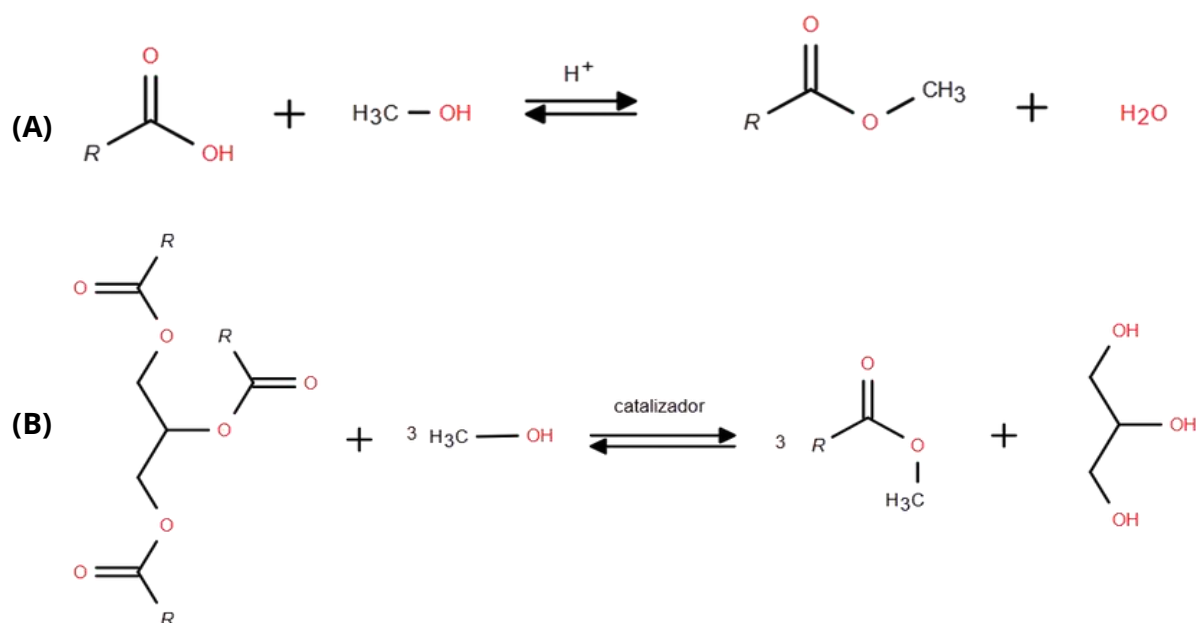


Figura 1. Reacciones globales de esterificación de ácidos grasos (A) y transesterificación de triglicéridos (B) (Lee et al., 2014).

La reacción se lleva a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del alcohol utilizado. En la reacción, los triglicéridos se transforman en diglicéridos, luego en monoglicéridos y en cada paso se libera una molécula de alquil éster (Tran et al., 2016). Si bien la reacción parece sencilla, involucra procesos complejos tales como cambios de densidad, viscosidad y equilibrio entre las fases polares y no polares, lo que afecta a la velocidad de la reacción. Esto se debe a la diversidad de la longitud y saturación de los triglicéridos de cada aceite. Al finalizar, se obtienen dos fases, el biodiesel y el glicerol, separadas por su distinta polaridad (Knothe y Razon, 2017).

La cinética de la transesterificación es compleja debido a diferentes factores, entre ellos la composición del aceite, la cantidad de catalizador, el alcohol utilizado y su cantidad, el tiempo y la temperatura de reacción. Para determinar los parámetros cinéticos de la reacción, se puede considerar truncar la reacción global de triglicéridos a ésteres tomando en cuenta los pasos intermedios como demasiado rápidos; o bien, se pueden contemplar estos pasos intermedios, pero esto aumenta la complejidad de los cálculos (Andreo-Martínez et al., 2018). Termodinámicamente la transesterificación es una reacción endotérmica y endergónica, es decir, que requiere energía para llevarse a cabo y para iniciarse, la cual obtiene del calentamiento y la metanólisis (Tavizón-Pozos y Cruz-Aburto, 2023).

1.3. Catalizadores para la producción de biodiesel

1.3.1 Catalizadores homogéneos

En la transesterificación industrial se utilizan catalizadores de NaOH o KOH en fase homogénea, ya que son altamente activos, económicos y accesibles (Fattah et al., 2020). Sin embargo, algunos catalizadores homogéneos solo pueden emplearse para transesterificar materias primas con un bajo contenido de ácidos grasos libres, el cual debe ser menor al 2 % en peso, y que tengan menos del 4 % de agua para evitar la saponificación (Ruhul et al., 2015). En la [Figura 2](#) se muestra el mecanismo de reacción de la transesterificación de triglicéridos en presencia de un catalizador alcalino homogéneo.

El primer paso muestra la desprotonación del alcohol con una base, lo cual genera un alcóxido. Este, al ser un nucleófilo más fuerte, ataca en el paso 2 al carbono del carbonilo, y forma un intermediario tetraédrico aniónico. En el paso 3, la carga negativa del O^- de este intermediario forma un doble enlace, y genera un alcóxido como grupo saliente. Finalmente, en el paso 4, la carga negativa del oxígeno del alcóxido extrae un protón de la molécula de H_2O , lo que produce un alcohol y un ion OH^- (Leung et al., 2009).

Los catalizadores homogéneos son muy utilizados en la industria porque permiten operar a temperaturas de reacción no tan elevadas y a presión atmosférica. Además, bajo condiciones óptimas, se puede obtener una alta conversión, lo que los hace económicamente viables. No obstante, la principal desventaja es su sensibilidad al agua y su alta corrosividad. Para eliminarlos de los productos de la reacción se requiere agua y es difícil recuperarlos, lo que implica un costo elevado e impacto ambiental (Talha y Sulaiman, 2016). Con base en esto es importante desarrollar

nuevos materiales que sean altamente activos, resistentes mecánicamente y a los cambios estructurales durante la reacción, y sustentables (García-Serna et al., 2022).

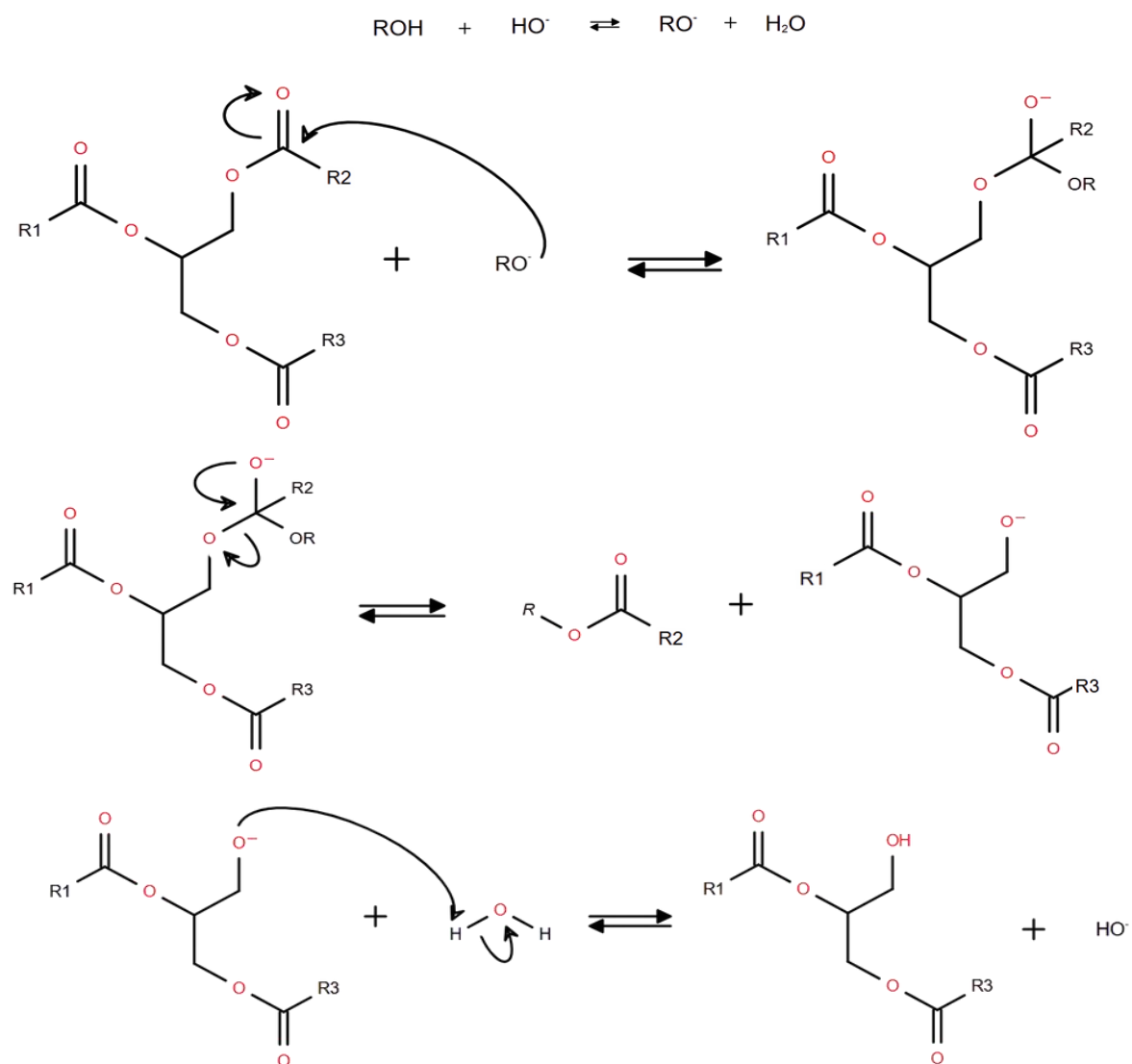


Figura 2. Mecanismo de reacción de catálisis homogénea básica (Nabgan et al., 2022).

1.3.2 Catalizadores heterogéneos

Los catalizadores sólidos han aparecido como una alternativa viable a los homogéneos, ya que pueden ser de bajo costo, poco solubles o insolubles en los reactivos y productos, recuperables y reutilizables en más de un ciclo, inocuos y no corrosivos, lo que disminuye el impacto ambiental (Benente et al., 2024). No obstante, debido a que están en una fase distinta a los reactivos, su

polaridad influye mucho en su desempeño, además de que intervienen fenómenos de transporte de materia importantes que podrían limitar la reacción (Cordovés-Herrera et al., 2013).

Los óxidos de metales alcalinotérreos han sido estudiados como catalizadores sólidos altamente básicos y activos en la transesterificación de aceites. Los sitios básicos contenidos en estos catalizadores son generados por el ion metálico que se comporta como un ácido de Lewis y el anión proveniente del oxígeno, el cual es una base de Brønsted (Castellar-Ortega et al., 2014). En la Figura 3 se muestra el mecanismo de reacción superficial.

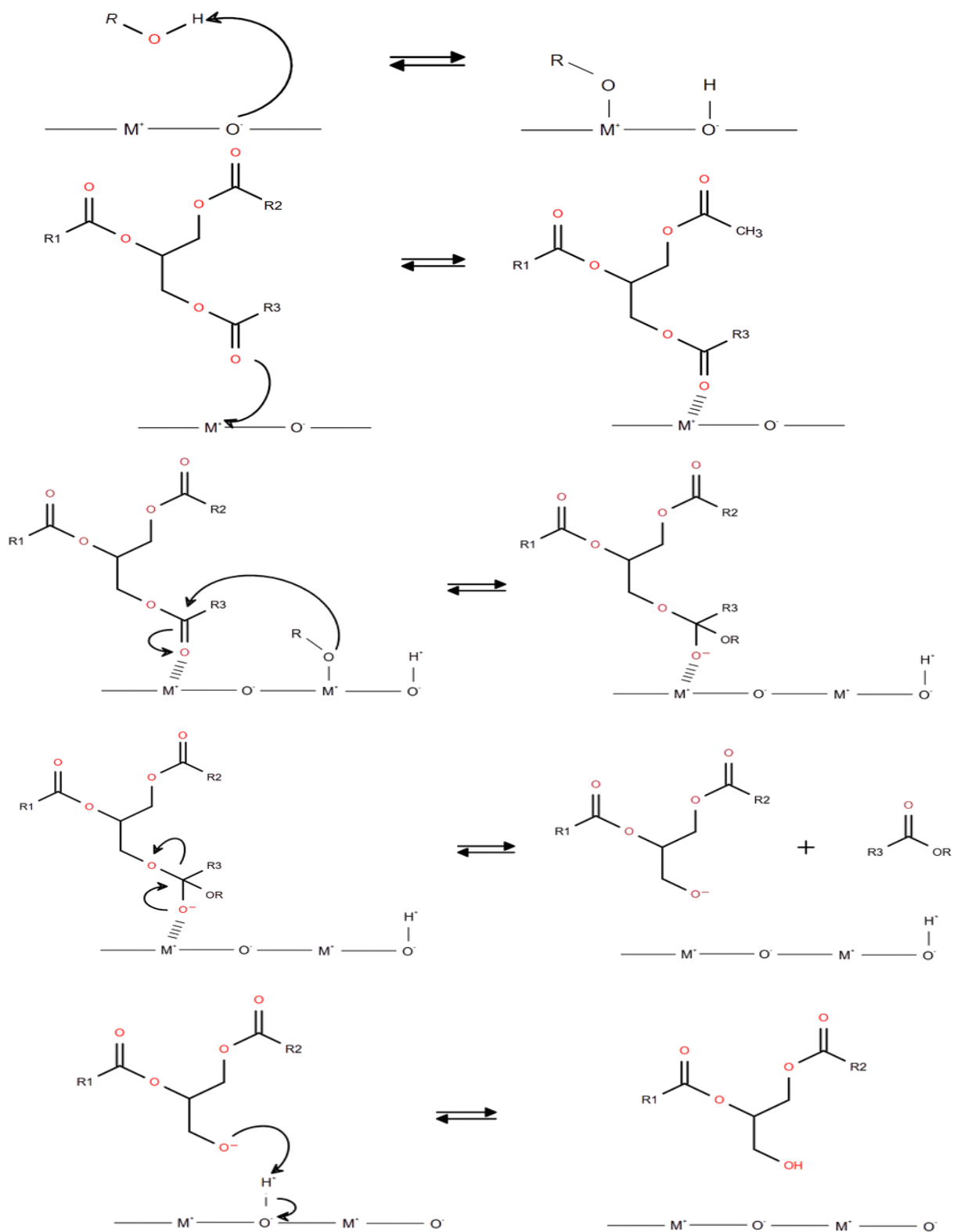


Figura 3. Mecanismo de reacción de la catálisis heterogénea de la transesterificación (Castellar-Ortega et al., 2014).⁴

⁴ Donde M^+ es la carga parcial del metal y el O^- es la carga parcial del oxígeno.

En el primer paso de la [Figura 3](#) ocurre la metanólisis, donde el alcohol reacciona con los sitios activos del catalizador. De esta manera, el O^- de la superficie del catalizador con su carácter de base de Brønsted toma un H^+ del alcohol, mientras que el alcóxido se adsorbe en el sitio ácido de Lewis del metal. En el segundo paso, el triglicérido se coordina a través de un oxígeno al metal en la superficie del catalizador, mientras el alcóxido (que se adsorbió en otro sitio metálico) ataca nucleofílicamente al carbono del carbonilo. Así, se forma un intermediario tetraédrico en el que la carga negativa del oxígeno forma un doble enlace, liberando un éster metílico y dejando como grupo saliente al alcóxido. Este último, a su vez, abstrae un H^+ y forma un alcóxido. Este proceso, que ocurre por pasos, se repite varias veces hasta formar ésteres metílicos y glicerol (Tavizón-Pozos y Cruz-Aburto, 2023).

1.4. Óxido de calcio

Como se mencionó, los óxidos de metales alcalinotérreos han sido los más estudiados en la transesterificación de aceites. Se sabe que los óxidos metálicos como el CaO , MgO , SrO y BaO contienen sitios básicos activos en su superficie, lo que les proporciona una basicidad adecuada para producir biodiesel, y que al mezclar estas bases entre ellas o con diferentes compuestos se puede mejorar el rendimiento para la producción de biodiesel (Castellar-Ortega et al., 2014). Según Ameen et al. (2022), las bases de óxidos alcalinotérreos se pueden mezclar con fluoruros (fluoruro alcalino), lo que incrementa su basicidad y por lo tanto su rendimiento en catálisis.

Particularmente, el CaO destaca por ser un material altamente activo y abundante en la naturaleza, lo que lo convierte en un material económico, accesible y sustentable. El CaO se puede conseguir directamente a partir de sales de calcio como nitratos o acetatos, piedra caliza, cáscaras de huevo, caparazones de crustáceos (langosta), huesos de animales o conchas de moluscos (Basumatary et al., 2023). Las fuentes naturales del CaO son ricas en, o bien están formadas por, $CaCO_3$, el cual se descompone en CaO a altas temperaturas ($> 800\text{ }^{\circ}C$)⁵ (Goli y Sahu, 2018). La síntesis del catalizador tiene un impacto directo en la calidad, cantidad y distribución de los sitios activos, así como en otras propiedades tales como hidrofobicidad y estabilidad (Rodríguez-Gregorich y

⁵ Se encuentra en cualquiera de sus fases, vaterita, aragonita o calcita.

Ramos-Sánchez, 2011). El CaO es un polvo fino y blanco con un peso molecular de 56.077 g/mol y una densidad de 3.34 g/cm³. Posee un punto de fusión de 2572 °C y una solubilidad de entre 0.03-0.04 mg/ml en metanol. Estas propiedades son las que favorecen la catálisis heterogénea en reacciones de transesterificación (Zul et al., 2021).

El cascarón de huevo de gallina es un residuo muy abundante, ya que es un resto del desayuno diario de muchas familias. Los cascarones están conformados en un 96 % por CaCO₃, y el resto por magnesio, fósforo y azufre. Esto lo convierte en materia prima sustentable para la obtención de CaO, ya que puede usarse como fertilizante después de su vida útil. Asimismo, el CaO, en su forma de piedra caliza, es muy utilizado en diversas industrias; se emplea en la fabricación de acero, la creación de materiales de construcción, la agricultura y la pintura, entre otros usos. Dado que la cáscara de huevo tiene un alto porcentaje de este óxido, puede reemplazar la piedra caliza en las aplicaciones mencionadas (Ahmed et al., 2021). Con base en lo anterior, diversos estudios a lo largo de las últimas dos décadas han propuesto el uso de cáscara de huevo calcinada como catalizador, tales como los que se muestran en la [Tabla 2](#).

Tabla 2. Estudios que han usado cáscara de huevo para la obtención de CaO como catalizador de la transesterificación de aceites

Aceite	Condiciones*				Rendimiento (%)	Referencia
	T (°C)	M/A	C (%)	T (h)		
Aceite de palma	60	12:1	10	2	70.86	Viriya Empikul et al., 2012
Aceite de cocina usado	65	12:1	5	1	94.52	Niju et al., 2014
Aceite de cocina usado	65	12:1	1.5	2	94	Tan et al., 2015
Aceite de palma	65	9:1	20	4	92	Buasri et al., 2013

*Donde T es temperatura, M/A la relación metanol/aceite, C es la carga de catalizador y t es tiempo.

Como se puede observar, a pesar de las diferentes condiciones de reacción, en los trabajos realizados se mantienen algunos rangos de la cantidad de metanol, la cantidad de catalizador y el

tiempo de reacción. La temperatura por lo general se mantiene cerca de la temperatura de ebullición del metanol, mientras que la cantidad de metanol y catalizador podría variar dependiendo de la fuerza de los sitios activos y la calidad del aceite. El tiempo de reacción oscila entre una y cuatro horas, lo cual sería conveniente para un proceso industrial, y demuestra la eficiencia de este tipo de materiales.

Ahora bien, en estudios recientes se utilizó cáscara de huevo calcinada a 1000 °C en la transesterificación de grasa de pollo. Antes de la reacción, la grasa se pretrató mediante la esterificación de sus ácidos grasos en presencia de ácido sulfúrico. Luego, la transesterificación alcanzó un 90 % de rendimiento a 65 °C, una relación molar de metanol/aceite de 6:1, 2 % de carga de catalizador y tres horas de reacción (Odeto et al., 2021). En otro estudio, se optimizaron las condiciones de reacción de la transesterificación de aceite de canola con el método de superficie de respuesta Box-Behnken en presencia de CaO de cáscara de huevo. En este trabajo se reportó que con una relación metanol/aceite de 10.93:1, una carga de catalizador del 6.8 % por 9.48 h y 64 °C se obtiene 97.79 % de rendimiento de biodiesel (Gaide et al., 2022). En este trabajo, el tiempo de reacción “óptimo” es demasiado prolongado, lo que significaría que sería poco apropiado para un proceso industrial. En contraste, un estudio obtuvo 96% de rendimiento en la transesterificación de aceite usado con un catalizador derivado de cáscara de huevo de avestruz (Jana et al., 2022). Según estos autores, se llegó a ese rendimiento con una carga de catalizador de 2% una relación metanol/aceite de 12:1 a 65 °C por 1.5 h. Con esta técnica es posible obtener información sobre la influencia de las condiciones de reacción en su comportamiento.

No obstante, el CaO suele desactivarse en contacto con el CO₂ atmosférico; asimismo, la calidad de sus sitios disminuye por su higroscopicidad, ya que se transforma fácilmente en Ca(OH)₂. Además, se lixivia con facilidad, debido a que carece de resistencia mecánica y suele tener afinidad con el metanol y el glicerol. Se ha observado que durante la reacción puede formar metóxidos, gliceróxidos y un compuesto con ambos alcóxidos los cuales afectan la estructura y las propiedades fisicoquímicas del catalizador (Kouzu e Hidaka, 2012). Como solución, se ha propuesto mezclarlo con otros metales, tales como Li, K o Sr, con óxidos metálicos tales como alúmina, o bien zeolitas (Pavlović et al., 2020; Zulkurnain et al., 2024). Por ejemplo, se ha combinado el CaO con K para aumentar la basicidad y dar estabilidad al material, ya que este metal alcalino podría entrar parcialmente en la red del CaO y promover defectos superficiales. Sin embargo, a pesar de que

efectivamente aporta estabilidad, no es suficiente para frenar la lixiviación (Kumar y Ali, 2012; Tavizón-Pozos et al., 2025). Por otro lado, se ha soportado metóxido de calcio en alúmina para la obtención de biodiesel a partir de aceite de soya y aceite de cocina usado. Se encontró que este material fue altamente activo para ambos aceites, particularmente para el aceite de cocina usado, y que si bien requiere más tiempo de reacción alcanza rendimientos del 95 % (Camacho-Valencia et al., 2024).

1.5. Residuos de la construcción y la demolición

La búsqueda de catalizadores sustentables, eficientes y de bajo costo para la producción de biodiesel ha impulsado el aprovechamiento de residuos, tales como los derivados de la construcción y la demolición, como una alternativa alineada con los principios de la química verde y la economía circular. Estos residuos, ricos en metales alcalinos y alcalinotérreos, poseen el potencial de ser transformados en catalizadores activos para reacciones de transesterificación, lo cual es una manera de valorizar materiales que de otro modo representarían un problema ambiental (Castro et al., 2009). Así, su utilización contribuye simultáneamente a reducir los costos de producción del biocombustible y a mitigar el impacto ecológico asociado a la generación de residuos, promoviendo un modelo energético más limpio y sostenible.

A pesar de los avances en sostenibilidad en distintos sectores, la industria de la construcción continúa enfrentando importantes retos en la gestión de sus desechos. Los residuos de la construcción y la demolición (RCD), definidos por la NACDMX-007-RNAT-2019 como los materiales o subproductos generados durante actividades de construcción, remodelación o restauración de infraestructura, representan una fuente considerable de contaminación cuando no se manejan adecuadamente, y pueden afectar tanto al suelo como a cuerpos de agua (SEDEMA, 2021). En este contexto, la economía circular propone estrategias para reincorporar estos materiales al ciclo productivo, prolongando su vida útil y otorgándoles un nuevo valor y propósito, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental (Acevedo-Agudelo y Figueroa-Álvarez, 2023). Los RCD se agrupan en diversas categorías, incluyendo metales, concretos, mezclas asfálticas y residuos de excavación, todos los cuales pueden ser aprovechados en distintas aplicaciones industriales o tecnológicas, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sustentable de los recursos (Santiago, 2019).

Entre los RCD, algunos materiales como el ladrillo y los agregados de concreto presentan características estructurales y químicas que los hacen potencialmente útiles como soportes para catalizadores heterogéneos. El ladrillo es ampliamente utilizado en la construcción en México; está compuesto principalmente por silicatos de aluminio hidratados y óxidos, con el feldespato como uno de los minerales más comunes. Los feldespatos son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalinotérreos con fórmula general $XAlSi_3O_8$, donde X puede ser potasio (K), sodio (Na) o calcio (Ca); por ejemplo, ortoclasa ($KAlSi_3O_8$), albita ($NaAlSi_3O_8$) y anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) (Peretti et al., 2012; Sánchez-Muñoz et al., 1991; Schairer, 1950). Debido a la presencia de Na, K o Ca, los residuos de ladrillos podrían contener sitios potencialmente activos que contribuyan con la basicidad o que interactúen con especies metálicas impregnadas, como el Ca del cascarón de huevo.

De esta manera, algunos estudios han propuesto reciclar los RCD para catalizar la producción de biodiesel. Por ejemplo, se ha estudiado el uso de residuo de polvo de ladrillo blanco compuesto de $CaCO_3$ como catalizador para producir biodiesel a partir de aceites usados. Mediante metodologías de superficie de respuesta, se logró una optimización de la reacción para obtener una mayor conversión de biodiesel, y se buscó también el reúso del catalizador creado para aumentar su vida útil y contribuir más a la economía circular. Estas optimizaciones se llevaron a cabo bajo condiciones específicas: una carga de catalizador del 1.3%, una temperatura de 64 °C, una relación metanol-aceite de 5.5:1 y un tiempo de reacción de 2.3 horas (Abu-Ghazala et al., 2022).

En cuanto a los agregados de concreto, están constituidos por mezclas de minerales, como grava, arena, $CaCO_3$ o dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) unidos por un cementante. Se ha establecido que pueden ofrecer una matriz porosa con funcionalidad superficial una vez que son tratados térmicamente (Dunuweera y Rajapakse, 2018; Liu y Cao, 2009; Scholz y Grabowiecki, 2007). El cemento por sí solo puede constituir un catalizador para la producción de biodiesel, ya que ha mostrado un 95 % de rendimiento a 60 °C durante 1.3 h. Esto se atribuye a la composición del material, en el caso del cemento de una fábrica en Malasia que, si bien se constituye de piedra caliza y arcilla, destaca por su alto contenido en CaO, que alcanza un 66 % (Gimbun et al., 2013).

1.6. Zeolitas de tipo mordenita

Las zeolitas son materiales sólidos y cristalinos que se obtienen de forma natural o sintética; están constituidos por aluminosilicatos y tienen múltiples usos en la industria del petróleo, en agricultura,

tratamiento de contaminación, y catálisis, por mencionar algunos (Cabello et al., 2017; Kordala y Wyszowski, 2024). Estos minerales tienen una estructura porosa en forma de tetraedro que une mediante oxígenos a SiO_4^{4-} y AlO_4^{5-} . Tienen diferentes tamaños de poro que permiten el paso de moléculas pequeñas (Acurio-Pruna, 2024). Según Van Donk et al. (2007), el diámetro del poro limita a una zeolita como catalizador debido a que su tamaño debe ser similar al del hidrocarburo involucrado en la reacción de craqueo catalítico, por ejemplo.

Las zeolitas poseen una acidez que proviene principalmente de la sustitución del silicio por el aluminio en su red cristalina, lo que crea un desequilibrio de carga que es compensado por H^+ ; a estos se les llama sitios ácidos de Brønsted y son una propiedad que se ha estudiado para su uso en catálisis (Weitkamp, 2000).

Para la producción de biodiesel, las zeolitas han demostrado ser catalizadores efectivos para el proceso de transesterificación de aceites. Como ejemplo, una zeolita sintetizada por hidrotratamiento a partir de caolín natural ha demostrado tener una conversión del 96% en cinco horas de reacción con una relación metanol/aceite de 10:3 a 65 °C con 3 % de catalizador (Pablo et al., 2020). Se ha estudiado el uso en catálisis de las zeolitas sintéticas microporosas como Beta tipo BEA y ZSM-5 tipo MFI, las cuales han demostrado conversiones superiores al 70 % tras 10 horas de reacción con una relación etanol/aceite de 20:1 con 0.167 meq/g de catalizador (Sun et al., 2015).

La mordenita es una zeolita que se encuentra en suelos volcánicos alterados y en depósitos geológicos sedimentarios, lo que explica su presencia en residuos de excavación o en materiales terrosos asociados a obras civiles (Alberti et al., 1986; Costafreda et al., 2021). Su fórmula general puede expresarse como $(\text{Na}_2, \text{K}_2, \text{Ca})_4(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 28\text{H}_2\text{O}$; posee una elevada relación Si/Al, porosidad tipo canal y una alta capacidad para intercambiar cationes. Estas propiedades hacen de la mordenita un soporte ideal para dispersar especies catalíticas y proporcionar estabilidad estructural (Narayanan et al., 2021). Por ejemplo, el K soportado en mordenita mostró ser eficiente en la transesterificación de aceite de soya debido al incremento de basicidad y a la provisión de una morfología que aumenta la disponibilidad de los sitios activos. Se llegó a un rendimiento de biodiesel del 97 % en tres h de reacción con una relación metanol/aceite de 18:1 a 70 °C y 5 % de catalizador (Supamathanon y Khabuanchalad, 2019).

El aprovechamiento de estos materiales no solo permite valorizar residuos abundantes y de bajo costo, sino también explorar su potencial como nuevos soportes inorgánicos con propiedades texturales, estructurales y químicas favorables para el diseño de catalizadores sólidos activos y sustentables. En este sentido, la integración de RCD o zeolitas como soporte, en combinación con compuestos alcalinos como CaO, representa una estrategia prometedora desde la perspectiva de la química verde y la economía circular. A pesar del interés creciente por materiales derivados de residuos, actualmente no existen estudios que reporten la síntesis y evaluación de catalizadores de CaO soportado sobre residuos de ladrillo, agregados de concreto o mordenita. Por ello, este trabajo plantea investigar la viabilidad de estos sistemas al variar tanto el tipo de RCD como la proporción de CaO. Se espera que estas combinaciones contribuyan con la basicidad necesaria para activar la transesterificación de aceites vegetales. De esta manera se promueve innovación en la producción de biodiesel a partir de un enfoque integral que no solo atienda la mitigación del cambio climático, sino que también proponga soluciones tecnológicas para el manejo de residuos sólidos y la generación de valor a partir de materiales descartados.

Capítulo 2. Justificación, hipótesis y objetivos.

2.1 Justificación

El uso de aceites vegetales frescos o usados para la producción de biodiesel representa una alternativa sustentable frente al uso de combustibles fósiles, que disminuye tanto las emisiones contaminantes como la dependencia energética. En este sentido, los catalizadores heterogéneos como el óxido de calcio (CaO) han cobrado relevancia debido a su alta actividad básica, bajo costo y facilidad de separación del medio de reacción. El aprovechamiento de residuos como la cáscara de huevo para obtener CaO no solo reduce el impacto ambiental, sino que también promueve una economía circular al valorizar subproductos de origen doméstico o agroindustrial.

Sin embargo, el CaO presenta limitaciones en su estabilidad y resistencia a la desactivación durante el proceso de transesterificación. Por ello, este proyecto plantea su impregnación sobre materiales abundantes y de bajo costo como la mordenita natural, el ladrillo y los agregados de concreto, con el objetivo de mejorar sus propiedades catalíticas, especialmente la basicidad y la estabilidad estructural. Esta investigación no solo busca optimizar el rendimiento del biodiesel a partir de aceite de canola fresco, sino también explorar rutas viables para la valorización de residuos, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles para la producción de biocombustibles.

2.2. Hipótesis

La impregnación de CaO obtenido de cáscara de huevo sobre mordenita natural, ladrillo y agregados de concreto incrementa la densidad y la fuerza básica de los sitios superficiales, lo que se refleja en un mayor rendimiento de biodiesel a partir de aceite de canola fresco.

2.3. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de catalizadores de CaO soportados en residuos de construcción (mordenita, ladrillo y agregados de concreto) sobre el rendimiento de biodiesel obtenido por transesterificación de aceite de canola fresco.

2.4. Objetivos específicos

- Sintetizar catalizadores de CaO soportado en mordenita, ladrillo y agregados de concreto, con diferentes cargas de CaO para determinar el efecto de la cantidad de Ca.
- Caracterizar las propiedades estructurales, morfológicas y ácido-básicas de los catalizadores para correlacionarlas con su actividad catalítica.
- Evaluar el rendimiento de biodiesel en la transesterificación de aceite de canola fresco utilizando los catalizadores preparados para comparar los soportes y la cantidad de Ca.
- Determinar la estabilidad y capacidad de reúso de los catalizadores mediante su recuperación y uso en ciclos de reacción sucesivos.
- Obtener parámetros de calidad del biodiesel sintetizado y compararlo con las Normas Oficiales.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Síntesis de catalizadores

Para obtener el CaO, se recolectaron cáscaras de huevo de gallina, las cuales se lavaron con agua caliente, se trituraron y posteriormente se calcinaron a 800 °C durante cuatro horas. Como soportes se emplearon mordenita natural, ladrillo y agregados de concreto (antes llamados pavimento permeable), proporcionados por el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura. Se prepararon catalizadores con cargas de 60, 70 y 80 % p/p de CaO con cada uno de estos materiales soporte, disolviendo la cantidad necesaria de CaO en metanol (1g/10ml) a 60 °C bajo agitación constante y vigorosa durante dos horas. Después, se interrumpió la agitación y se dejó en reposo hasta que el metanol se evaporó completamente a 60 °C.

El sólido obtenido se calcinó nuevamente a 800 °C durante cuatro horas para completar la síntesis. Los catalizadores resultantes se nombraron según la inicial del soporte y el porcentaje de CaO: M para mordenita, L para ladrillo y P para los agregados de concreto. Por ejemplo, "M60" corresponde al catalizador de mordenita con un 60 % de CaO.

3.2 Caracterización de los catalizadores

3.2.1 Difracción de Rayos X

La DRX se realizó en un difractómetro de polvos marca Bruker, modelo D2 Phaser, equipado con ánodo de cobre (Cu K α , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). El análisis se efectuó en un rango de 2θ de 5° a 80°, con un paso de 0.02° y un tiempo total de adquisición de 15 min.

Para determinar el tamaño de cristal de los catalizadores se utilizó la ecuación de Scherer (Ecuación 1). Para la descomposición lorentziana, se utilizó el software Fityk y se consideraron dos o tres picos característicos de la fase cristalina (Cullity y Stock, 2008). Donde D es el tamaño de cristal, K es la constante de Scherer (0.94), λ es la longitud de onda de los rayos X (0.154178 nm), β es el ancho a la altura media del pico (FWHM) θ es el ángulo de difracción del pico⁶.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \text{Ecuación 1}$$

Además se calculó la relación $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3$ con la Ecuación 2 donde $T_{\text{Ca(OH)}_2}$ y T_{CaCO_3} representan el tamaño de cristal de las fases Ca(OH)_2 y CaCO_3 respectivamente.

⁶ El FWHM y el ángulo deben de estar en radianes al hacer el cálculo.

$$\text{Relación } Ca(OH)_2/CaCO_3 = \frac{T_{Ca(OH)_2}}{T_{CaCO_3}}$$

Ecuación 2

3.2.2. Basicidad y cuantificación de sitios básicos

Según Benesi (1957), la basicidad cualitativa se determinó mediante indicadores de Hammett (amarillo de alizarina y fenolftaleína disueltos en benceno al 1 % p/v). Para ello, se pesaron 0.5 g del catalizador, se secaron a 100 °C durante 30 min, y se adicionó 1 ml de la solución del indicador. El sistema se dejó en reposo hasta observar el cambio de color⁷. La cantidad de sitios básicos se determinó mediante valoración por retroceso. Se pesaron 12.5 mg de catalizador y se secaron a 100 °C por 12 h. Luego se adicionaron 25 ml de una solución 0.07 N de ácido benzoico en benceno y se agitó durante 30 minutos. Después del reposo por 12 h, se separó la fase líquida y se lavó el sólido con 5 ml de benceno. Las fases líquidas se combinaron y se titularon con una solución de NaOH 0.1 N en metanol, utilizando azul de bromotimol como indicador. La cantidad de sitios básicos se expresó en meq NaOH/g, de acuerdo con la Ecuación 3 donde V_{AB} es el volumen de ácido benzoico agregado, $[AB]$ es la concentración de ácido benzoico, V_{NaOH} es el volumen de gasto de NaOH, $[NaOH]$ es la concentración de NaOH y $m_{\text{catalizador}}$ es la masa del catalizador en gramos. Esto último se realizó por triplicado.

$$meq_{NaOH} = \frac{\{(V_{AB})[AB] - (V_{NaOH})[NaOH]\}}{m_{\text{catalizador}}}$$

Ecuación 3

3.2.3. Microscopia digital

La superficie del catalizador se exploró mediante un microscopio Digital Serie VHX marca Keyence (Osaka, Japón). Para obtener imágenes a diferentes enfoques, se ajustó la distancia entre el microscopio y la muestra a 100, 500 y 1000 X.

3.2.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Previo a las microscopías, los catalizadores se calcinaron nuevamente a 500 °C por 1 h para eliminar el $Ca(OH)_2$ y humedad para el correcto funcionamiento del equipo. Se utilizó un microscopio de marca Zeiss modelo SUPRA 55VP (Zeiss, Alemania).

⁷ En el amarillo de alizarina, el vire a rojo indica una alta basicidad.

3.3. Evaluación catalítica

3.3.1. Reacción de transesterificación de aceite de canola

La reacción se llevó a cabo en un reactor por lotes, acoplado a un sistema de reflujo y una mantilla de calentamiento con agitación. El catalizador seco se mezcló con metanol por 5 min a 60 °C. Luego se agregó el aceite y se dejó reaccionar por 2 h con agitación vigorosa (≥ 500 rpm). La concentración de catalizador fue de 6 %p/p respecto al aceite y la relación molar metanol/aceite fue de 10 considerando un peso molecular promedio para el aceite de canola de 885.95 g/mol. Al final de la reacción, la mezcla se centrifugó a 4 000 rpm durante 20 minutos. Luego, las fases líquidas se pasaron a un embudo de separación y después de un corto tiempo se separaron dos fases (el biodiesel en la parte superior, y la glicerina en la inferior). Se agregó n-hexano para facilitar y acelerar este proceso. La fase de biodiesel se calentó a 60 °C para eliminar el solvente y el metanol remanente. Se tomó una porción de la fase de biodiesel y se colocó en un refractómetro de Abbe 2WAJ. La concentración de biodiesel en la muestra se determinó a partir del índice de refracción (nD), empleando la curva de calibración establecida mediante de la [Ecuación 4](#). Considerando la complejidad de los catalizadores ocupados se efectuó una sola réplica para esta reacción.

La curva de calibración se creó a partir de biodiesel producido conforme a lo descrito previamente. Posteriormente, este biodiesel se sometió nuevamente al proceso de reacción reemplazando el aceite por el biodiesel ya obtenido, con el objetivo de tener un producto con mayor pureza. Después se prepararon las mezclas del producto con aceite a un 0 %, 25 %, 75 % y 100 % de biodiesel. Por último, estas mezclas se analizaron con un refractómetro Abbe y con los datos se obtuvo la [Ecuación 4](#).

$$\text{Rendimiento de biodiesel [\%]} = -5455.8 \, nD + 8016.7 \quad \text{Ecuación 4}$$

3.3.2. Evaluación de los ciclos de reutilización

Esta evaluación se realizó para los catalizadores con 80 % de CaO/soporte (M80, L80 y P80. Tras la reacción (§3.3.1), el catalizador sólido se separó de la mezcla de reacción mediante centrifugación (4 000 rpm, 20 min). El sólido recuperado se lavó secuencialmente con 10 ml de metanol y 10 ml de hexano, separando el sólido del líquido por centrifugación después de cada lavado. Finalmente, el catalizador se secó por evaporación del hexano y se calcinó a 800 °C durante seis horas antes de su

siguiente uso. Considerando la complejidad de los catalizadores ocupados se efectuó una sola réplica para esta reacción.

3.4. Caracterización del biodiesel

3.4.1. Densidad relativa

Para la determinación de la densidad relativa (ρ), se empleó un picnómetro con capacidad de 10 ml. Inicialmente, se registró la masa del picnómetro vacío y seco (m_p). Posteriormente, se llenó el picnómetro con agua destilada, evitando la formación de burbujas, y se determinó la masa del picnómetro con agua (m_{p+w}). Tras vaciar y secar el picnómetro, se repitió el proceso utilizando aceite de canola, y se registró la masa del picnómetro con aceite (m_{p+a}), y luego con biodiesel, para finalmente obtener la masa del picnómetro con biodiesel (m_{p+b}). El procedimiento se determinó por triplicado y la densidad se determinó con la Ecuación 5.

$$\rho_{aceite\ o\ biodiesel} = \frac{m_{p+b} - m_p}{m_{p+a} - m_p} * \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 5}$$

3.4.2. Viscosidad

La viscosidad de las muestras de aceite de canola y biodiesel se determinó mediante un viscosímetro de Ostwald con capacidad de 10 ml. Para cada líquido, el viscosímetro se llenó introduciendo la muestra por la ampolla inferior. Con la ayuda de una perilla de succión, el líquido se aspiró cuidadosamente hasta alcanzar el nivel superior de la ampolla, evitando la formación de burbujas de aire. Una vez alcanzado el nivel deseado, se permitió que el líquido descendiera libremente por el capilar del viscosímetro, cronometrando el tiempo que tardaba en pasar entre las dos marcas o líneas de referencia grabadas en el equipo. El procedimiento se realizó por triplicado a 40 °C y se calculó la viscosidad con la Ecuación 6 donde K es una constante dada por el viscosímetro igual a 0.00250240852 mm²/s² y t es el tiempo en el que descendió el biodiesel o aceite en el capilar.

$$viscosidad = K * t \quad \text{Ecuación 6}$$

3.4.3. Índice de saponificación

Según la norma ISO 3657:2023, se prepararon 25 ml de una solución de KOH al 0.3 N en etanol, en los cuales se disolvieron 2.5 g de muestra de aceite o biodiesel. La mezcla se sometió a reflujo durante 30 minutos. Una vez enfriada, la solución saponificada se tituló con HCl al 0.5 N, empleando

fenolftaleína como indicador. El HCl se estandarizó previamente con una solución de NaOH al 0.1 N. Además, se realizó un ensayo en blanco utilizando únicamente la solución alcohólica de KOH. El procedimiento se repitió por triplicado, y el índice de saponificación (I_s) se calculó mediante la Ecuación 7, donde V_B es el volumen de gasto de HCl en el blanco, V_M es el volumen de gasto de HCl de la muestra, C es la concentración de HCl estandarizado y m la masa en gramos de muestra.

$$I_s = \frac{56.1 (V_B - V_M)}{m} * C \quad \text{Ecuación 7}$$

3.4.4. Índice de acidez

Según la norma EN14104:2021, se preparó una mezcla de etanol y éter etílico en proporción volumétrica de 1:2. Luego, se disolvieron 2.5 g de muestra de aceite o biodiesel en 30 ml de esta mezcla, agitando constantemente hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, la solución se tituló con NaOH al 0.1 N, utilizando fenolftaleína como indicador para determinar el punto final. El procedimiento se repitió tres veces y el índice de acidez (%AGL) se calculó mediante la Ecuación 8, donde C_{NaOH} es la concentración de NaOH, V_{NaOH} es el volumen de gasto de la muestra y m es la masa de muestra en gramos.

$$\%AGL = 28.2 * \frac{C_{NaOH} * V_{NaOH}}{m} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.4.5. Índice de yodo

Según la norma EN 14111:2022, se preparó una solución de tiosulfato de sodio 0.1 N y el reactivo de Hanus (I_2/Br_2) este se preparó disolviendo 1.5 g de I_2 en ácido acético dentro de un matraz aforado de 100 ml, calentando la mezcla a 80 °C durante 30 minutos. Paralelamente, se midieron 1.5 ml de bromo Br_2 y se diluyeron con ácido acético en otro matraz aforado de 100 ml. Para determinar la concentración de I_2 y Br_2 , se tomaron 5 ml de cada solución por separado, se añadieron 10 gotas de indicador de almidón al 2 %, y se valoraron con $Na_2S_2O_3$ 0.1 N. Finalmente, se compararon las concentraciones obtenidas de ambas soluciones y se determinó cuál presentaba mayor concentración, a fin de calcular el volumen necesario a añadir de la solución más diluida, de modo que la mezcla final fuera equimolar en I_2 y Br_2 .

Se disolvió una muestra de aceite o biodiesel de 0.25 g en cloroformo y se le añadió 12.5 ml del reactivo de Hanus. Tras 30 min de agitación protegida de la luz, se agregó una solución de KI al

15 %p/v y 50 ml de agua destilada. Finalmente, la mezcla se valoró con la solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, utilizando almidón como indicador al acercarse al punto final. El procedimiento se realizó por triplicado y el índice de yodo (I_y) se calculó con la Ecuación 9, donde V_B es el volumen de gasto de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ del blanco, V_M es el volumen de gasto de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ de la muestra, C es la concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y m es la masa en gramos de muestra.

$$I_y = \frac{12.67 (V_B - V_M)}{m} * C \quad \text{Ecuación 9}$$

3.4.6. Índice de peróxido

Según la norma ISO 3960:2017, se disolvió 2.5 g de la muestra de biodiesel o aceite en una mezcla de cloroformo y ácido acético en una proporción 3:1, se le agregó 0.35 ml de una solución saturada de KI y se agitó durante dos minutos. Luego se le añadió 15 ml de agua destilada. Finalmente se valoró con una solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ al 0.1 N hasta que el color amarillo disminuyera; posteriormente se agregó el indicador de almidón y se continuó valorando hasta que desapareció el color azul oscuro. El procedimiento se realizó por triplicado y el índice de peróxido (I_p) se calculó con la Ecuación 10, donde V_M es el volumen de gasto de la muestra mientras que V_B es el volumen de gasto del blanco, N es la concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y m es la masa de muestra en gramos.

$$I_p = \frac{12.67 (V_B - V_M)}{m} \quad \text{Ecuación 10}$$

3.4.7. Oxitest

Se determinó el tiempo de vida útil del biodiesel y el aceite de canola usando un reactor Velp Scientifica OXITEST (Usmate Velate, Italia). Para cada análisis se emplearon 10g de biodiesel y 5g de aceite, colocados individualmente en cada plato del equipo. Se realizaron pruebas a 90, 100 y 110 °C, todas a una presión constante de 6 bar de O_2 , para evaluar el efecto de este parámetro en la estabilidad oxidativa del biodiesel.

3.4.8. Espectroscopia de infrarrojo

Para la caracterización del biodiesel se empleó la técnica de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) en modo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) usando el modelo Spectrum Two de Perkin-Elmer (Waltham, Estados Unidos). Los espectros se adquirieron utilizando

un accesorio ATR con un cristal de diamante como elemento de contacto, lo que permitió el análisis directo de las muestras sólidas impregnadas con líquido sin necesidad de preparación previa.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización de catalizadores

4.1.1. Difracción de rayos X

En la [Figura 4](#) se presentan los perfiles de difracción de rayos X de las muestras de CaO soportado en ladrillo.

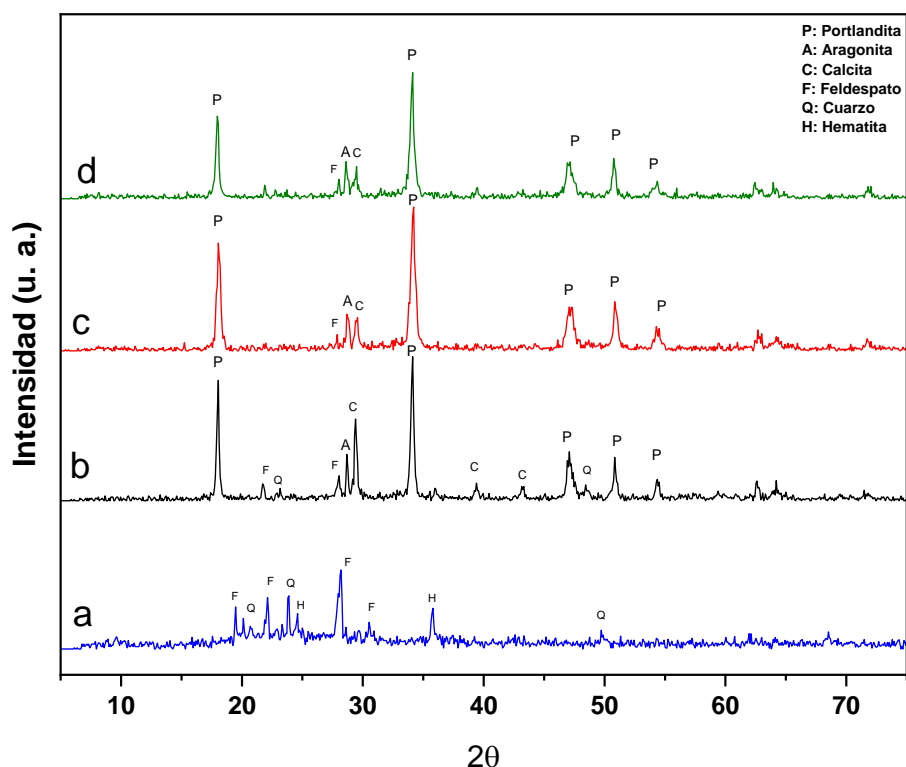


Figura 4. Difractogramas de CaO/Ladrillo en a) 0 %, b) 60 %, c) 70 % y d) 80 % calcinadas a 800 °C por cuatro horas.

Se puede observar que el ladrillo muestra alta cristalinidad de fases de feldespato (KAlSi_3O_8), cuarzo (SiO_2) y hematita (Fe_2O_3). Los picos del feldespato en forma de ortoclasa y microclina se observan en 19.47° , 22.1° , 24.66° , 28.14° y 30.53° de acuerdo con la ficha RRUFF

R040055.1 (Zhao et al., 2019). Por su parte, los de cuarzo se observan en 20.09° y 49.83° y hematita en 24.66° y 35.79° de acuerdo con las fichas R050125.1 y R040024.1, respectivamente (<https://rruff.info/>). En los catalizadores de Ca/ladrillo, los picos de feldespato, cuarzo y hematita disminuyen, ya que los picos de los compuestos de calcio son notoriamente más grandes. Se observa que el calcio se encuentra principalmente como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita) y en menor medida como CaCO_3 en sus estructuras aragonita y calcita. Los picos ubicados en 18.11° (001), 34.02° (101), 47.01° (012), 50.90° (110), 54.45° (211), 62.67° (113) corresponden a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ICDD 01-074-1219); por su parte los picos en 28.64° (021), 29.44° (104), 39.41° (113) y 43.2° (202) corresponden a CaCO_3 (ICDD 01-072-1650 y 01-071-2396) (Roy y Bhattacharya, 2010).

En la Figura 5 se exhiben los difractogramas de los catalizadores de CaO/mordenita calcinados a 800°C .

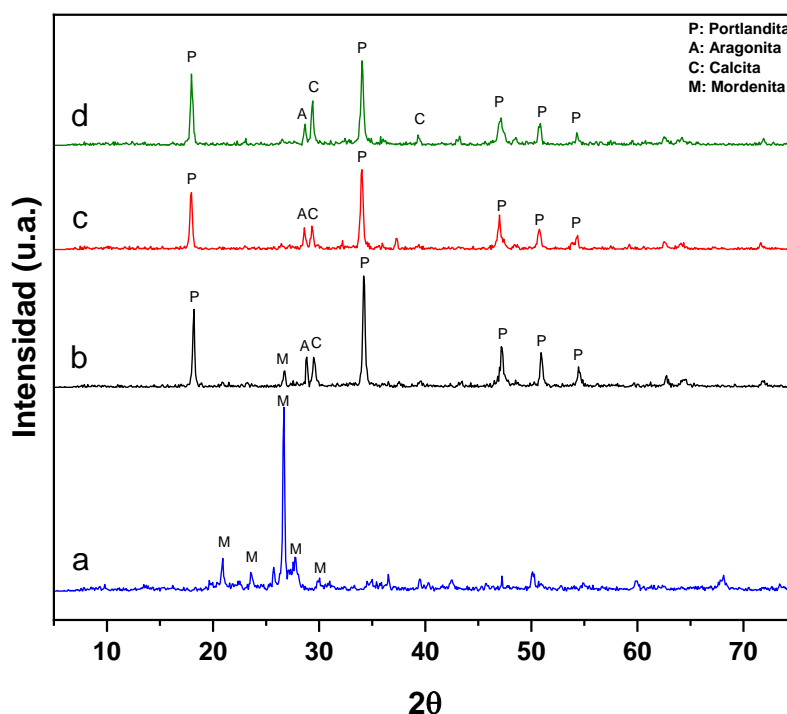


Figura 5. Difractogramas de CaO/mordenita en a) 0 %, b) 60 %, c) 70 % y d) 80 % calcinadas a 800°C por cuatro horas.

La mordenita es un silicoaluminato el cual puede estar dopado con Na, K o calcio muy similar al feldespato. La muestra de mordenita natural presentó picos de difracción en 20.98° (330), 23.68° (150), 25.70° (202), 26.63° (350), 27.73° (511), 29.93° (402) y 36.43° (352) (R070524.9) (Martucci et

al., 2003; Nakahira et al., 2001). Al impregnar a la mordenita con CaO, los picos de Ca(OH)_2 y CaCO_3 se aprecian y crece su intensidad con el incremento de su concentración como en el caso del ladrillo. De igual manera, los picos de la mordenita se dejan de apreciar debido a que los cristales de las fases de CaO los ocultan.

En la [Figura 6](#) se presentan los perfiles de difracción de los catalizadores de CaO soportados en agregados de concreto.

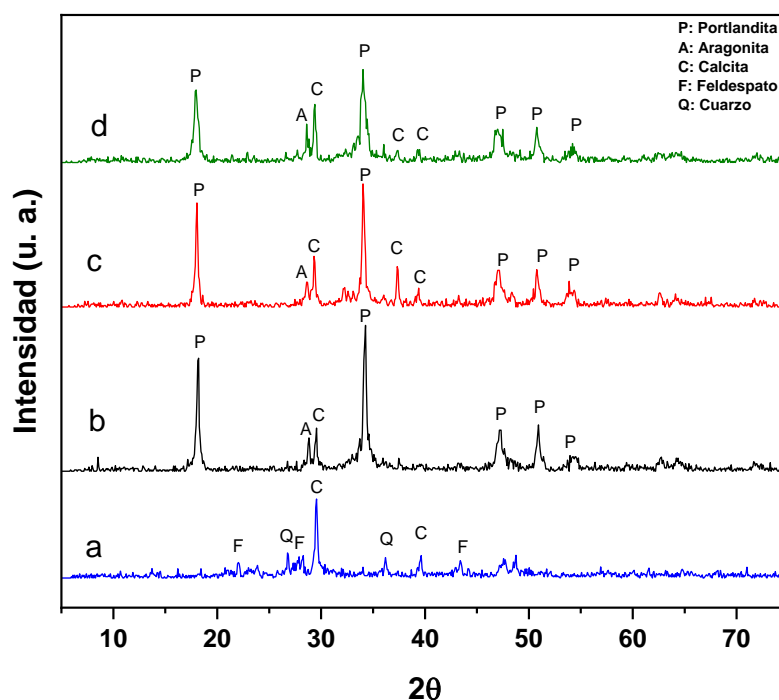


Figura 6. Difractogramas de los catalizadores de CaO/agregados de concreto en a) 0 %, b) 60 %, c) 70 % y d) 80 % calcinados a 800 °C por cuatro horas.

En el caso de los catalizadores soportados en agregados de concreto, se pudieron detectar picos correspondientes a cristales de feldespato, cuarzo y calcita. Estos catalizadores, al igual que los otros dos anteriores mostraron la formación de fases de Ca(OH)_2 y CaCO_3 . Al comparar las series de catalizadores de ladrillo, mordenita y agregados de concreto, se puede concluir que la alta concentración de CaO provoca la disminución de la intensidad de los picos del soporte. Así mismo, todos los catalizadores mostraron que forman fases bien cristalizadas de carbonato e hidróxido; este último es el más abundante. Dado que el CaO se incorporó al soporte con metanol se formó metóxido de calcio que, al calcinarse, una parte se transformaría en las fases cristalinas de CaCO_3 y

otra en CaO. Sin embargo, el CaO al entrar en contacto con el aire y la humedad ambiental se transforma en Ca(OH)_2 . De esta manera, la presencia de Ca(OH)_2 es un indicador de la formación de CaO, el cual puede ser recuperado mediante una calcinación a 400 °C antes de la reacción. Las diferencias en el grado de cristalización de las fases de calcio así como la media y desviación estándar se muestran en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Tamaños de cristal de Ca(OH)_2 , CaCO_3 y feldespato de los catalizadores de CaO soportado en ladrillo, mordenita y agregados de concreto obtenidos con la ecuación de Scherer incluyendo media y desviación estándar.

Soporte	Concentración de Ca (%p/p)	Tamaño de cristal (nm)				Relación Ca(OH) ₂ /CaCO ₃
		Ca(OH) ₂		CaCO ₃		
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	
Mordenita	60	36.25	3.18	28.05	3.33	0.99
	70	39.21	3.02	29.62	2.45	1.14
	80	44.04	2.45	36.37	2.26	1.01
Ladrillo	60	27.74	2.62	34.01	2.19	1.07
	70	33.94	2.33	35.87	2.19	1.09
	80	36.74	2.16	39.75	3.23	1.11
Agregados de concreto	60	29.61	1.93	31.79	2.74	0.93
	70	30.33	1.76	39.75	2.71	0.76
	80	33.36	1.38	43.56	2.37	0.77

^a Los cristales de aragonita y calcita se consideraron globalmente como CaCO_3 .

Se encontró que, en todas las series, tanto los cristales de Ca(OH)_2 como los de CaCO_3 aumentan su tamaño al aumentar la cantidad de calcio presente en el catalizador. En la serie de Ca/ladrillo, de L60 a L80, el tamaño de cristal del Ca(OH)_2 aumentó 33 % mientras que del carbonato 28 %; en la serie de CaO/mordenita el aumento del tamaño de cristal fue del 22 % para el hidróxido y el carbonato 18 %. Para la serie de Ca/agregados de concreto, el tamaño de cristal de Ca(OH)_2 aumentó 13 % y el de carbonato 38 %. Las muestras de mordenita mostraron tamaños de cristal de Ca(OH)_2 más grandes que las otras dos series. Respecto a la relación de tamaño de cristal entre el

hidróxido y el carbonato, se encontró que en ladrillo y mordenita los cristales crecen proporcionalmente. Esto puede deberse a una sinterización no controlada de dichos cristales en la superficie del soporte durante la calcinación (Téllez et al., 2020). De ocurrir este efecto, parece que los sistemas de CaO/ladrillo y CaO/agregados de concreto son más sensibles quizá debido a una menor interacción con el soporte y mayor interacción de las especies con ellas mismas. Por otro lado, en la serie de catalizadores soportados en agregados de concreto se notó que los cristales de carbonato crecen más que los de hidróxido debido a que los agregados de concreto ya contienen carbonatos. En la [Figura 7](#) se muestra el pico principal del Ca(OH)_2 a 34° de cada catalizador comparando el efecto del soporte.

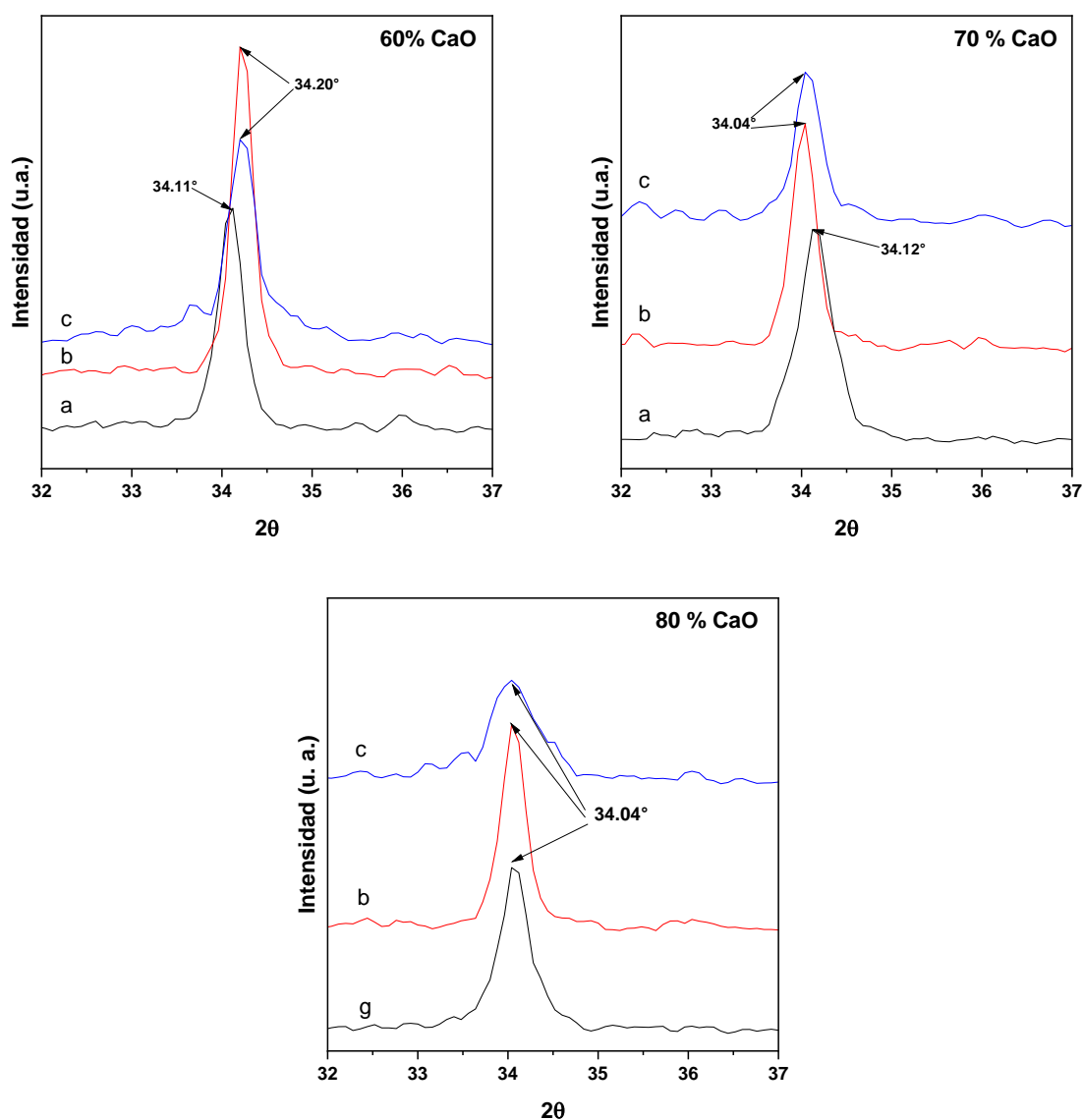


Figura 7. Pico del plano cristalino (301) de la fase Ca(OH)_2 de los catalizadores de calcio a) CaO/ladrillo; b) CaO/mordenita; c) CaO/agregados de concreto.

Los difractogramas de las muestras de 60 % de CaO mostraron un desplazamiento ligero hacia mayores ángulos cuando se soporta en mordenita y agregados de concreto en comparación con el ladrillo. Por su parte, en las muestras con 70 % de CaO ocurrió lo contrario, es decir, la soportada en ladrillo se mantuvo igual, mientras que las soportadas en mordenita y agregados de concreto disminuyeron su ángulo. Por último, las muestras de 80 % de CaO mostraron la misma posición en todos los materiales; este ángulo fue el menor. Los desplazamientos con mayores ángulos se deben a una disminución en la distancia de espaciamiento del plano cristalino. En contraste, al disminuir el valor de 2θ , la red cristalina es más flexible y aumenta su tamaño. Estos cambios en el tamaño de celda unitaria pueden ser provocados por la hidratación y deshidratación de los grupos hidroxilo, que dan lugar a una expansión y compresión de la red cristalina durante el proceso de calcinación y por su higroscopicidad (Harrington y Santiso, 2021; Khan et al., 2020). Estos procesos de calentamiento e hidratación dieron lugar a estrés de los cristales de las fases, debido a la sinterización del CaO y a su interacción con el soporte. En ese sentido, tanto en ladrillo como en mordenita habría una interacción débil del Ca con el soporte, ya que tienden a formar cristales más grandes y abundantes de Ca(OH)_2 que en los agregados de concreto. Dado que en los agregados de concreto son ricos en calcita, esta podría interactuar con el Ca soportado y dar lugar a cristales más grandes de esta fase. Es decir, que de haber una mayor interacción del Ca con los agregados de concreto o sería para formar calcita en lugar de hidróxido.

4.1.2. Basicidad y cuantificación de los sitios básicos totales

La fuerza básica de los soportes y los catalizadores con 60, 70 y 80 % de CaO así como la media y desviación estándar de los datos se presenta en la [Tabla 4](#).

Tabla 4. Fuerza básica y número de sitios básicos totales presentes en los catalizadores, se incluyen la media y desviación estándar.

Material	Basicidad	Sitios básicos totales (meq _{NaOH} /g _{Ccat})	
		Media	Desviación estándar
CaO	9.7<H_ ₊ <12.1	39.92	0.90
Mordenita	6.8<H_ ₊ <9.7	20.93	0.78
M60	9.7<H_ ₊ <12.1	33.08	0.77
M70		30.81	0.58
M80		32.68	0.39
Ladrillo*	-	22.05	0.79
L60	9.7<H_ ₊ <12.1	35.71	0.79
L70		36.42	0.59
L80		37.89	0.78
Agregados de concreto	6.8<H_ ₊ <9.7	15.92	0.34
P60	9.7<H_ ₊ <12.1	26.56	0.11
P70		28.63	0.30
P80		35.62	0.38

*La identificación de cambio de color en el ladrillo se vio limitada, ya que su característico color rojo, conferido por los óxidos de hierro no permitieron observar un cambio de color.

Considerando al CaO como material de referencia, los valores de basicidad y cuantificación de sitios básicos obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Tanabe (1970) para materiales óxidos básicos como el CaO.

La basicidad de los materiales aumenta al ser mezclados con el CaO. Sin embargo, la basicidad de los catalizadores, sin importar la cantidad de Ca, fue prácticamente la misma que el CaO puro. Por otro lado, en todos los materiales, la cantidad de sitios básicos aumenta con la cantidad de calcio. El catalizador soportado en ladrillo con 80 % de CaO presentó la basicidad más alta de todos los catalizadores preparados.

Con base en estos resultados, se observó que todos los materiales aumentaron su fuerza básica al ser modificados con CaO, y alcanzaron valores entre $9.7 < H_+ < 12.1$, comparables con el CaO puro. Por lo tanto, el CaO es el principal responsable de la basicidad elevada, mientras que los RCD por sí solos presentan sitios más débiles. No obstante, la fuerza básica se mantuvo constante con el incremento de la carga de CaO, lo que sugiere que la intensidad individual de los sitios generados no cambia significativamente, pero sí su cantidad total. Respecto al número de sitios básicos, se observa que, en todos los materiales, el incremento en la concentración de CaO da lugar un aumento en la cantidad de sitios disponibles. En este sentido, el catalizador con ladrillo L80 alcanzó 37.89 meq NaOH/g, con lo que supera al resto de los materiales soportados y se acerca notablemente al valor registrado para CaO puro. Este resultado sugiere que el ladrillo, compuesto principalmente por feldespatos con cationes alcalinos, contribuye con sitios básicos. Por otro lado, aunque los catalizadores soportados en mordenita natural y en los agregados de concreto también mostraron un incremento en su número de sitios básicos con el aumento del contenido de CaO, este incremento fue ligeramente menor que el observado en los catalizadores soportados en ladrillo. En el caso de la mordenita, este comportamiento podría deberse a que, dado que no hay una contribución significativa de los sitios por parte de la mordenita, se estaría midiendo la cantidad de sitios del CaO presente en la muestra. Los agregados de concreto, en cambio, mostró una mejora significativa en el número de sitios al pasar de 15.92 a 35.62 (P80), lo que indica que su baja basicidad inicial puede ser compensada eficientemente mediante una mayor carga de CaO.

Por lo tanto, estos resultados indican que la fuerza básica se debe principalmente a la presencia del CaO y que los soportes no contribuyen significativamente con esta propiedad. En otras palabras, no hay una sinergia en las propiedades básicas al combinarse el CaO con estos RCD por este método de síntesis. Si bien es posible observar la buena cristalización del Ca(OH)_2 , el cual es el precursor del CaO, no existe una correlación con la basicidad por este método, aunque el tamaño de los cristales sí depende del material con el cual fue combinado.

4.1.3 Microscopía digital

En la [Figura 8a-c](#) se muestran las imágenes de microscopía digital de los soportes con un aumento de 100X.



Figura 8. Microscopías a 100X de aumento para (a) mordenita, (b) ladrillo, y (c) agregados de concreto.

El soporte de mordenita (Figura 8a) presenta una coloración predominantemente clara, ligeramente beige. Algunas partículas exhiben una textura superficial rugosa, lo que sugiere una estructura aglomerada. Igualmente, se pueden distinguir fragmentos de mayor tamaño con bordes más definidos, compuestos por una mezcla de agregados y partículas finas. El ladrillo (Figura 8b) tiene una morfología granular y presenta una coloración entre rojiza y anaranjada que indica la presencia de diferentes óxidos y minerales presentes en esta arcilla. También puede observarse la presencia de cuarzo, el cual se distingue por su coloración clara y que se confirma por los resultados de DRX (Sayed Hemeda et al., 2018; Zhu y Zhu, 2020). Se observan fragmentos de diversos tamaños, tales como polvo fino y gránulos más grandes. En el caso de los agregados de concreto (Figura 8c), se tienen partículas claras, grises y más grandes que las observadas en ladrillo. Estas partículas tienen una forma irregular y se asemejan a rocas.

En la Figura 9d-f se muestran las micrografías digitales a 100X de los catalizadores preparados con los tres soportes y con una carga de CaO al 80 %. En todos los casos se observan agregados de CaO que los distinguen significativamente de la morfología original de los soportes.

Estos agregados presentan formas irregulares y una textura rugosa que sugiere la coalescencia de partículas finas, posiblemente como resultado del proceso de impregnación, triturado y posterior calcinación.

En el caso de M80 (Figura 9d) y P80 (Figura 9f), la superficie aparece cubierta por una capa uniforme de agregados blancos, lo que hace difícil distinguir visualmente el soporte del CaO. En el caso de L80 (Figura 9e), las partículas rojizas características del soporte original aún son visibles, lo que indica que el CaO y el ladrillo forman una mezcla heterogénea sin que se presente una interacción fuerte.

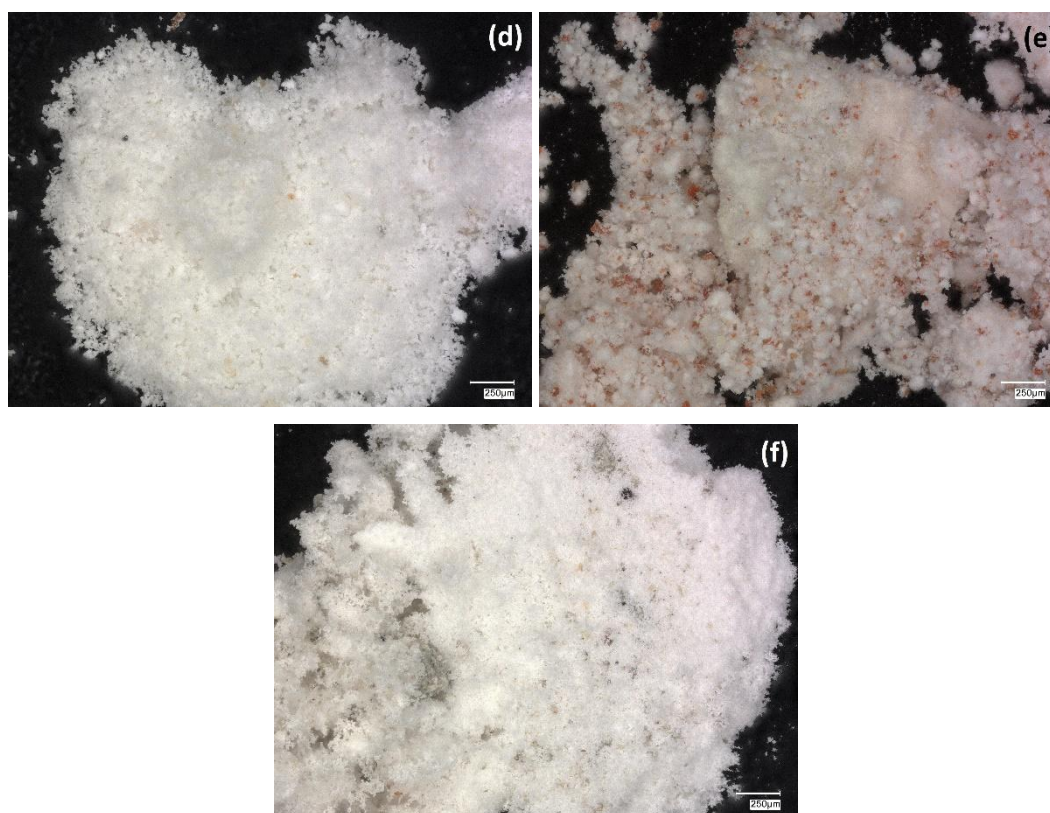


Figura 9. Microscopía a 100X de aumento para (d) M80, (e) L80 y, (f) P80.

4.1.4 Microscopía electrónica de barrido

La Figura 10g-i muestra la microscopía electrónica de barrido (SEM) para la caracterización morfológica de los soportes utilizados: mordenita, ladrillo y los agregados de concreto. Además, se analizaron los catalizadores soportados que contenían un 80 % en peso de CaO para evaluar la dispersión y la morfología de la fase activa de CaO sobre la superficie de cada soporte (Figura 11j-l).

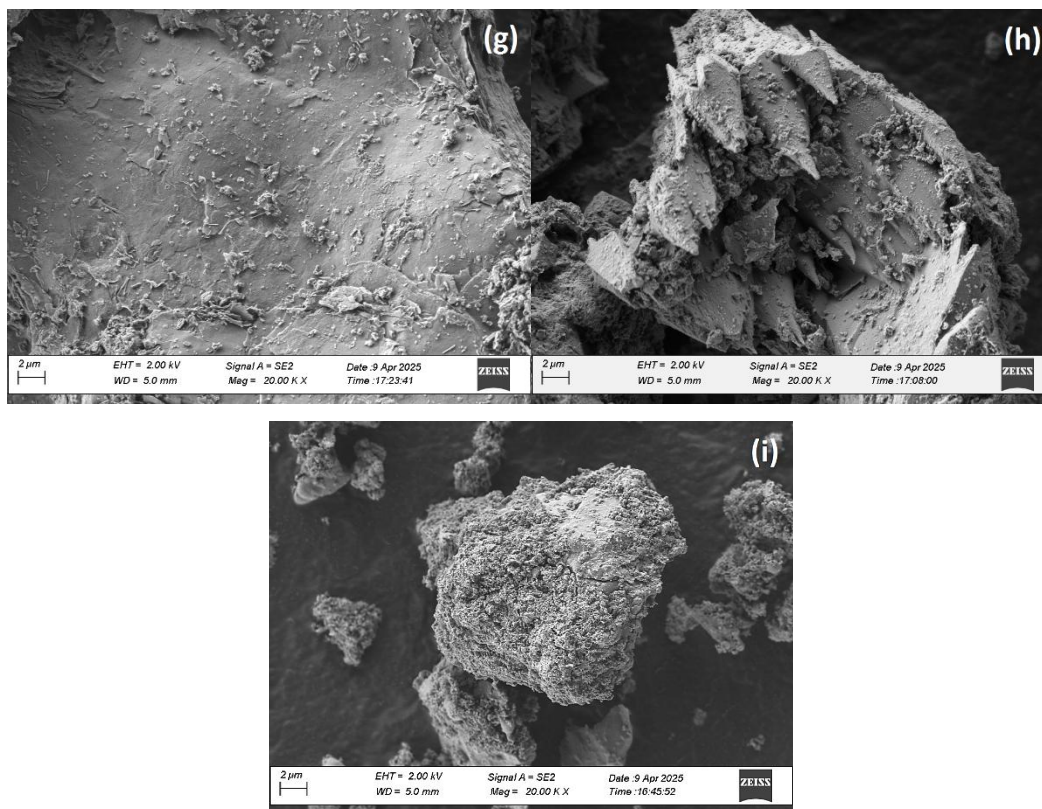


Figura 10. Micrografías a 20 000X de aumento para (g) mordenita, (h) ladrillo y (i) agregados de concreto.

El soporte de mordenita (Figura 10g) mostró una morfología no porosa de granos definidos, con rugosidades, y en algunas partes formando láminas definidas conectadas (Hardik Koshti y Bandyopadhyay, 2023; Sakizci y Özgül Tanriverdi, 2015). Por su parte, en el ladrillo (Figura 10h) se observaron estructuras más cristalinas y no porosas (Sayed Hemeda et al., 2018). En algunas partes las partículas fueron gránulos rugosos con algunos cristales incrustados, posiblemente cuarzo (Zhu y Zhu, 2020). A diferencia de los otros soportes, los agregados de concreto permeable mostró una estructura aglomerada de apariencia densa o más compacta con una superficie irregular y porosa, además de una textura amorfa y conglomerada de partículas más pequeñas. En el Anexo A se muestran más imágenes de SEM para estos materiales.

La Figura 11 muestra micrografías SEM de los catalizadores M80, L80 y P80 a un aumento de 50 000X, lo que permite observar con mayor resolución la morfología superficial de las partículas tras la impregnación con CaO.

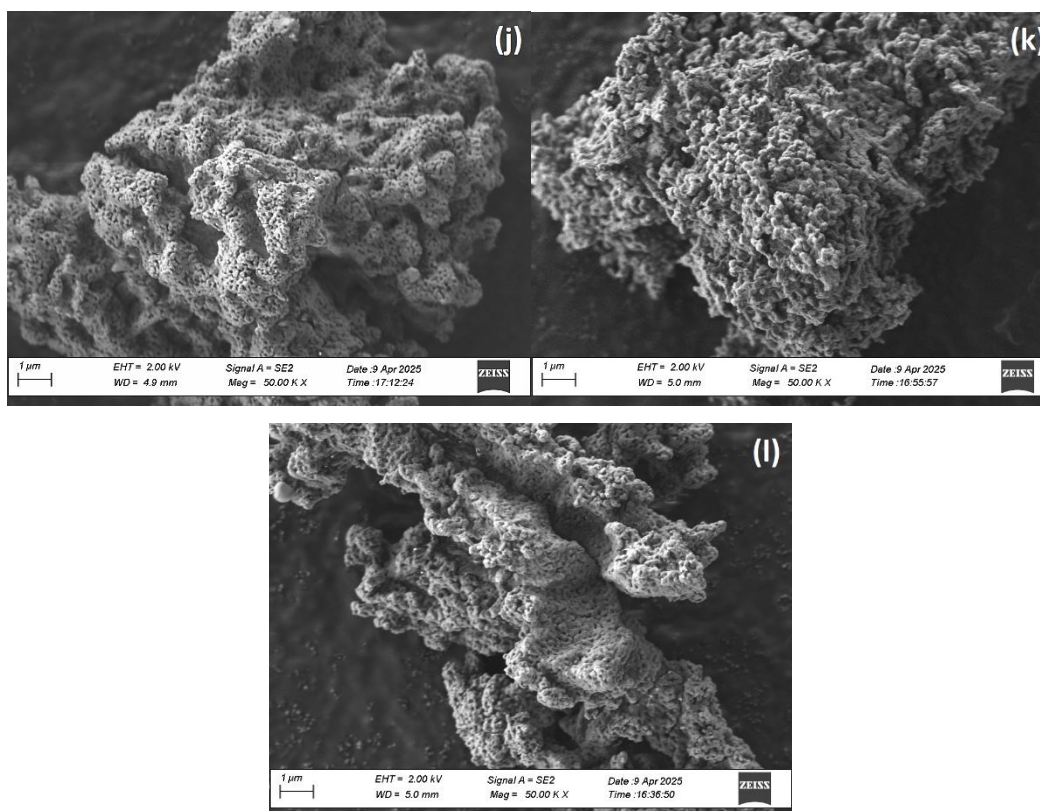


Figura 11. Micrografías con 50 000X de aumento para los catalizadores (j) M80, (k) L80 y (l) P80.

En los tres materiales se identifican estructuras características del CaO, con morfologías irregulares y altamente porosas que recuerdan a formaciones tipo coral (Basumatary et al., 2023; Degfie, Mamo y Mekonnen, 2019). Estas estructuras son especialmente notorias en M80 (Figura 11j) y P80 (Figura 11l), donde presentan mayor tamaño y definición, lo cual es consistente con reportes previos que describen al CaO calcinado como un sólido de alta porosidad con formaciones tipo esponja-coral (Hu et al., 2011; Tang et al., 2012). En contraste, en el caso de L80 (Figura 11k) las estructuras observadas son más pequeñas y de superficie más rugosa. Aunque también son atribuibles al CaO, su menor tamaño podría deberse a la influencia del soporte de ladrillo, cuya textura y composición pueden haber limitado el crecimiento o aglomeración del CaO durante la calcinación. Esta diferencia sugiere que el tipo de soporte no solo influye en la distribución superficial del CaO, sino también en la morfología final de las partículas activas.

Es importante señalar que, en todas las muestras, se encontraron pocas estructuras atribuibles exclusivamente a los soportes, lo que indicaría que el recubrimiento con CaO fue

generalizado. No obstante, no es uniforme, ya que se conservan espacios de soporte expuestos. La cobertura completa resulta lógica con la elevada carga de CaO utilizada (80 %), y aunque la interacción entre el soporte y el CaO es principalmente física, la adherencia del óxido sobre las superficies de los soportes fue evidente y da lugar a la accesibilidad de sitios básicos durante la reacción.

El mapeo elemental⁸ se encuentra en el Anexo B. En el caso de la mordenita natural, el mapeo elemental mostró una distribución homogénea del Si, el cual representa aproximadamente un tercio de la composición del material. El Al, aunque también presenta una buena dispersión, no se distribuye de forma continua ni necesariamente se correlaciona con el silicio. Por el contrario, los elementos alcalinos como el Na y el K tienden a coincidir con las regiones donde se localiza el Al, lo que sugiere su presencia en fases de tipo espinela o en estructuras de aluminatos segregados. En cambio, el Ca y el Fe presentan mayor coincidencia espacial con el silicio, lo que puede indicar su incorporación en fases con silicio.

En el ladrillo, el Si fue el componente predominante, aunque con una mayor proporción de Al en comparación con la mordenita. Ambos elementos muestran una dispersión coincidente, lo cual es característico de materiales de tipo aluminosilicatos como los feldespatos. Además, se identificaron otros elementos como Fe, Na, K, Mg y Ca, cuya presencia es coherente con la composición mineralógica típica de los productos cerámicos cocidos, como cuarzo, feldespato y hematita.

Los agregados de concreto también presentaron al silicio como el elemento mayoritario, pero se destacó por una cantidad significativa de Ca y C, lo que se atribuye a la presencia de carbonatos. La cartografía elemental reveló que Na, K, Fe y Mg están bien dispersos en el material, siendo el Na el más abundante y el Mg el que mostró la dispersión más homogénea. Esta distribución sugiere un origen mineral mixto, posiblemente derivado de mezclas de cemento, áridos y otros componentes típicos de materiales de construcción aglomerados (Moreno-Pérez et al., 2018).

En los catalizadores M80, L80 y P80 se confirmó que el Ca fue el componente principal y que se distribuyó de modo generalizado en todos los materiales, lo cual es consistente con la elevada carga de CaO utilizada durante la síntesis. En el caso de M80, se observó que además de Ca, existen

⁸ Dado que los materiales evaluados son óxidos de metales, el oxígeno fue excluido del análisis por EDS, ya que se considera implícito en todas las especies inorgánicas detectadas.

zonas con concentraciones significativas de Si, Al y Mg. Al igual que en la mordenita sola, el Si y el Al no están necesariamente correlacionados, lo que sugiere una distribución heterogénea de las fases de aluminosilicato. El Mg, que no estaba presente en el soporte original, proviene de la cáscara de huevo, y aparece de forma puntual en algunas zonas. Asimismo, se detectó una alta dispersión de C, lo cual se debe al CaCO_3 .

Para L80, el mapeo elemental reveló un comportamiento similar al del ladrillo sin carga, donde el Si y el Al aparecen agrupados y presentan buena correlación espacial. Esto concuerda con la presencia de feldespatos expuestos que no fueron completamente recubiertos por el CaO. De hecho, en la zona analizada por EDS se identificó un área ausente de calcio, lo que indica que el recubrimiento con CaO no fue completamente homogéneo, probablemente a la baja interacción con el soporte.

Ahora bien, en el caso de P80, a diferencia de los otros dos catalizadores, los otros elementos como Si, Mg y C se encuentran distribuidos de manera más homogénea. Un detalle que llama la atención fue la detección de P, que aparece correlacionado con el Mg, lo que sugiere la posible formación de fosfatos de Mg, derivados de la cáscara de huevo⁹. La ausencia de P en M80 y L80 podría indicar que tanto la mordenita como el ladrillo favorecen su eliminación durante la calcinación o bien inhiben la formación de fosfatos, ya sea por interacción química o por características texturales. En la [Tabla 5](#) se expone la cuantificación elemental de los materiales, obtenida mediante Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) y esta expresada en peso (% p/p).

⁹ El cascarón de huevo contiene hasta un 1 % de Mg.

Tabla 5. Cuantificación elemental de los soportes mordenita, ladrillo y agregados de concreto y los catalizadores M80, L80 y P80.

Catalizador	O	Ca	Al	Si	K	Na	Fe	Mg	C	P	S
Mordenita	46.70	1.35	8.3	35.23	3.07	3.05	2.3	-	-	-	
M80	34.13	65.34	-	-	-	-	-	0.52	-	-	-
Ladrillo	43.19	1.31	11.79	30.27	1.11	1.10	10.60	0.63	-	-	
L80	35.92	63.14	-	0.37	-	-	-	0.56	-	-	-
Agregados											
de	45.21	14.96	5.77	26.76	2.71	2.48	1.72	-	-	-	0.38
concreto											
P80	30.25	59.30	-	-	-	-	-	1.68	7.59	1.18	-

4.2 Evaluación catalítica

4.2.1 Reacción de transesterificación de aceite de canola

La [Figura 12](#) presenta una comparación del rendimiento de biodiesel obtenido utilizando catalizadores con distinta carga de CaO. Los tres soportes fueron inactivos en la transesterificación de aceite de canola.

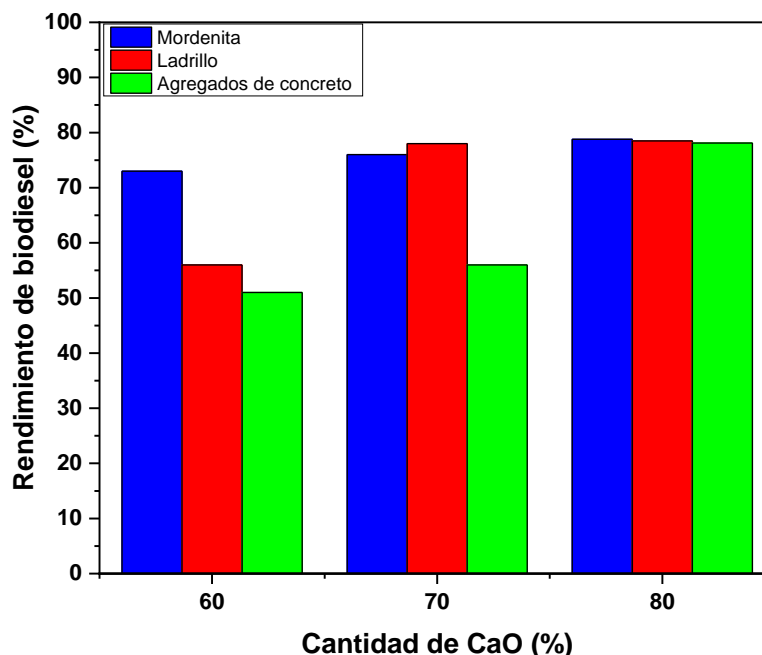


Figura 12. Rendimiento de biodiesel de los catalizadores de CaO con el soporte en función de la cantidad de CaO evaluados a 60 °C, relación metanol/aceite de 10:1, con 6 % de catalizador por dos horas.

Con todos los catalizadores se observó un incremento en el rendimiento de biodiesel conforme aumentó la proporción de CaO, por lo que se alcanzó la máxima actividad en los materiales con 80 % de carga. En el caso de los catalizadores soportados en mordenita, el rendimiento aumentó ligeramente de 73 % en M60 a 78 % en M70, que luego se mantuvo al emplear M80. Para los catalizadores con soporte de ladrillo, el incremento fue más notable; desde un 60 % en L60 hasta 78 % en L70, valor que también se conservó en L80. Por su parte, los catalizadores con agregados de concreto como soporte mostraron un aumento progresivo, desde un 51 % en P60 hasta 56 % en P70, y alcanzó igualmente un 78 % en P80.

Al utilizar los soportes (mordenita, ladrillo y agregados de concreto) de forma individual como catalizadores, se obtuvo un 0 % de rendimiento de biodiesel. Esto nos indica que, por sí solos, carecen de la capacidad para catalizar la reacción. Por otra parte, también se empleó únicamente el CaO como catalizador, con el que se logró un 73 % de rendimiento de biodiesel. Esto comprueba que la mezcla de estos dos materiales incrementa ligeramente su capacidad para catalizar la transesterificación del aceite de canola fresco.

Estos resultados indican que, independientemente del tipo de RCD empleado como soporte, todos los catalizadores con 80 % de CaO alcanzan prácticamente el mismo rendimiento en la producción de biodiesel. Esto concuerda con los resultados de caracterización, los cuales sugieren que los RCD no contribuyen de manera significativa a la generación de sitios básicos, ni existe una sinergia aparente entre el soporte y el CaO. Como se observó en las micrografías SEM, el CaO forma estructuras coralinas que no interactúan químicamente con el soporte, y es precisamente en estas estructuras donde reside la actividad catalítica. Por lo tanto, la actividad observada puede atribuirse exclusivamente a las especies de CaO y Ca(OH)_2 presentes en la superficie, las cuales, como se evidenció en la caracterización fisicoquímica, presentan ligeras diferencias en la cantidad de sitios activos. Sin embargo, estas diferencias no se reflejan en el rendimiento global de biodiesel, lo que refuerza la conclusión de que el desempeño catalítico está dominado por el CaO, independientemente del soporte utilizado.

4.2.2 Evaluación de los ciclos de reutilización

La [Figura 13](#) muestra la capacidad de reutilización de los catalizadores M80, L80 y P80.

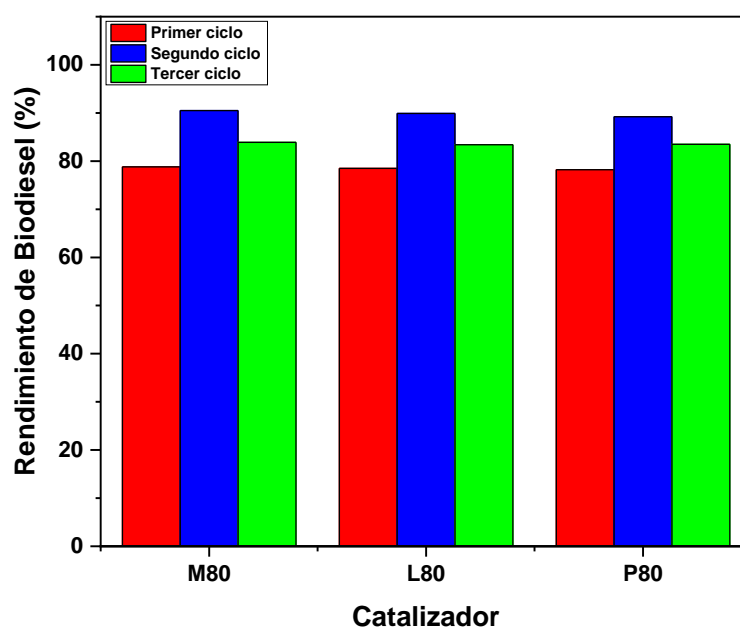


Figura 13. Capacidad de reutilización de los catalizadores M80, L80 y P80 en la transesterificación de aceite de canola evaluados a 60 °C, relación metanol/aceite de 10:1, con 6 % de catalizador por dos horas.

Como se puede observar, todos los catalizadores con 80 % de CaO presentaron altos rendimientos en el primer ciclo de reacción, de aproximadamente 78.5 %. Al reutilizar los catalizadores, tras un proceso de lavado con metanol y hexano seguido de una calcinación a 800 °C, el rendimiento aumentó hasta 89.4 % en el segundo ciclo. Posteriormente, en el tercer uso, se observó una ligera disminución del rendimiento a un valor cercano al 84 %. Este comportamiento sugiere que, a pesar de la limitada interacción entre el CaO y los soportes, podría estar ocurriendo una estabilización del catalizador. El aumento en la actividad tras el primer reuso podría ser a causa de una reactivación del Ca sobre el soporte, promovida por la calcinación posterior, o incluso a la formación de nuevas especies activas, como aluminatos o silicatos de calcio (Antonovič et al., 2013; Ghosh et al., 1979; Lothenbach y Nonat, 2015; Tian et al., 2016).

Al someterse a calcinación, podrían favorecer la interacción del calcio con los componentes de los soportes, dando lugar a nuevas fases estables con mejor interacción con estos. De acuerdo con la literatura, se requieren altas temperaturas para formar aluminatos y silicatos de Ca; sin embargo, los efectos observados podrían indicar que las condiciones de reacción, sumadas al proceso de lavado y calcinación, estarían funcionando como un método alternativo de síntesis de estas fases. No se descarta que algunas de estas especies (aluminatos y silicatos de Ca) se hayan formado durante la síntesis inicial del catalizador. Sin embargo, dada la alta concentración de CaO, es posible que quedaran ocultas bajo las estructuras tipo coral observadas en los análisis por SEM, y si su concentración es mucho menor que la del Ca(OH)_2 o CaCO_3 , que sus señales cristalográficas no hayan sido observables en DRX. Durante el proceso de reacción, estas estructuras podrían transformarse en fases como los alcóxidos mencionados, que luego se habrían lixiviado parcialmente al medio, mientras que el calcio remanente, unido a grupos metoxi y gliceroxi, reconfiguraría su estructura al ser calcinado, y generaría nuevos arreglos cristalinos.

Por lo tanto, es necesario realizar estudios adicionales mediante otras técnicas de caracterización tal como espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), análisis térmico (TGA) o difracción de rayos X post-reacción. Si bien este tipo de análisis no fue contemplado en el presente estudio debido a los alcances y limitaciones metodológicas, dan lugar a hipótesis interesantes y abren una línea de investigación para comprender la evolución estructural, la estabilidad y el desempeño de estos materiales durante su reutilización catalítica.

4.3 Caracterización del biodiesel

La [Tabla 6](#) presenta la comparación de diversas propiedades fisicoquímicas relevantes medidas al aceite de canola fresco y al biodiesel obtenido, incluyendo los parámetros establecidos por la norma ASTM la cual especifica los estándares de calidad para el análisis del biodiesel

Tabla 6. Propiedades del biodiesel producido incluyendo los parámetros establecidos por la norma ASTM.

Parámetro	Unidad	Aceite		Biodiesel		ASTM D6751
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	
Densidad	g/cm ³	0.92	0.007	0.88	0.003	0.860- 0.900
Viscosidad	mm ² /s	19.01	0.15	5.61	0.03	1.9-6
Índice de Yodo	g I ₂ /g	3.64	0.51	3.87	0.33	-
Índice de saponificación	mgKOH/g	4.41	0.06	1.45	0.02	-
Índice de acidez	mgKOH/g	0.11	0.003	0.34	0.001	≤0.5
Índice de peróxido	meq O ₂ / kg	7.40	1.95	4.60	1.58	-

En cuanto a la densidad, se observa una ligera disminución al transformar el aceite en biodiesel, ya que pasa de 0.92 g/cm³ en el aceite a 0.88 g/cm³ en el biodiesel. Esta reducción en la densidad es una característica común en el proceso de transesterificación (García-Muentes et al., 2018). La viscosidad, en cambio, presentó una disminución considerable tras la conversión a biodiesel. Esta reducción es una ventaja del biodiesel, ya que mejora su fluidez, lubricidad y atomización en los motores de diésel (Ahmed, Ejim, Fleck & Amirfazli, 2006). Por su parte, el índice de yodo entre biodiesel y aceite son muy parecidos ya que las insaturaciones no cambian entre el reactivo y producto de la transesterificación (Stewart y Banerjea, 1928; Suzuki et al., 2021).

El índice de saponificación disminuyó del aceite de canola al biodiesel, lo cual indica que este último efectivamente está compuesto principalmente por ésteres metílicos de ácidos grasos

de menor peso molecular que los triglicéridos presentes en el aceite (Journal of the American College of Nutrition, 1989). El índice de acidez muestra un ligero incremento del aceite (0.11 mg KOH/g) al biodiesel (0.34 mg KOH/g). Según la norma ASTM D664 un índice de acidez bajo es deseable para ambos combustibles para evitar problemas de corrosión. Sin embargo, este valor cumple con la norma ASTM D6751, al ser menor que 0.5 mg/g. Finalmente, se observa una disminución en el valor de peróxido entre el aceite y el biodiesel, un cambio esperado debidos a la degradación del producto como resultado de una oxidación (Silitonga et al., 2013).

4.3.1 Oxitest

La [Tabla 7](#) presenta los resultados de estabilidad oxidativa del biodiesel obtenido al usar P80 como catalizador. El parámetro evaluado es el periodo de inducción, que representa el tiempo de resistencia del biodiesel a la oxidación bajo las condiciones de prueba.

Tabla 7. Efecto de la temperatura en el punto de iniciación del biodiesel generado al usar P80 como catalizador.

Temperatura (°C)	Punto de iniciación (min)	
	Media	Desviación estándar
90	221	0.038
100	219	0.091
110	103	0.020

Se observa que, al aumentar la temperatura, el periodo de inducción disminuye, lo cual es esperado ya que a mayor energía la reacción ocurre más rápido. Ahora bien, a 90 °C, el aceite de canola mostró un tiempo de iniciación de 21 h. Según la norma EN 14112 (CEN, 2003), el tiempo mínimo de inducción para biodiesel debe ser de 6 horas. Este resultado contrasta con lo observado mediante las técnicas de caracterización del biodiesel y el aceite, como el índice de yodo y el índice de peróxidos, ya que valores elevados en estos parámetros indican tener una cantidad similar de insaturaciones. No obstante, esto evidencia que a los aceites comerciales se les añaden antioxidantes para dar estabilidad y prolongar su vida en el anaquel (Cardeño et al., 2011; Kerkel et al., 2021). Los tocoferoles son los antioxidantes presentes en aceites, estos disminuyen o se deterioran conforme se aplica temperatura (Montenegro-Bonilla et al., 2023). Así, el biodiesel generado tendría solo algunos de los antioxidantes lipofílicos que, aunado a los ésteres, le darían

estabilidad (Fu et al., 2023). Un seguimiento riguroso de estos compuestos mediante HPLC o RMN podrían confirmar esta suposición.

4.3.2 Espectroscopia de infrarrojo

La Figura 14 se presenta el espectro de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) del biodiesel obtenido por cada catalizador.

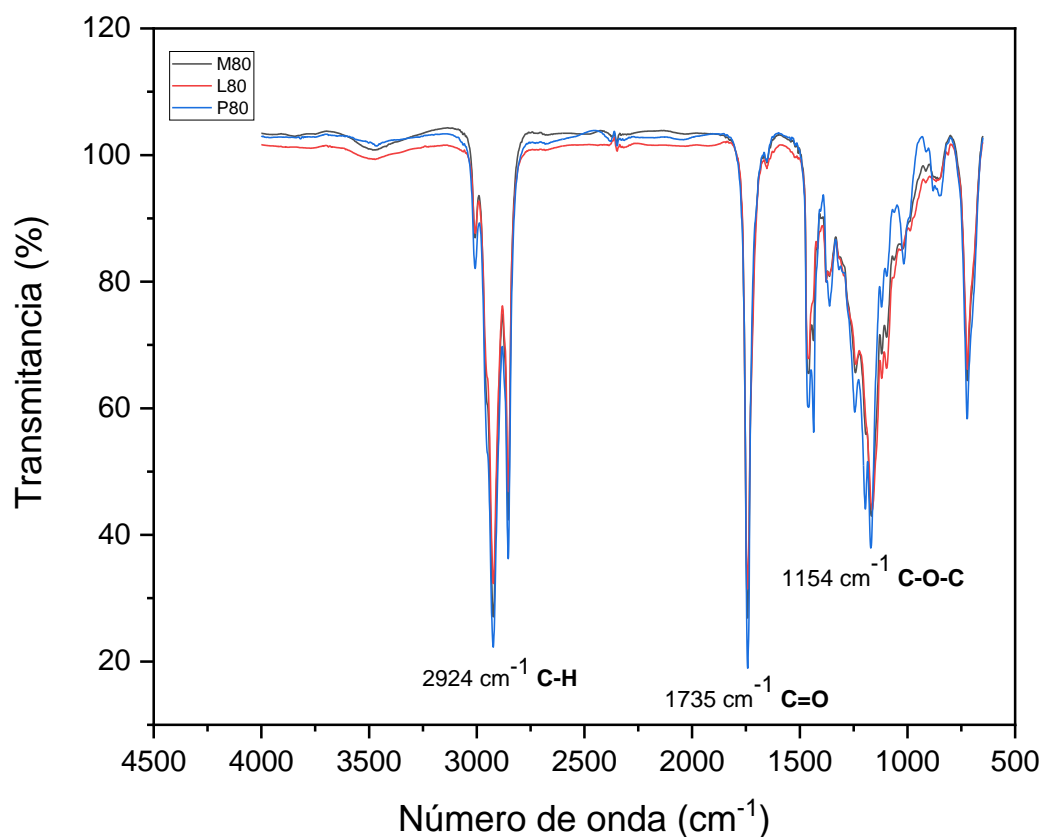


Figura 14. Espectros FT-IR del biodiesel obtenido con los catalizadores M80, L80 y P80 evaluados a 60 °C, relación metanol/aceite de 10:1, con 6 % de catalizador por dos horas.

Las absorciones observadas cerca de 1154 cm⁻¹ son características de las vibraciones de tensión C-O del enlace éster. Asimismo, se observa una banda alrededor de 1735 cm⁻¹ que es atribuible a la vibración de tensión del grupo carbonilo (C=O) del éster producto de la reacción; las bandas en la región 2934 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de tensión C-H de los grupos metilo y metileno de las cadenas que conforman a los esteres metílicos (Lafont et al., 2011). Por lo tanto, los

resultados de caracterización del biodiesel apuntan a la presencia de los ésteres metílicos de ácidos grasos producidos por la transesterificación de los triglicéridos del aceite de canola.

Capítulo 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos demostraron que la combinación de CaO con los soportes seleccionados —mordenita, ladrillo y agregados de concreto— mejoró la actividad catalítica respecto a los soportes para la transesterificación de aceite de canola fresco. Se encontró que a las condiciones evaluadas (60 °C, con una relación metanol/aceite de 10:1 y una concentración de catalizador del 6% durante dos h) los soportes por sí solos no generaron biodiesel, sino que su combinación con CaO permitió alcanzar rendimientos ligeramente superiores al producido por el CaO puro. Esto sugiere que el aumento en la proporción de CaO incrementa la basicidad del sistema y proporciona más sitios activos para la reacción.

Los análisis de caracterización confirmaron que los RCD no aportan sitios básicos adicionales, ni presentan sinergia con el CaO. Se encontró que no hay interacción fuerte entre el Ca y el soporte por lo que se sugiere que solo sirven como soporte físico. Esto da como consecuencia que su actividad sea similar al CaO puro.

Un hallazgo relevante fue el incremento del rendimiento en el segundo ciclo de uso de los catalizadores. Esta mejora sugiere que, aunque la interacción entre el CaO y los soportes estudiados es débil, el tratamiento térmico posterior podría inducir una mejor adherencia del CaO al soporte o incluso la formación de nuevas fases activas, como aluminatos de calcio. Así mismo el tercer ciclo mostro rendimiento alto lo que indicaría una aceptable estabilidad de los sistemas.

La caracterización del biodiesel obtenido mostró características fisicoquímicas que cumplieron con la norma ASTM D6751, lo cual valida la calidad del producto generado. Finalmente, este estudio demuestra que es posible reutilizar residuos de construcción como soporte para catalizadores alcalinos, lo cual promueve la economía circular en el campo de la catálisis.

Perspectivas

El uso de residuos de construcción como soportes catalíticos abre una vía interesante para el desarrollo de materiales sostenibles, alineados con los principios de la economía circular y la química verde. Aunque en este estudio no se observaron interacciones químicas significativas entre el CaO y los soportes, los resultados en términos de rendimiento y reusabilidad sugieren que estos materiales pueden ser mejorados. Este enfoque permite valorizar los RCD para reducir el impacto ambiental de estos materiales.

Se propone probar y mejorar la incorporación de Ca a los RCD mediante otros métodos de síntesis tal como el solvotérmico, para incrementar las interacciones entre la fase activa y el soporte. En este sentido, se pueden realizar técnicas de caracterización avanzadas que den información sobre la estructura, morfología, textura y características superficiales con el fin de determinar las interacciones de los componentes del catalizador.

Capítulo 7. Referencias

- Abu-Ghazala, A. H., Abdelhady, H. H., Mazhar, A. A., & El-Deab, M. S. (2022). Valorization of hazard waste: Efficient utilization of white brick waste powder in the catalytic production of biodiesel from waste cooking oil via RSM optimization process. *Renewable Energy*, 200, 1120–1133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.045>
- Acevedo-Agudelo, H., & Figueroa-Álvarez, J. (2023). Prácticas de circularidad en la gestión de los residuos de construcción y demolición en el sector de la construcción: Una revisión bibliográfica de las estrategias y los elementos clave en su implementación. *Informes de la Construcción*, 75(569), e485. <https://doi.org/10.3989/ic.92607>
- Acurio-Pruna, C. G. (2024). Obtención de biodiésel por transesterificación mediante el uso de un catalizador KOH/Zeolita. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- Ahmad, S., Chaudhary, S., Pathak, V. V., Kothari, R., & Tyagi, V. V. (2020). Optimization of direct transesterification of *Chlorella pyrenoidosa* catalyzed by waste egg shell based heterogenous nano – CaO catalyst. *Renewable Energy*, 160, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.010>
- Ahmed, M. A., Ejim, C. E., Fleck, B. A., & Amirfazli, A. (2006). Effect of biodiesel fuel properties and its blends on atomization (SAE Technical Paper 2006-01-0893). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0893>
- Ahmed, T. A. E., Wu, L., Younes, M., & Hincke, M. (2021). Biotechnological Applications of Eggshell: Recent Advances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.675364>
- Alberti, A., Davoli, P., & Vezzalini, G. (1986). The crystal structure refinement of a natural mordenite. *Zeitschrift Für Kristallographie - Crystalline Materials*, 175(1-4), 249–256. <https://doi.org/10.1524/zkri.1986.175.14.249>
- Ameen, M., Ahmad, M., Zafar, M., Munir, M., Mujtaba, M. M., Sultana, S., Rozina, El-Khatib, S. E., Soudagar, M. E. M., & Kalam, M. A. (2022). Prospects of Catalysis for Process Sustainability of Eco-Green Biodiesel Synthesis via Transesterification: A State-Of-The-Art Review. *Sustainability*, 14(12), 7032. <https://doi.org/10.3390/su14127032>
- Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Durán-del-Amor, M. del M., & Quesada-Medina, J. (2018). Advances on kinetics and thermodynamics of non-catalytic supercritical methanol transesterification of some vegetable oils to biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 173, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.069>
- Antonovič, V., Kerienè, J., Boris, R., & Aleknevičius, M. (2013). The effect of temperature on the formation of the hydrated calcium aluminate cement structure. *Procedia Engineering*, 57, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.015>
- Arenas, E., Urribarrí, A., Sánchez, J., Rincón, M., Martínez, K., González, E., & Aiello, C. (2020). Production of biodiesel by esterification and transesterification from waste cooking oils. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 38(1), 105-127. [https://doi.org/10.47280/revfacagron\(luz\).v38.n1.06](https://doi.org/10.47280/revfacagron(luz).v38.n1.06)

ASTM International. (2011). Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration (*ASTM D664-11a*). ASTM International.

Atabani, A. S., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A., & Fayaz, H. (2012). Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance, and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 211–245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>

Benente, L., Boehler, C., Marenchino, R., Monge, N., & Acevedo, D. (2024). *Desarrollo de catalizadores heterogéneos para obtención de biodiesel* [Póster]. Universidad Nacional de San Juan. Recuperado de <https://cadicaedi.fi.unsj.edu.ar/wp-content/uploads/2024/08/SOS-ID-277-Benente-Desarrollo-de-catalizadores-heterogeneos-para-obtencion-de-biodiesel-Articulo-Breve.pdf>

Benesi, H. A. (1957). Acidity of catalyst surfaces. II. Amine titration using Hammett indicators. *The Journal of Physical Chemistry*, 61(7), 970–973. <https://doi.org/10.1021/j150553a030>

Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Wongweang, C., & Khamsrisuk, S. (2013). Application of eggshell wastes as a heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Sustainable Energy*, 1(2), 7–13. <https://doi.org/10.12691/rse-1-2-1>

Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2017). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. Afinidad. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 74(577), 51-59. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320756>

Camacho-Valencia, F., Vázquez-Rodríguez, G., & Tavizón-Pozos, J. A. (2024). Catalytic evaluation of eggshell-based calcium methoxide over Al₂O₃ for biodiesel generation from waste cooking oil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(6), 1873–1879. <https://doi.org/10.1002/bbb.2684>

Canakci, M. (2005). The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology*, 11, 1–8.

Cardeño, F., Gallego, L. J., y Ríos, L. A. (2011). Refinación de la fase glicerina del biodiesel de aceite de palma empleando ácidos minerales. *Información Tecnológica*, 22(6), 15–24. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000600003>

Castellar-Ortega, G. C., Angulo-Mercado, E. R., & Cardozo-Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospectiva*, 12(2), 90-104. <https://doi.org/10.15665/rp.v12i2.293>

Castro, F., Araújo, J., Carvalho, J., & Vilarinho, C. (2009). *Giving value to wastes: Development of new technological routes to waste management* [Presentación de conferencia]. En *Nombre de la conferencia*, Repositório da Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/10587>

Ceballos-Medina, S., González-Rincón, D. C., & Sánchez, J. D. (2021). Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) Generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la Fabricación de Adoquines. *Revista ION*, 34(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021003>

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2021). *Fat and oil derivates* — Fatty acid methyl ester (FAME) — Determination of acid value (EN 14104:2021). AENOR.

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2022). *Fat and oil derivatives* — Fatty Acid Methyl Esters (FAME) — Determination of iodine value (EN 14111:2022). AENOR

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2003). *EN 14112:2003 Fat and oil derivatives* — Fatty acid methyl esters (FAME) — Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test). Brussels: European Committee for Standardization.

Cordovés-Herrera, M., Sáenz-Coopat, T., & Cabello-Balbín, A. (2013). Consideraciones sobre el estudio de catálisis homogénea y heterogénea. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 47, 31–37. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659002.pdf>

Costafreda, J. L., Martín, D. A., Presa, L., & Parra, J. L. (2021). Effects of a Natural Mordenite as Pozzolan Material in the Evolution of Mortar Settings. *Materials*, 14(18), 5343. <https://doi.org/10.3390/ma14185343>

Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2008). *Elementos de difracción de rayos X* (3.ª ed., J. A. González, Trad.). Limusa.

Degfie, T. A., Mamo, T. T., y Mekonnen, Y. S. (2019). Optimized biodiesel production from waste cooking oil (WCO) using calcium oxide (CaO) nano-catalyst. *Scientific Reports*, 9(1), Artículo 18982. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55403-4>

Demirbas, A., Bafail, A., Ahmad, W., & Sheikh, M. (2016). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(2), 290–318. <https://doi.org/10.1177/0144598716630166>

Dunuweera, S. P., & Rajapakse, R. M. G. (2018). Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4158682>

Ernestina, I., Angélica, N., & Rincón, J. J. (2025). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 20(55), 62–70. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67424409008>

Fattah, R., Ong, H. C., T. M. I. Mahlia, M. Mofijur, Silitonga, A. S., Rahman, A., & 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>

Fu, J., Le, P. K., & Turn, S. Q. (2023). Impacts of antioxidants on stability of biodiesel derived from waste frying oil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(6), 1496-1501. <https://doi.org/10.1002/bbb.2546>

Gaide, I., Makareviciene, V., & Egle Sendzikiene. (2022). Effectiveness of Eggshells as Natural Heterogeneous Catalysts for Transesterification of Rapeseed Oil with Methanol. *Catalysts*, 12(3), 246–246. <https://doi.org/10.3390/catal12030246>

- García-Serna, J., Piñero-Hernanz, R., & Durán-Martín, D. (2022). Inspirational perspectives and principles on the use of catalysts to create sustainability. *Catalysis Today*, 387, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.11.021>
- Ghosh, S. N., Rao, P. B., Paul, A. K., & Raina, K. (1979). The chemistry of dicalcium silicate mineral. *Journal of Materials Science*, 14(7), 1554–1566. <https://doi.org/10.1007/BF00569274>
- Gimbun, J., Ali, S., Kanwal, C. C. S. C., Shah, L. A., Ghazali, N. H. M., Cheng, C. K., & Nurdin, S. (2013). Biodiesel production from rubber seed oil using activated cement clinker as catalyst. *Procedia Engineering*, 53, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.003>
- Harrington, G. F., y Santiso, J. (2021). Back-to-basics tutorial: X-ray diffraction of thin films. *Journal of Electroceramics*, 47(4), 141–163.
- Hemeda, S., Akarish, A. I. M., y El-Nagga, A. A. (2018). Engineering investigations and durability problems of the construction materials of the Roman Babylon of Egypt. *Open Journal of Geology*, 8(4), 404–436. <https://doi.org/10.4236/ojg.2018.84024>
- Hernández-Martínez, M. A., Rodríguez, J. A., Chávez-Esquivel, G., Ángeles-Beltrán, D., TavizónPozos, J. A. (2023). Canola oil transesterification for biodiesel production using potassium and strontium supported on calcium oxide catalysts synthesized from oyster Shell.
- Hu, S., Wang, Y., y Han, H. (2011). Utilization of waste freshwater mussel shell as an economic catalyst for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3627–3635. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.009>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 3960:2017*. Animal and vegetable fats and oils — Determination of peroxide value — Iodometric (visual) endpoint determination. ISO.
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 3657:2023*. Animal and vegetable fats and oils — Determination of saponification value. ISO.
- Jana, D. K., Bhattacharjee, S., Roy, S., Dostál, P., & Bej, B. (2022). The optimization of biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by ostrich-eggshell derived CaO through various machine learning approaches. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100033>
- Journal of the American College of Nutrition. (1989). Food safety and health effects of canola oil. *Journal of the American College of Nutrition*, 8(5), 360–375. <https://doi.org/10.1080/07315724.1989.10720311>
- Kerke, F., Brock, D., Touraud, D., y Kunz, W. (2021). Stabilisation of biofuels with hydrophilic, natural antioxidants solubilised by glycerol derivatives. *Fuel*, 284, Artículo 119055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119055>
- Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*, 29(5), 1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>

- Koshti, H., y Bandyopadhyay, R. (2023). Liquid-phase benzylation of toluene by benzyl alcohol over micro-mesoporous hierarchical mordenite zeolite. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 3404–3414. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26777-w>
- Kumar, D., & Ali, A. (2012). Nanocrystalline K-CaO for the transesterification of a variety of feedstocks: Structure, kinetics, and catalytic properties. *Biomass and Bioenergy*, 46, 459–468.
- Lan, T., Duc, P. A., Mathimani, T., & Pugazhendhi, A. (2018). Evaluating the potential of green alga *Chlorella* sp. for high biomass and lipid production in biodiesel viewpoint. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.011>
- Lee, A. F., Bennett, J. A., Manayil, J. C., & Wilson, K. (2014). Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7887–7916. <https://doi.org/10.1039/C4CS00189C>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2009). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Liu, Q., & Cao, D. (2009). Research on Material Composition and Performance of Porous Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(4), 135–140. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:4\(135\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:4(135))
- Lothenbach, B., & Nonat, A. (2015). Calcium silicate hydrates: Solid and liquid phase composition. *Cement and Concrete Research*, 78, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.019>
- Marcos-Martín, F., Almazán-Gárate, J. L., & Palomino-Monzón, C. (2008, noviembre). Biodiesel de Algas. *Energética XXI*, 74, 100–104. <https://oa.upm.es/2926/>
- Martucci, A., Sacerdoti, M., Cruciani, G., & Dalconi, C. (2003). In situ time resolved synchrotron powder diffraction study of mordenite. *European Journal of Mineralogy*, 15(3), 485–493.
- Montenegro-Bonilla, D. M., Flores-Flores, N. L., Rodríguez-Lira, B. M., Arriaga-Montiel, N. I., Yáñez-Chávez, D. I., & Ramírez-Moreno, E. (2023). Análisis de los aceites vegetales y su estabilidad en la fritura. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 11(22), 58–66. <https://doi.org/10.29057/icsa.v11i22.10217>
- Moreno-Pérez, E., Hernández-Ávila, J., Rangel-Martínez, Y., Cerecedo-Sáenz, E., Arenas-Flores, A., Reyes-Valderrama, M. I., & Salinas-Rodríguez, E. (2018). Chemical and mineralogical characterization of recycled aggregates from construction and demolition waste from Mexico City. *Minerals*, 8(6), 237. <https://doi.org/10.3390/min8060237>
- Moya, M. M., & Salazar, J. M. (2020). Biodegradación de residuos de aceite usado de cocina por hongos lipolíticos: un estudio in vitro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2). <https://doi.org/10.20937/rica.53054>
- Nabgan, W., Abdul Jalil, A., Nabgan, B., Jadhav, A. H., Ikram, M., Ul-Hamid, A., Ali, M. W., & Hassan, N. S. (2022). Sustainable biodiesel generation through catalytic transesterification of waste sources:

- A literature review and bibliometric survey. *RSC Advances*, 12(3), 1604–1627. <https://doi.org/10.1039/D1RA07338A>
- Nakahira, A., Nishimura, S., Aritani, H., Yamamoto, T., & Ueda, S. (2001). Synthesis of Fesubstituted Al-mordenites by hydrothermal method. *Journal of Materials Science*, 36, 1885- 1889.
- Narayanan, S., Tamizhdurai, P., Mangesh, V. L., Ragupathi, C., Santhana krishnan, P., & Ramesh, A. (2021). Recent advances in the synthesis and applications of mordenite zeolite – review. *RSC Advances*, 11(1), 250–267. <https://doi.org/10.1039/d0ra09434j>
- Nasreen, S., Nafees, M., Qureshi, L. A., Asad, M. S., Sadiq, A., & Ali, S. D. (2018). Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production. *Biofuels - State of Development*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75534>
- Niju, S., Meera, K. M., Begum, S., & Anantharaman, N. (2014). Modification of egg shell and its application in biodiesel production. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(5), 702–706. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2014.02.010>
- Odetoye, T. E., Agu, J. O., & Ajala, E. O. (2021). Biodiesel production from poultry wastes: Waste chicken fat and eggshell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105654. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105654>
- Pablo, B. G., Sotelo, R. M., & Basaldella, E. I. (2020). Nuevos catalizadores zeolíticos derivados de caolín aplicados a la obtención de biodiesel [Tesis doctoral, CONICET]. <http://hdl.handle.net/11336/138381>
- Palitsakun, S., Koonkuer, K., Topool, B., Seubsai, A., & Sudsakorn, K. (2020). Transesterificación del aceite de Jatropha a biodiesel utilizando catalizadores SrO modificados con CaO de cáscaras de huevo desechadas. *Catalysis Communications*, 149, 106233. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2020.106233>
- Pavlović, S. M., Marinković, D. M., Kostić, M. D., Janković-Častvan, I. M., Mojović, L. V., Stanković, M. V., & Veljković, V. B. (2020). A CaO/zeolite-based catalyst obtained from waste chicken eggshell and coal fly ash for biodiesel production. *Fuel*, 267, 117171–117171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117171>
- Peretti, R., Serici, A., & Zucca, A. (2012). Electrostatic K-feldspar/Na-feldspar and feldspar/quartz separation: Influence of feldspar composition. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 33(3), 220-231.
- Pérez, V. (2025). Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto. *Ingenium*, 13(26), 116–125. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5038429.pdf>
- Pérez-González, N. K., Legorreta-García, F., Díaz-Guzmán, D., Vargas-Ramírez, M., FloresZamora, M. I., & Reyes-Cruz, V. E. (2020). Determinación de las Características FísicoQuímicas de una Zeolita Natural. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 8, 14–18. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8iespecial.6297>

- Rodríguez-Gregorich, A., & Ramos-Sánchez, L. B. (2011). Catálisis heterogénea: preparación de catalizadores sólidos (parte i). *Tecnología Química*, 31(2), 226– 232. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852011000200009&script=sci_arttext&tlng=en
- Roy, A., y Bhattacharya, J. (2010). Synthesis of Ca (OH) 2 nanoparticles by wet chemical method. *Micro & Nano Letters*, 5(2), 131-134.
- Ruhul, A. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Fattah, R., Reham, S. S., & Rashed, M. M. (2015). State of the art of biodiesel production processes: a review of the heterogeneous catalyst. *RSC Advances*, 5(122), 101023–101044. <https://doi.org/10.1039/c5ra09862a>
- Sakizci, M., y Özgül Tanriverdi, L. (2015). Influence of acid and heavy metal cation exchange treatments on methane adsorption properties of mordenite. *Turkish Journal of Chemistry*, 39(5), 970–983. <https://doi.org/10.3906/kim-1501-71>
- Sánchez Muñoz, L., & García Guinea, J. (1991). Caracterización estructural simple de feldespatos alcalinos: Metodología de trabajo. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 30(2), 69–79.
- Sandoval, G., Rivera, I., & Villanueva, G. (2009). Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. *Grasas Y Aceites*, 60(5), 470–476. <https://doi.org/10.3989/gya.021409>
- Santiago, A. (2019). La NADF-007-RNAT-2019 para el manejo de los Residuos de la construcción y demolición. Cdmx.gob.mx. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx:8081/residuos/index.php/tipos-de-residuos/residuosde-manejo-especial-y-voluminosos/residuos-de-la-construccion-y-demolicion>
- SEDEMA. (2021, 20 de julio). *NACDMX-007-RNAT-2019: Norma Ambiental para la Ciudad de México que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Goli, J., & Sahu, O. (2018). Development of heterogeneous alkali catalyst from waste chicken eggshell for biodiesel production. *Renewable Energy*, 128, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.048>
- Schairer, J. T. (1950). The alkali-feldspar join in the system NaAlSiO₄-KAlSiO₄-SiO₂. *The Journal of Geology*, 58(5), 512-517.
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830–3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
- Secretaría de Economía (2011). NMX-F-223-SCFI-2011, alimentos – aceite vegetal comestible – especificaciones. Dirección General de Normas. México.
- Shaah, A. H. M., Hossain, M. S., Salem-Allafi, F. A., Alsaedi, A., Ismail, N., Ab-Kadir, M. O., & Ahmad, M. I. (2021). A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: physicochemical properties and production technologies. *RSC Advances*, 11(40), 25018– 25037. <https://doi.org/10.1039/d1ra04311k>
- Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T., & Boosroh, M. H. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.055>

Siri Fung Basumatary, Brahma, S., Hoque, M., Das, B. K., Selvaraj, M., Sujata Brahma, & Sanjay Basumatary. (2023). Advances in CaO-based catalysts for sustainable biodiesel synthesis. *Green Energy and Resources*, 1(3), 100032–100032. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100032>

Stewart, A. D., & Banerjea, N. L. (1928). Comparative observations on the Wijs' and Hanus' methods of determining the iodine values of oils. *Indian Journal of Medical Research*, 15(3), 687-694.

Sun, K., Lu, J., Ma, L., Han, Y., Fu, Z., & Ding, J. (2015). A comparative study on the catalytic performance of different types of zeolites for biodiesel production. *Fuel*, 158, 848–854. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.048>

Supamathanon, N., & Khabuanchalad, S. (2019). Development of K-mordenite catalyst for biodiesel production from soybean oil. *Materials Today Proceedings*, 17, 1412–1422. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.162>

Suzuki, T., Sumimoto, K., Fukada, K., & Katayama, T. (2021). Iodine value of tung biodiesel fuel using Wijs method is significantly lower than calculated value. *Journal of Wood Science*, 67, Article 55. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01987-3>

Talha, N. S., & Sulaiman, S. (2016). Overview of catalysts in biodiesel production. *Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1), 1-5.

Tan, Y. H., Abdullah, M. O., Nolasco-Hipolito, C., & Taufiq-Yap, Y. H. (2015). Waste ostrich- and chicken-eggshells as heterogeneous base catalyst for biodiesel production from used cooking oil: Catalyst characterization and biodiesel yield performance. *Applied Energy*, 160, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.023>

Tanabe, K. (1970). *Solid acids and bases: Their catalytic properties*. New York: Academic Press.

Tang, Y., Xu, J., Zhang, J., y Lu, Y. (2013). Biodiesel production from vegetable oil by using modified CaO as solid basic catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 42, 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.001>

Tangy, A., Pulidindi, I. N., Dutta, A., & Borenstein, A. (2020). Strontium Oxide Nanoparticles for Biodiesel Production: Fundamental Insights and Recent Progress. *Energy & Fuels*, 35(1), 187–200. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03815

Tavizón-Pozos, J. A., & Cruz-Aburto, Z. G. (2023). A review of the use of SrO in catalysts for biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(2), 652–668. <https://doi.org/10.1002/bbb.2562>

Tavizón-Pozos, J. A., Cervantes-Cuevas, H., García-Camacho, G. G., Chávez-Esquivel, G., & AcostaNajarro, D. R. (2025). Biodiesel Production Using K–Sr/CaO and CaO Catalysts Derived from Eggshells by Canola Oil Transesterification. *ACS Omega*, 10(7), 6827-6838.

Téllez, G., Sarabia-Bañuelos, P., Hernández-González, S., & Nolasco-Arizmendi, V. A. (2020). Mecanismos de desactivación de catalizadores heterogéneos. *Mundo Nano. Revista*

Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología, 14(26), 1e–16e.
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69642>

Tian, Y., Pan, X., Yu, H., & Tu, G. (2016). Formation mechanism of calcium aluminate compounds based on high-temperature solid-state reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, 670, 96–104.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.059>

Tran, D.-T., Chang, J.-S. & Lee, D.- J. (2016). Recent insights into continuous -flow biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification processes. *Applied Energy*, 185, 376-409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.006>

Unpaprom, Y., Tipnee, S., & Rameshprabu, R. (2015). Biodiesel from Green Alga *Scenedesmus acuminatus*. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 4(1-1), 1-6.
<https://doi.org/10.11648/j.ijrse.s.2015040101.11>

Van Donk, S., Janssen, A. H., Bitter, J. H., & de Jong, K. P. (2007). Generation, characterization, and impact of mesopores in zeolite catalysts. *Catalysis Reviews*, 45(2), 297–319.
<https://doi.org/10.1081/CR-120023908>

Villadiego, M. M., Roa, Y. O., & Tejeda Benítez, L. (2015). Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Luna Azul*, 40. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.3>

Viriya-Empikul, N., Krasae, P., Nualpaeng, W., Yoosuk, B., & Faungnawakij, K. (2011). Biodiesel production over Ca-based solid catalysts derived from industrial wastes. *Fuel*, 92(1), 239–244.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.013>

Weitkamp, J. (2000). Zeolites and catalysis. *Solid State Ionics*, 131(1-2), 175–188.
[https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(00\)00632-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(00)00632-9)

Zhao, J., Li, X., Meng, J., Ge, W., & Li, W. (2019). Microwave-assisted extraction of potassium from K-feldspar in the presence of NaOH and CaO at low temperature. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-8.

Zhu, L., y Zhu, Z. (2020). Reuse of clay brick waste in mortar and concrete. *Advances in Materials Science*.

Zul, N. A., Ganesan, S., Hamidon, T. S., Oh, W.-D., & Hussin, M. H. (2021). A review on the utilization of calcium oxide as a base catalyst in biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105741. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105741>

Zulkurnain, N., Ahmad, A. F., Rosid, S. J. M., Azid, A., Toemen, S., Abdullah, W. N. W., & Rosid, S. M. (2024). Catalytic Efficiency of Calcium Oxide Catalyst doped with Magnesium in Biodiesel Transesterification from Recycled Cooking Oil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1432(1), 012010. IOP Publishing.

Capítulo 8. Anexos

Anexo A

Las Figuras A1 a A3 muestran la microscopía electrónica de barrido (SEM) para la caracterización morfológica de los soportes utilizados: mordenita, ladrillo y agregados de concreto a diferentes aumentos.

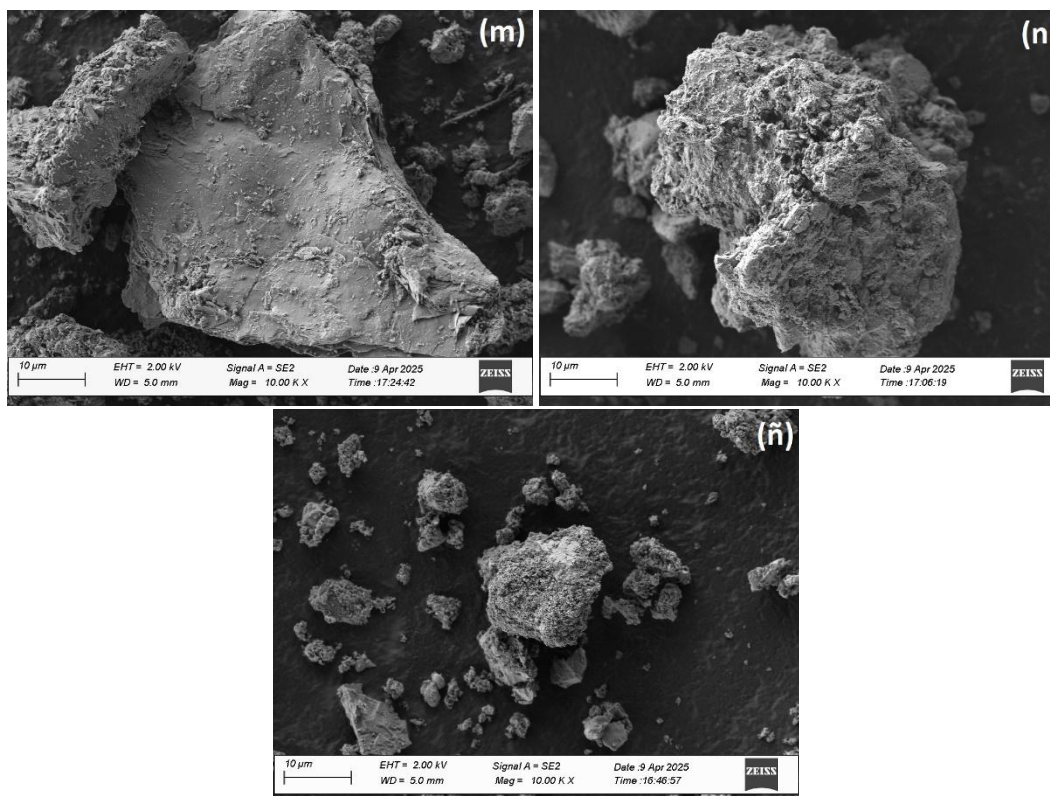


Figura A1. Micrografías a 10,000X de aumento para (m) mordenita, (n) ladrillo y, (ñ) agregados de concreto.

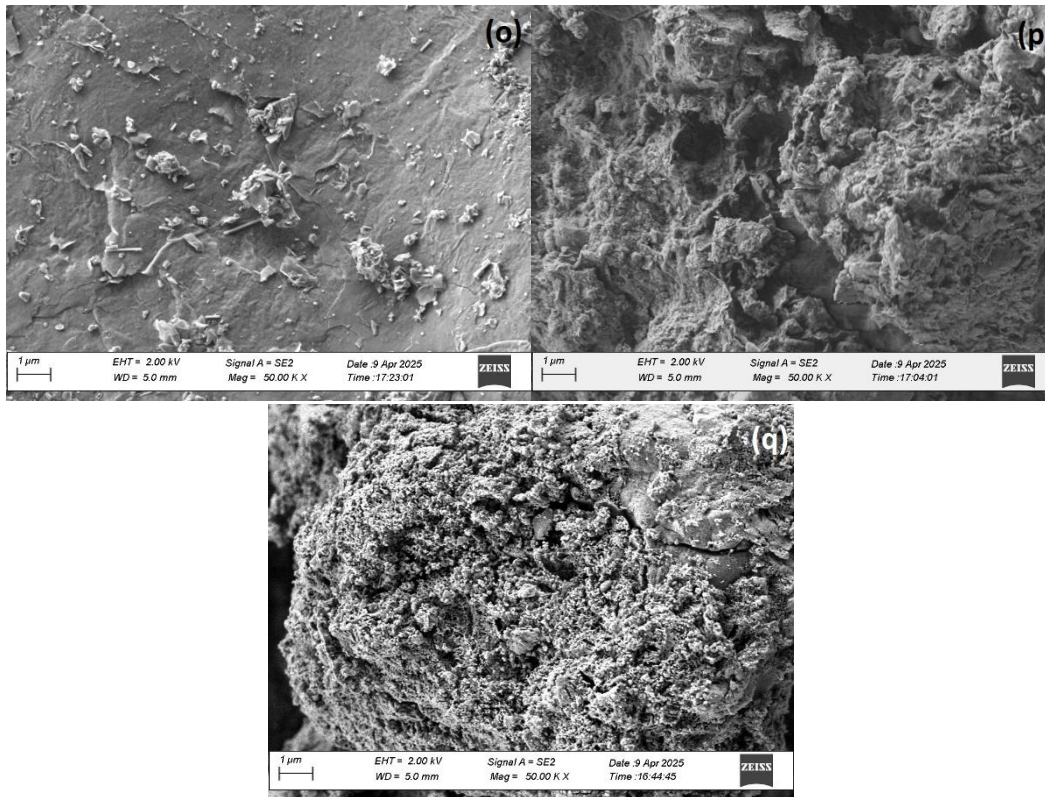


Figura A2. Micrografías a 50,000X de aumento para (o) mordenita, (p) ladrillo y, (q) agregados de concreto.

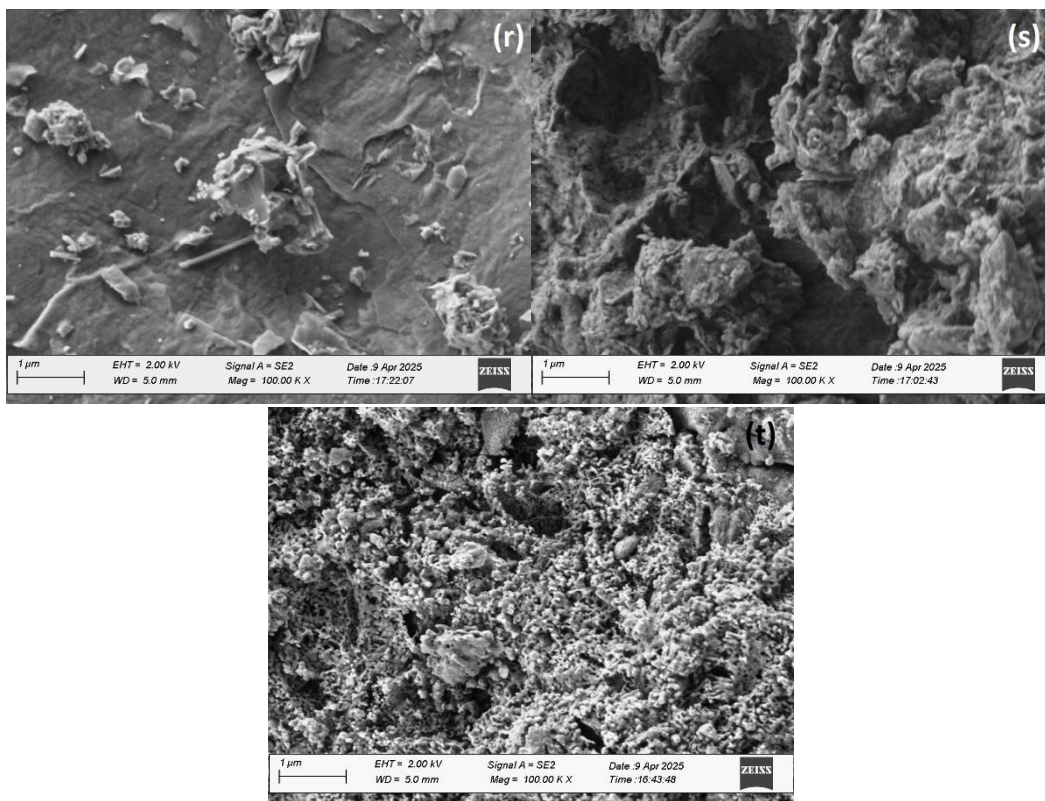


Figura A3. Micrografías a 100,000X de aumento para (r) mordenita, (s) ladrillo y, (t) agregados de concreto.

Las imágenes SEM de los soportes revelaron características morfológicas distintas para cada material. La mordenita se presentó con una morfología no porosa, mostrando granos definidos y rugosos, que en algunas zonas formaban láminas interconectadas. Por su parte, el ladrillo exhibió estructuras predominantemente cristalinas y no porosas, con algunas partículas que eran gránulos rugosos y tenían cristales incrustados, posiblemente de cuarzo. A diferencia de los otros, los agregados de concreto mostraron una estructura aglomerada y densa, con una superficie irregular y porosa, caracterizada por una textura amorfa compuesta de partículas más pequeñas.

Las Figuras A4 a A7 muestran micrografías SEM de los catalizadores M80, L80 y P80 a diferentes aumentos, permitiendo observar la morfología superficial de las partículas tras la impregnación con CaO.

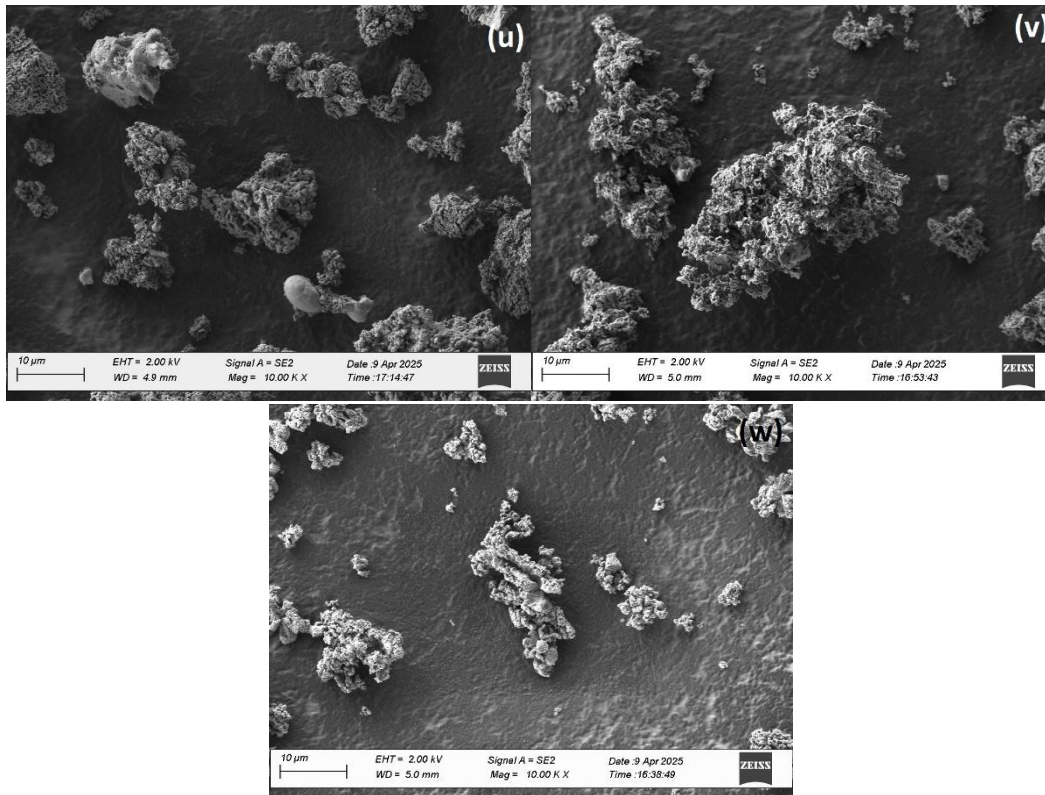


Figura A4. Micrografías a 10,000X de aumento para (u) M80, (v) L80 y, (w) P80.

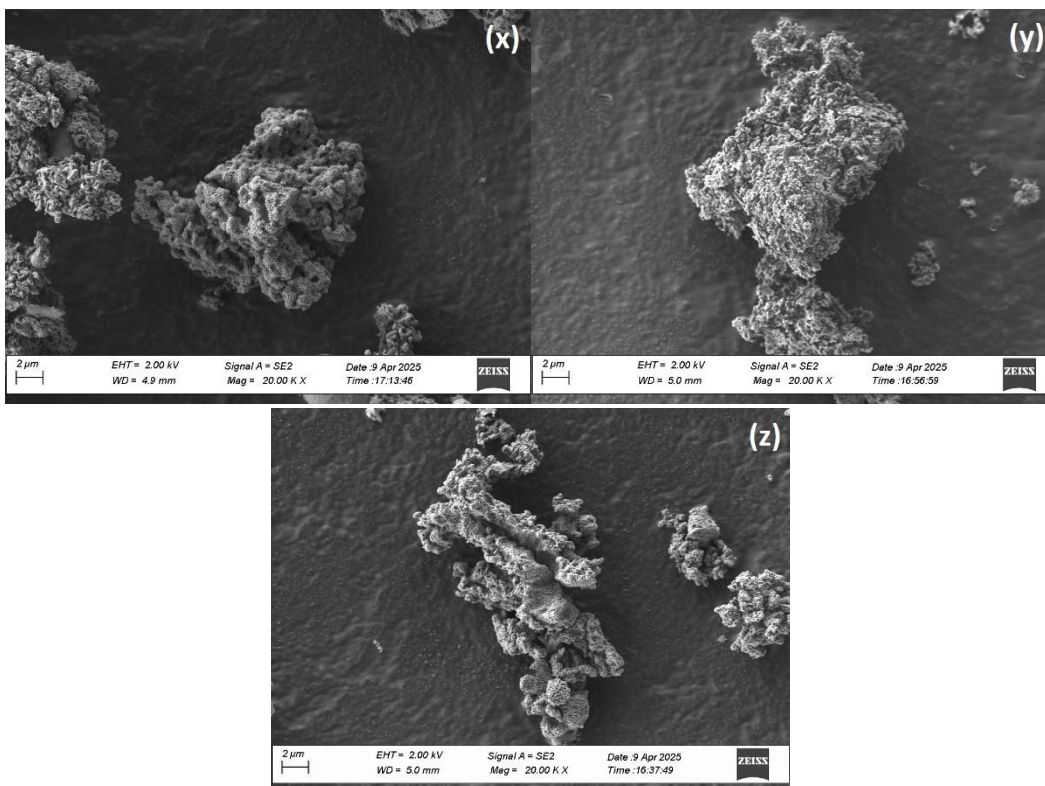


Figura A5. Micrografías a 20,000X de aumento para (x) M80, (y) L80 y, (z) P80.

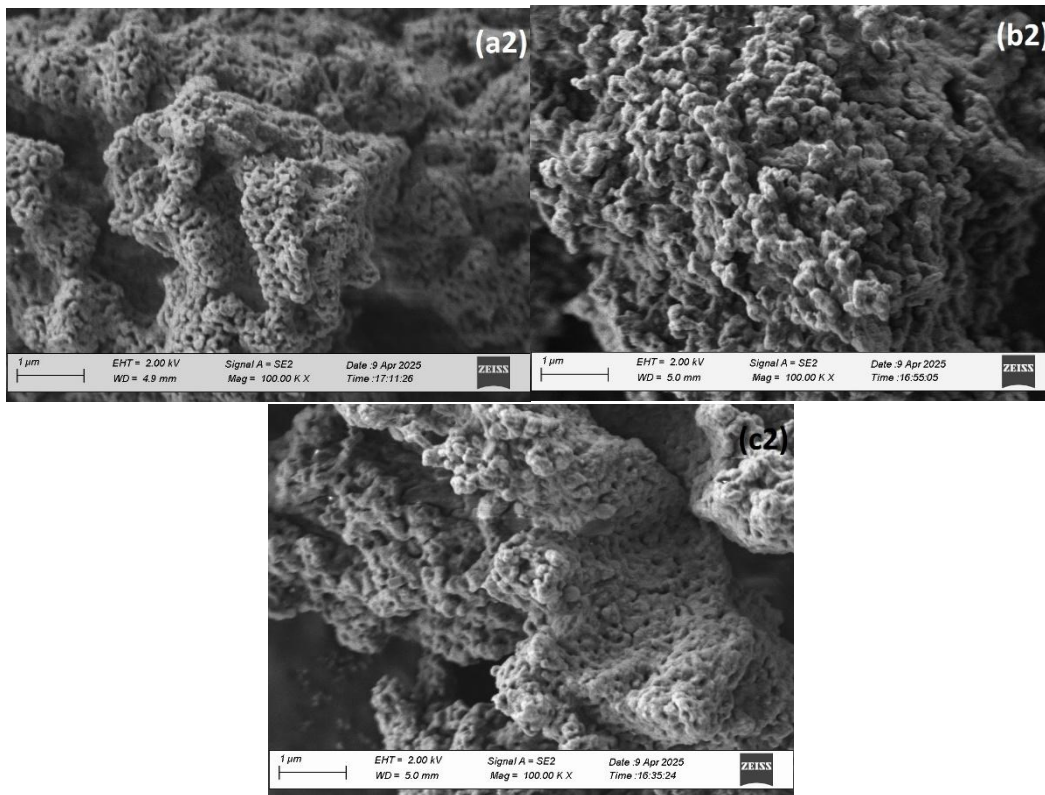


Figura A6. Micrografías a 10000X de aumento para (a2) M80, (b2) L80 y, (c2) P80.

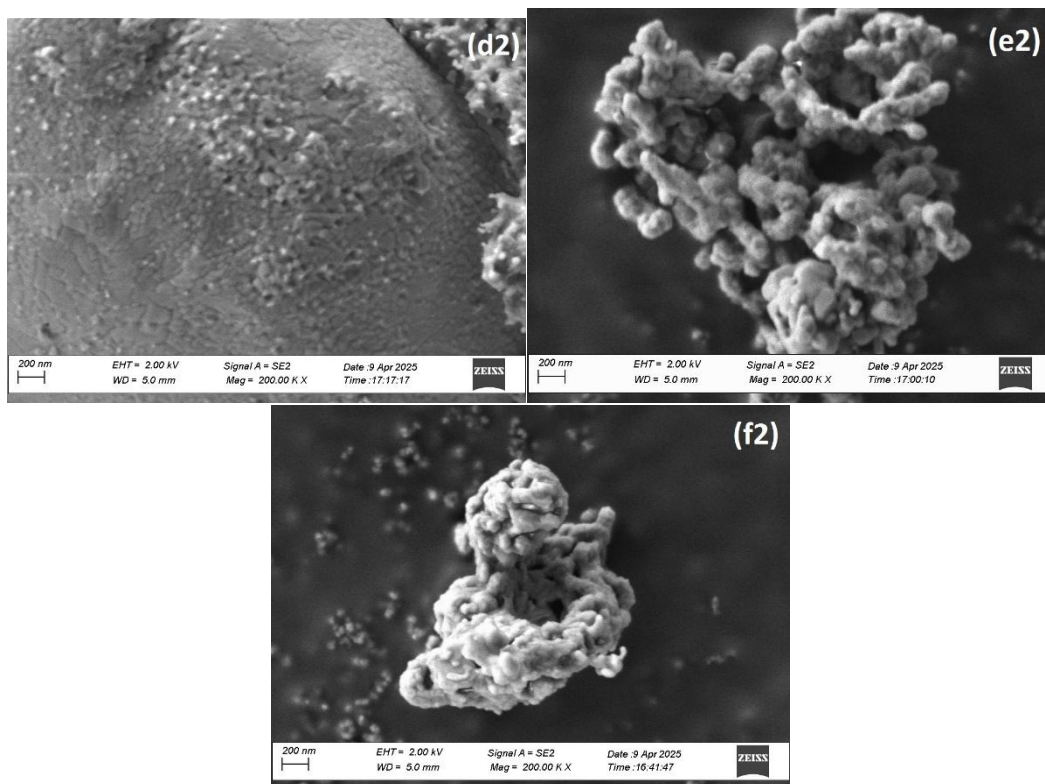


Figura A7. Micrografías a 20000X de aumento para (d2) M80, (f2) L80 y, (g2) P80.

Las imágenes SEM mostraron que el CaO en los catalizadores M80, L80 y P80 formó estructuras porosas similares a corales, siendo más grandes y definidas en M80 y P80. En L80, las estructuras de CaO fueron más pequeñas y rugosas, posiblemente por la influencia de los precursores del ladrillo. De manera general, el CaO cubrió la mayoría de la superficie de los soportes, aunque no de manera uniforme, dejando algunas áreas expuestas del residuo soporte.

Anexo B

Las Figuras B1 a B3 muestran el análisis EDS del cristal seleccionado de los soportes mordenita, ladrillo y agregados de concreto donde se identificaron los elementos que componen la muestra y su dispersión en el material.

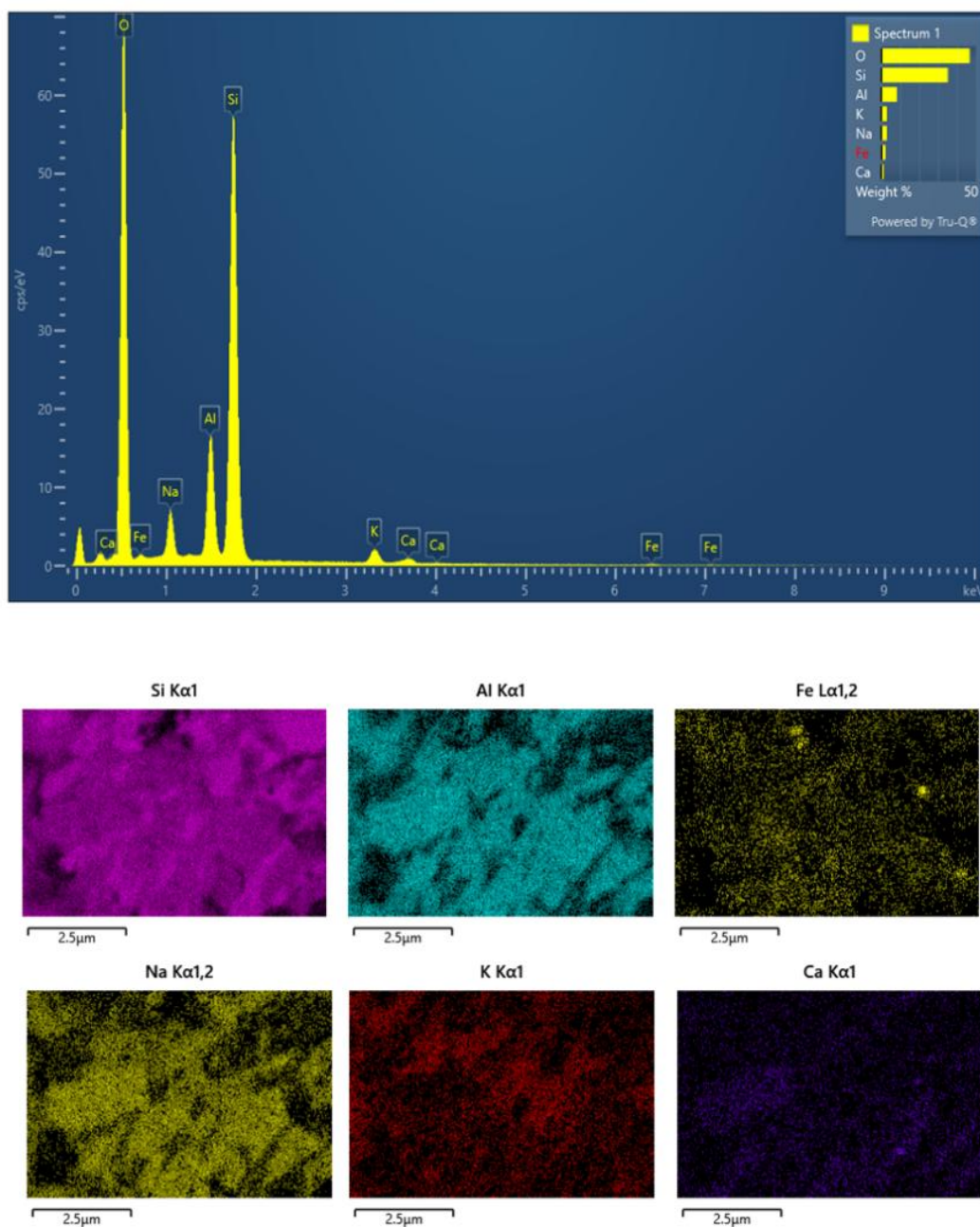


Figura B1. Mapeo elemental del soporte mordenita

Como se observa en la [Figura B1](#) los elementos Si y Al tienen una distribución uniforme en la superficie analizada ambos son el componente principal en la conformación de las mordenitas (Pérez-González et al., 2020). Para el Fe, Na, K y Ca tiene menor presencia en la muestra encontrándose más dispersos indicando que su distribución en la muestra no es completamente heterogénea.

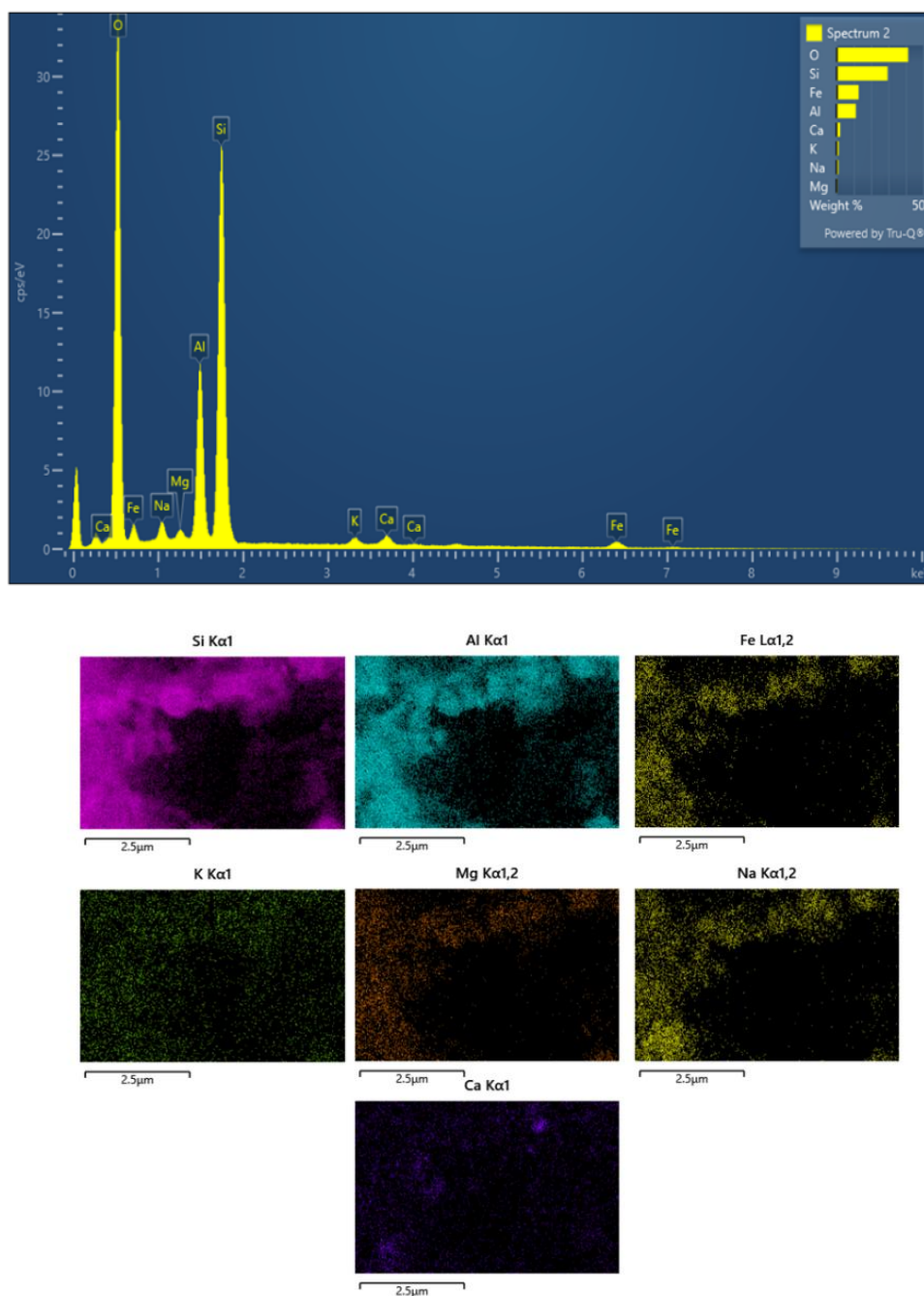


Figura B2. Mapeo elemental del soporte ladrillo

Si bien el Si es uno de los componentes principales del ladrillo en su forma de silicatos o cuarzo también se encuentra el Al que es componente principal de las arcillas con las que se fabrican los ladrillos en forma de aluminosilicatos como se observa en la [Figura B2](#) estos dos elementos están aglomerados similarmente. Mientras que el Fe, K, Mg, Na y Ca se encuentran en menor proporción son elementos presentes en los minerales como feldespatos que componen la arcilla con la que fabrican ladrillos (Pérez, 2025).

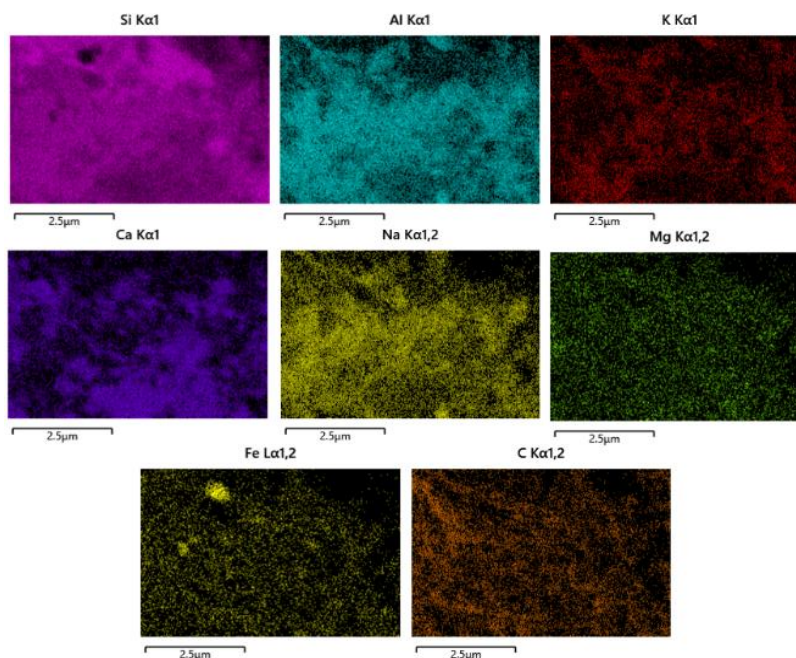
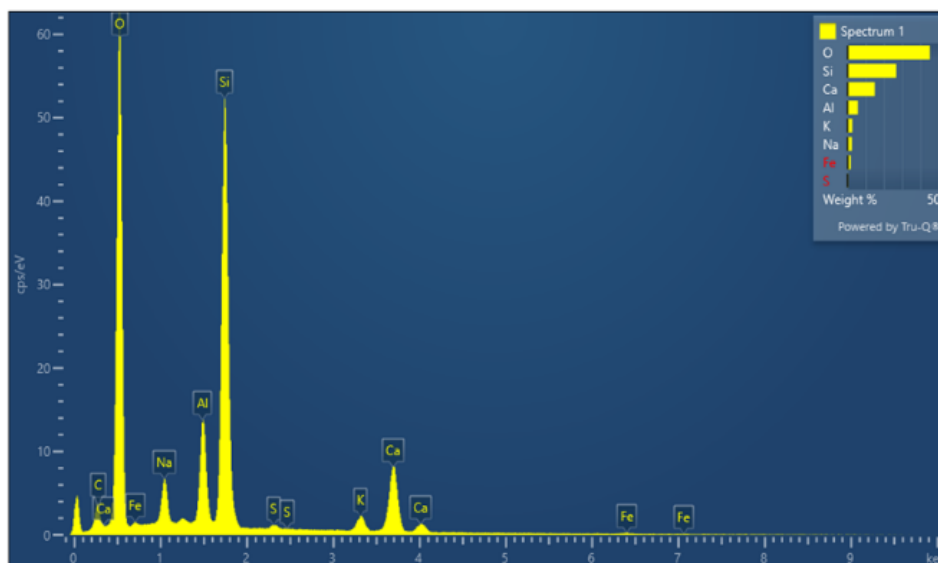


Figura B3. Mapeo elemental del soporte agregados de concreto.

En la [Figura B3](#), los elementos Si y Al se encuentran distribuidos mayormente de manera uniforme, lo que indica la presencia de aluminosilicatos como feldespatos, componentes característicos de la grava, arena que conforman el cemento. Por otro lado, los demás elementos, como K, Ca, Na, Mg y Fe, no exhiben una distribución homogénea, lo que sugiere que son componentes secundarios de los agregados de concreto, presentándose mayoritariamente en forma de óxidos.

Las [Figuras B4 a B6](#) presentan el análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) realizado a los cristales representativos de los catalizadores M80, L80 y P80. Este análisis permite identificar los elementos y su distribución en el cristal. Los resultados evidencian que los catalizadores se caracterizan por ser soluciones sólidas homogéneas de tipo intersticial.

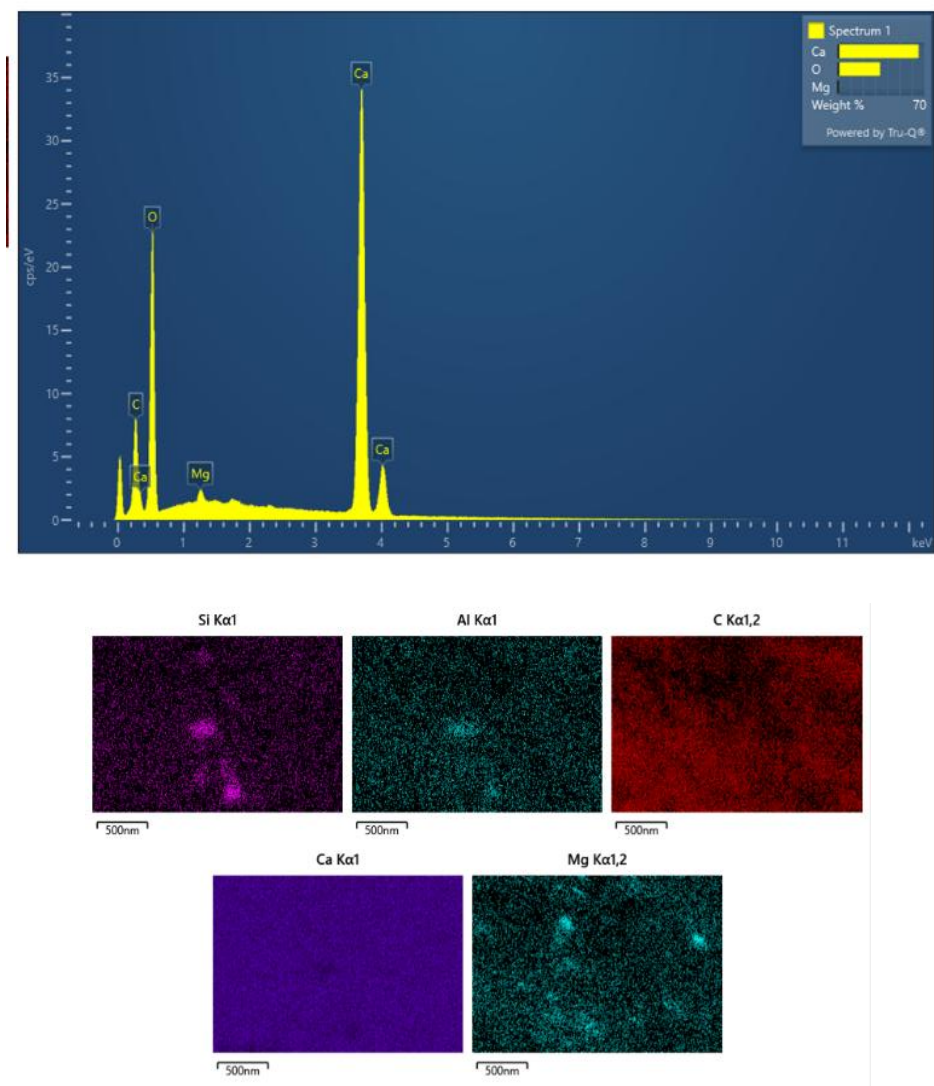


Figura B4. Mapeo elemental del catalizador mordenita/ 80 % CaO

En la [Figura B4](#), se observa que el catalizador M80 contiene en su mayoría Ca, el cual se encuentra distribuido de manera homogénea. Al comparar esto con el análisis de la mordenita sin modificar, y al observar la distribución de los elementos Si y Al, podemos inferir que la mordenita se encuentra recubierta por el CaO. De igual manera, el carbono parece presentar una mayor dispersión en este catalizador en comparación con otros elementos, lo que se puede asociar a la formación de CaCO_3 .

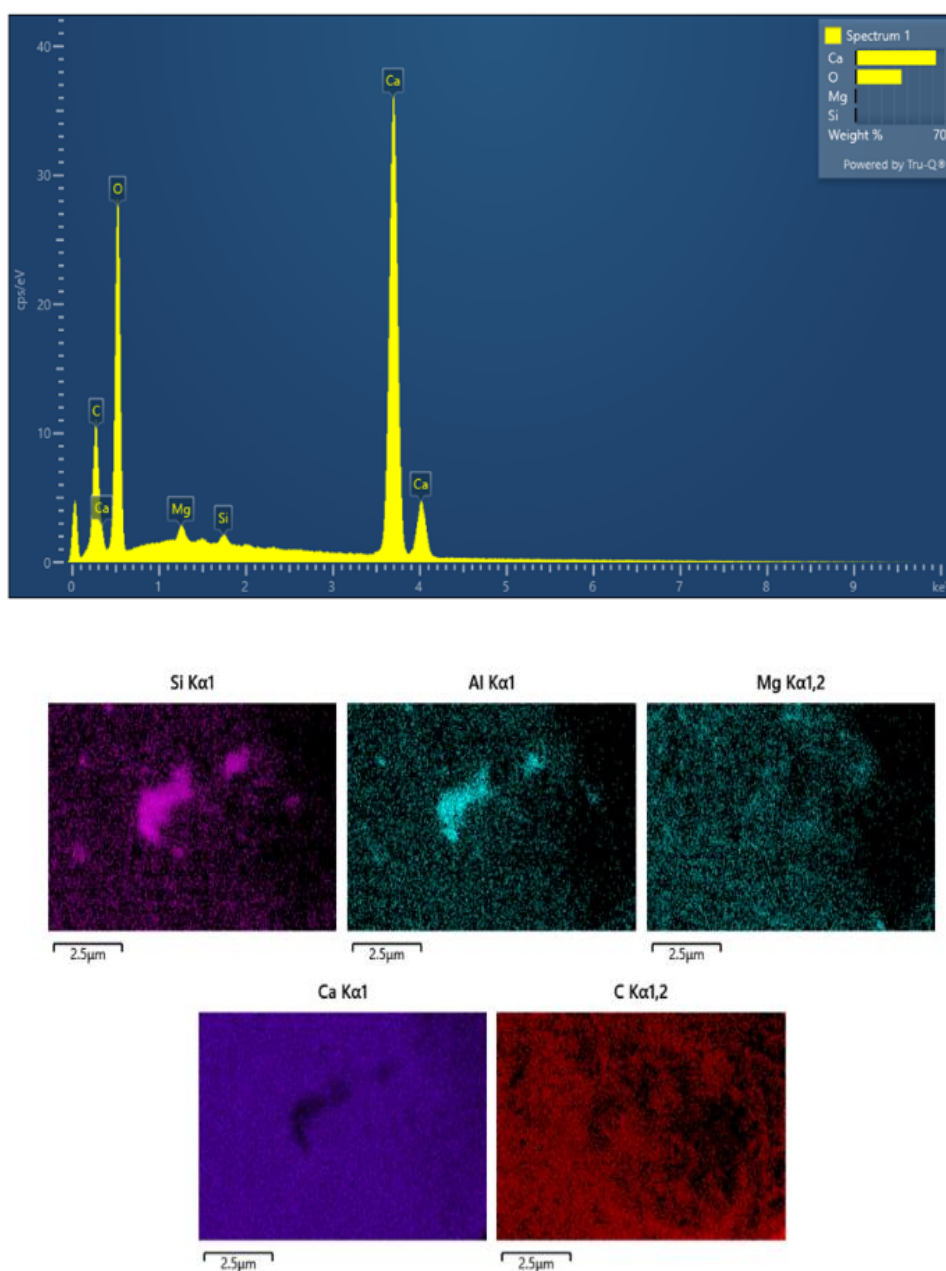


Figura B5. Mapeo elemental del catalizador ladrillo/ 80% CaO

Como se muestra en la [Figura B5](#) para el catalizador L80, este está constituido en su mayor parte por Ca, el cual se encuentra altamente distribuido en la muestra. Al ponerlo en comparación con la distribución del Si, podemos inferir que el CaO en el catalizador no está totalmente mezclado con el soporte de ladrillo, lo que nos indicaría que el CaO está recubriendo al ladrillo. La distribución del Mg en la muestra se encuentra en ciertos puntos aislados que significan ser una impureza en la composición del ladrillo. Nuevamente la aparición de C nos habla de la formación de CaCO_3 .

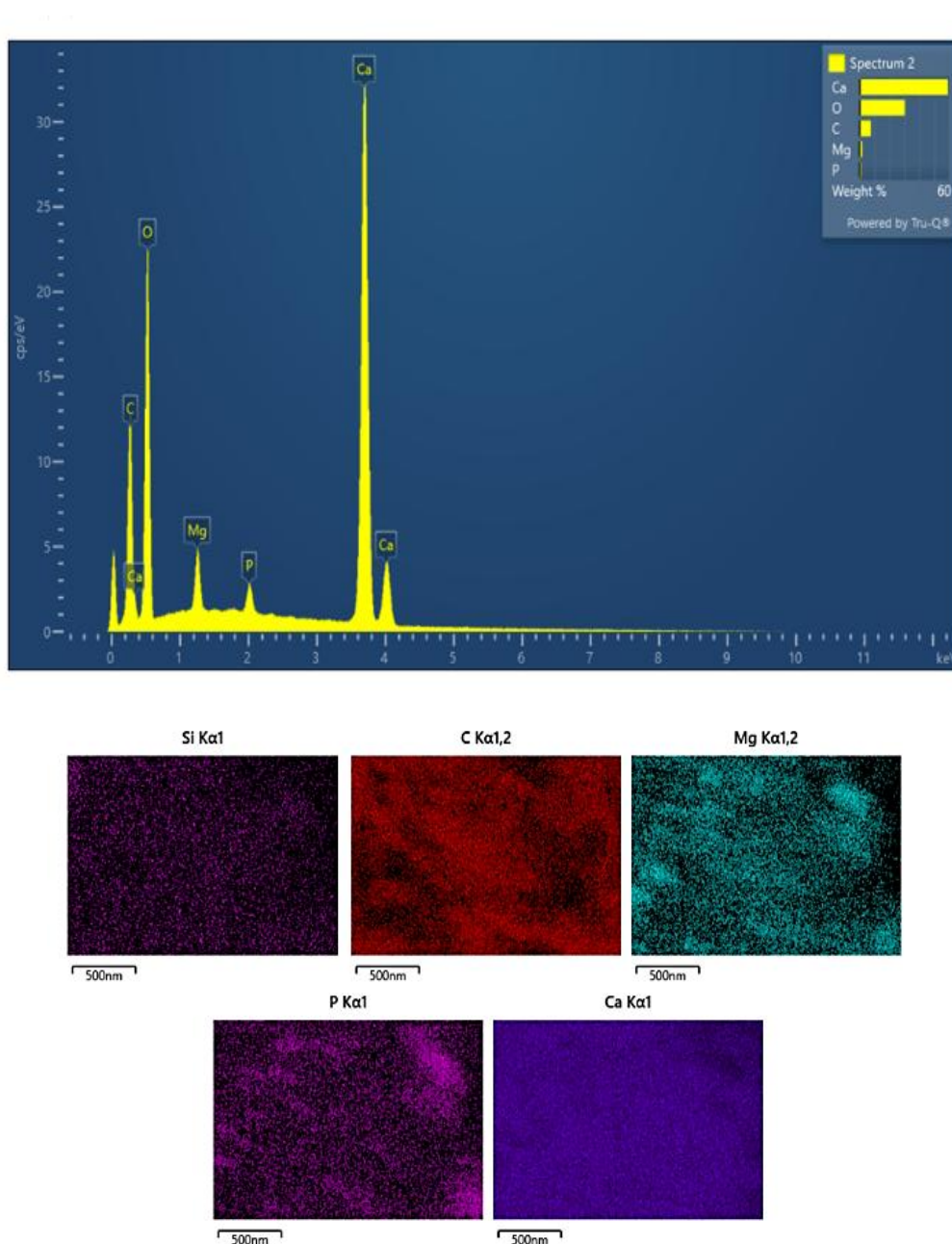


Figura B6. Mapeo elemental del catalizador agregados de concreto/ 80% CaO

En la figura B6 se observa que el calcio está distribuido y se encuentra con mayor intensidad lo cual se relaciona con la carga de CaO al que está mezclado el catalizador. El C está relacionado a la aparición de carbonatos. Los elementos Si y Mg se encuentran en baja concentración los cual se evidencia en su baja distribución en el mapeo, esto sugiere que provienen de los agregados de concreto.