

Caracterización y performance ambiental de carbones activados provenientes de residuos agrícolas

Characterization and environmental performance of activated carbons based on agricultural bio-waste

M. C. Gardey Merino ; L. M. Dufou ; G. A. Pastrana ; D. M. Valles 
D. F. A. Rivarola ; R. Piastrellini ; A. P. Arena ; B. Villarroel Rocha 
K. Sapag 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.26076>

Scientific and technological research paper

Abstract—Solar adsorption refrigeration is a suitable alternative for rural regions without reliable access to electricity, and its performance strongly depends on the adsorbent–refrigerant pair employed. Activated carbons derived from agricultural bio-waste offer a low-cost and environmentally favorable option; however, most studies have focused exclusively on optimizing their physicochemical properties without integrating the environmental assessment of their production processes. This work addresses this gap by evaluating the technical and environmental performance of activated carbons obtained through physical activation of peach pits, plum pits, and almond shells, with the purpose of identifying the most appropriate material for adsorption solar refrigeration using methanol. The materials were produced through carbonization and activation with carbon dioxide and characterized to determine their textural structure, surface morphology, chemical composition, and thermal behavior. The activated carbon produced from almond shells showed the highest specific surface area, as well as greater pore volume and pore size, characteristics that enhance methanol adsorption and desorption. In parallel, the environmental impacts associated with the production of each material were assessed through a life cycle assessment, revealing that activated carbons derived from almond shells exhibited the best overall environmental performance. The results demonstrate that the valorization of fruit biowaste enables the production of technically efficient and environmentally advantageous adsorbent materials for solar refrigeration applications, highlighting the relevance of combining material characterization with environmental evaluation in the development of sustainable technologies.

Index Terms— Biowaste, Life Cycle Assessment, Porous Materials, Solar Adsorption.

Resumen— La refrigeración solar por adsorción constituye una alternativa apropiada para zonas rurales sin acceso confiable a energía eléctrica, y su desempeño depende en gran medida del par adsorbente–adsorbato utilizado. El carbón activado obtenido a partir de biomasa residual agrícola representa una opción de bajo costo y bajo impacto ambiental, pero la literatura disponible se ha centrado mayormente en optimizar sus propiedades fisicoquímicas sin integrar de manera sistemática la evaluación ambiental de sus procesos de obtención. El presente trabajo aborda esta brecha mediante la producción y análisis integral de carbones activados obtenidos por activación física de carozos de durazno, ciruela y almendra, con el fin de determinar su idoneidad técnica y ambiental para aplicaciones en refrigeración solar por adsorción con metanol. Los materiales fueron sintetizados mediante carbonización y activación con dióxido de carbono y caracterizados a través de técnicas que permitieron evaluar su estructura porosa, morfología superficial, composición química y comportamiento térmico. El carbón activado derivado del carozo de almendra presentó la mayor área específica, así como mayor volumen y tamaño de poro, propiedades que favorecen la adsorción y desorción del refrigerante. De manera complementaria, se evaluaron los impactos ambientales asociados a la producción de cada material mediante un análisis de ciclo de vida, identificándose que los carbones obtenidos a partir de almendra mostraron el mejor desempeño ambiental. Los resultados demuestran que la valorización de residuos frutícolas permite obtener materiales técnicamente eficientes y ambientalmente ventajosos para su aplicación en refrigeración solar.

Palabras clave— Adsorción Solar, Análisis de Ciclo de Vida, Biorresiduos, Materiales Porosos.

This manuscript was submitted on april 28, 2026, accepted on june 27, 2026 and published on june 30, 2026.

Gustavo A. Pastrana Licenciado en Higiene y Seguridad en el Trabajo. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), División de Separación Isotópica, Centro Tecnológico Pilcaniyeu, San Carlos de Bariloche, Argentina. Área de desempeño: Nuclear. Correo electrónico: gustavopastrana@cnea.gob.ar.

Dimar Villarroel-Rocha Doctor en Física. Instituto de Física Aplicada (INFAP-CONICET), Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina. Laboratorio de Sólidos Porosos (LabSoP). Área de desempeño: Materiales, Adsorción, Almacenamiento y Energía. Correo electrónico: dvillarroel@unsl.edu.ar.

Leandro Martín Dufou Técnico Químico. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), División de Separación Isotópica, Gerencia Centro Tecnológico Pilcaniyeu, San Carlos de Bariloche, Argentina. Área de desempeño: Química inorgánica. Correo electrónico: leandrodufou@cnea.gob.ar.

María Celeste Gardey Merino Doctora en Ciencia y Tecnología, Mención Materiales. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), División de Separación Isotópica, Gerencia Centro Tecnológico Pilcaniyeu, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Área de desempeño: Materiales, Medio Ambiente y Ciclo de Combustible Nuclear. Correo electrónico: mariagardey@cnea.gob.ar.

Karim Sapag Doctor en Ciencias. Instituto de Física Aplicada (INFAP-CONICET), Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina. Laboratorio de Sólidos Porosos (LabSoP). Área de desempeño: Desarrollo de Sólidos Porosos. Correo electrónico: sapag@unsl.edu.ar.

Dora Fanny Andrea Rivarola Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Mendoza, Argentina. Área de desempeño: huellas ambientales dentro de la producción sustentable. Correo electrónico: anrivarolagaray@gmail.com.

Roxana Piastrellini Doctora en Ingeniería, mención Civil-Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional – CONICET, Facultad Regional Mendoza, Grupo CLIOPE Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable, Mendoza, Argentina. Áreas de desempeño: análisis de ciclo de vida, bioenergía y desarrollo sustentable. Correo electrónico: roxana.piastrellini@docentes.frm.utn.edu.ar.

Alejandro Pablo Arena Doctor en Energética. Universidad Tecnológica Nacional – CONICET, Facultad Regional Mendoza, Grupo CLIOPE Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable, Mendoza, Argentina. Áreas de desempeño: análisis de ciclo de vida, energía y ambiente. Correo electrónico: aparena@gmail.com.



I. INTRODUCCIÓN

EN numerosas zonas rurales, la falta de acceso a la red eléctrica dificulta la conservación de alimentos y vacunas [1]. Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar sistemas de refrigeración de alta eficiencia y bajo impacto ambiental. La refrigeración solar representa una alternativa adecuada, ya que aprovecha la coincidencia entre la disponibilidad de radiación solar y el máximo requerimiento de frío. Entre los diferentes sistemas térmicos empleados con este fin se incluyen los de adsorción, absorción, disecadores y sistemas de extracción de aire. Los sistemas de adsorción requieren baja temperatura de la fuente de calor, presentan bajo potencial de agotamiento de la capa de ozono, son más robustos, menos complejos y no muestran problemas de cristalización en comparación con los sistemas de absorción [2]. Estos sistemas no utilizan compresores, funciona con calor residual (50-70 °C) y ofrece una alternativa sostenible para refrigeración, a menudo empleada en climas cálidos y sistemas solares. Para ello se valen de un par refrigerante constituido por un material sólido (adsorbato) y un material en estado líquido/gaseoso (adsorbente), siendo los más comunes sílica gel-agua, zeolita-agua y carbón activado-metanol [3]. En estos sistemas las propiedades térmicas del par refrigerante influyen notablemente en su rendimiento y deben ser seleccionados de acuerdo con las temperaturas de las fuentes de calor. El par refrigerante carbón activado-metanol se destaca frente a los otros dado que permite generar hielo y presenta un menor costo económico asociado [4].

Durante el desarrollo de un prototipo de refrigeración solar por adsorción se utilizó como par refrigerante un carbón activado granular y metanol. El área específica superficial del carbón granular medida con el método BET (Brunauer-Emmett-Teller) resultó de 1566 m²/g, y se lograron temperaturas de hasta 108,5°C en el colector durante un día con cielo claro y temperaturas de hasta -11,69°C en los 500 ml de agua que rodearon la evaporadora [5]. El carbón activado juega un importante rol sobre el rendimiento de este tipo de sistemas, ya que sus propiedades texturales y químicas determinan la capacidad de adsorción y, en consecuencia, la eficiencia del proceso de refrigeración. Estas propiedades texturales y químicas del carbón activado dependen en gran medida del proceso de activación seleccionado y de la materia prima utilizada [6], además de variables de operación, los insumos, el tiempo de residencia y las temperaturas de activación. Diversos residuos de biomasa han sido utilizados como precursores para la obtención de estos materiales, como ser las cáscaras de coco mediante activación física [7] y los carozos de durazno por activación química [8]. En general, la estructura porosa de los carbones activados determina su capacidad de adsorción, mientras que su estructura química influye en la interacción con adsorbatos polares y no polares, así como en la presencia de sitios activos capaces de promover interacciones químicas con otras moléculas [9]. Por esto, la caracterización detallada de estos materiales mediante técnicas ampliamente reconocidas como la adsorción de nitrógeno (BET, *Brunauer-Emmett-Teller*), la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), la espectroscopía infrarroja (FT-IR) o análisis térmicos, resulta

fundamental para entender la relación entre la estructura del material y su desempeño como adsorbente.

Por otra parte, la creciente necesidad de avanzar hacia modelos productivos más sustentables ha impulsado la implementación de estrategias de economía circular orientadas a la valorización de residuos agrícolas y agroindustriales como materia prima para producir materiales de alto valor agregado. En este contexto, varios residuos agrícolas han sido estudiados como precursores de carbones activados debido a su amplia disponibilidad, bajo costo y elevado contenido de carbono [9][10]. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se focaliza en optimizar las propiedades fisicoquímicas de los materiales, dejando vacíos en la integración entre dichas características y los impactos ambientales asociados al origen de la biomasa y a las rutas de producción. Entre los escasos estudios que abordan explícitamente la dimensión ambiental, se ha evaluado la contribución al calentamiento global asociada a la producción de carbón activado a partir de residuos de aserraderos, en comparación con el carbón activado de origen mineral, que muestran una reducción potencial de este impacto de hasta 65% [11].

La escasez de trabajos que integren de manera sistemática la caracterización fisicoquímica de los carbones activados con la evaluación ambiental de sus procesos de obtención limita la posibilidad de determinar si las alternativas basadas en biomasa residual agrícola constituyen soluciones más sustentables que otras alternativas. Esta integración ofrece una vía para contribuir al desarrollo de materiales y procesos alineados con los principios de la economía circular.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño técnico y ambiental de carbones activados obtenidos por activación física de biomasa residual agrícola (carozos de durazno, ciruela y almendra) a escala de laboratorio, con el fin de identificar el material más adecuado para su uso como par adsorbente junto con metanol en sistemas de refrigeración solar por adsorción. Para esto, se realizó una caracterización de los carbones activados obtenidos mediante técnicas fisicoquímicas y texturales, junto con una evaluación de los impactos ambientales asociados a los procesos productivos de cada precursor mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Los resultados permitirán desarrollar materiales adsorbentes a partir de residuos agrícolas, con potencial aplicación en refrigeración solar, y evaluar los beneficios ambientales frente a los carbones activados convencionales, favoreciendo la identificación de alternativas tecnológicas que respondan a las estrategias de la economía circular.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Obtención de los carbones activados

Los precursores se prepararon secando las cáscaras de los carozos en una estufa a 60 °C durante 24 h y luego triturándolas en un molino a discos. Para la síntesis, se utilizaron muestras de cáscara de durazno (*Prunus persica*), almendra (*Prunus dulcis*) y ciruela (*Prunus domestica*) con el fin de comparar los

rendimientos en masa y las propiedades texturales. El rendimiento (η) se definió como el cociente entre la masa de carbón activado obtenido (mCA) y la masa de cáscara de carozo introducida al horno (mCa), expresado en porcentaje (1):

$$\eta (\%) = mCA/mCa * 100 \quad (1)$$

Los crisoles con las muestras se introdujeron en un horno tubular equipado con tapones con entrada y salida de gases. Las muestras se calentaron bajo atmósfera de N_2 , a temperaturas de carbonización, manteniendo 500 °C durante 30 min. Posteriormente, se realizó la activación con CO_2 a 850 °C durante 120 min., con un flujo controlado de 330 ml/min. Una vez finalizada la carbonización-activación, los carbones activados se dejaron enfriar bajo una corriente de N_2 , hasta alcanzar una temperatura menor al umbral de autoinflamación. Las rampas de temperatura adoptadas en cada etapa se presentan en la Fig. 1.

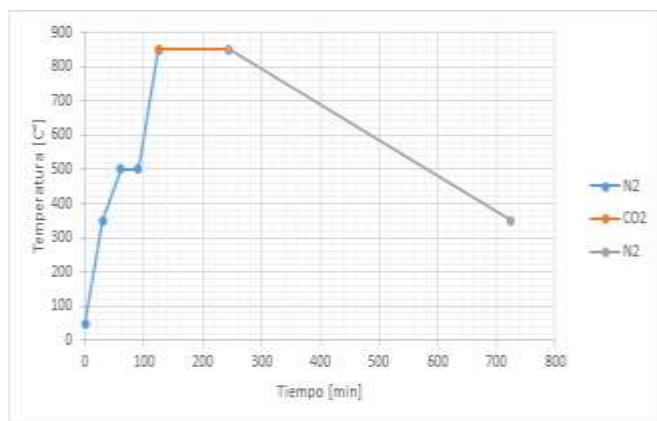


Fig. 1. Rampas de temperatura de Carbonización-Activación. Fuente: Autores.

De este modo, se obtuvieron tres muestras de carbones activados de diferente origen vegetal. En adelante, se las denominará de la siguiente manera: CCI (carbón activado obtenido del carozo de la ciruela), CDU (carbón activado obtenido del carozo del durazno) y CAL (carbón activado obtenido del carozo de la almendra).

B. Caracterización de los Carbones Activados

Se aplicaron diversas técnicas de caracterización. La técnica BET (*Brunauer–Emmett–Teller*) se utilizó para determinar las propiedades texturales de los materiales, la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para analizar la morfología superficial, y la Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS) para identificar la composición química. Además, se realizaron análisis térmicos DTA-TG en atmósferas de N_2 y O_2 , con el fin de evaluar el comportamiento térmico de las muestras. Finalmente, se realizaron ensayos de espectroscopía FT-IR para identificar los grupos funcionales presentes en la superficie.

El área específica y la adsorción de nitrógeno se determinaron mediante la técnica BET, utilizando un equipo ASAP 2020 de la firma MICROMERITICS. Previo al análisis, las muestras fueron desgastadas a 350°C durante 4 h, utilizando N_2 como gas adsorbato. La morfología superficial se estudió con un

Microscopio Electrónico de Barrido SEM FEI Inspect 550 equipado con un sistema de análisis elemental por EDS. Para la obtención de los espectros FT-IR se utilizó un espectrómetro SP 400- PERKIN ELMER, preparando pastillas de bromuro de potasio mezclado con cada una de las muestras. Los rangos de medición abarcaron de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} . El análisis térmico simultáneo (DTA/TG) se realizó en un equipo STA 409 de la firma NETZSCH, desde temperatura ambiente hasta 1000 °C, con una rampa de calentamiento de 10°C/min, bajo atmósferas de N_2 5.0 y de aire.

C. Evaluación Ambiental

El desempeño ambiental de los procesos de obtención de carbón activado a partir de cada precursor se evaluó mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para ello, se adoptaron los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 [12] e ISO 14044 [13]. La unidad funcional (UF) definida fue: “1 kg de carbón activado”. Esta UF se utilizó para los tres carbones activados, obtenidos a partir de carozos de ciruela, durazno y almendra, con propiedades de adsorción comparables, a escala de laboratorio. Los límites del sistema (Fig. 2) comprendieron los procesos de acondicionamiento de las citadas materias prima (secado, trituración, tamización), su carbonización y su activación, obteniéndose el carbón atrivado mediante el proceso de activación física descrito en el apartado II.C.

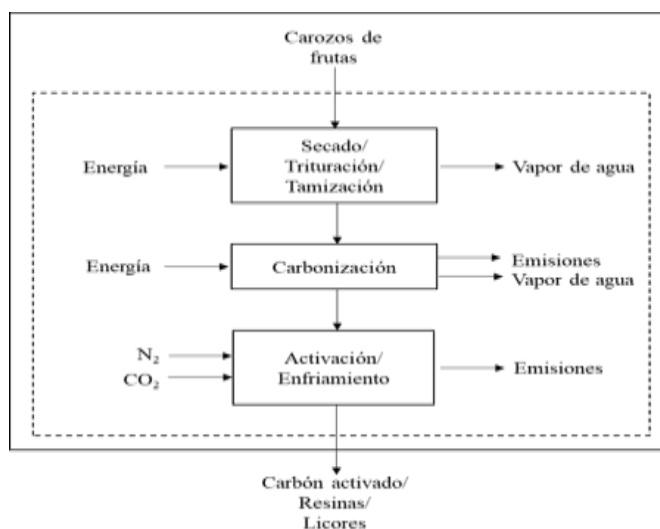


Fig. 2. Límites del sistema para la producción de carbones activados a partir de carozos de frutas. Fuente: Autores.

El proceso utilizó exclusivamente electricidad como fuente de energía. Las etapas con requerimientos energéticos significativos correspondieron al secado y a la calcinación, en tanto que la trituración y el tamizado se llevaron a cabo mediante operaciones mecánicas. La estimación del consumo energético se realizó teniendo en cuenta las características técnicas de los equipos utilizados y el tiempo de funcionamiento. Los consumos de materias primas e insumos

se determinaron a partir de mediciones directas realizadas durante los ensayos. Las emisiones de vapor de agua, monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otros gases se estimaron mediante cálculos basados en relaciones estequiométricas. Los licores y la fracción resinosa generados en el proceso de pirólisis se consideraron subproductos con valor comercial, aplicándose el criterio de asignación másica.

El modelado del sistema y la evaluación de los potenciales impactos ambientales se realizaron con el Software SimaPro Craft 10.3. La información referida a la producción de materiales y energía se obtuvo de la base de datos Ecoinvent 3.11. Se evaluaron las categorías de impacto: Cambio climático, Formación de ozono, Toxicidad humana, Formación de material particulado y Ecotoxicidad, mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de los Carbones activados

Las propiedades texturales de los carbones activados, tales como el área específica superficial, el volumen y tamaño de los poros, influyen directamente en la cantidad de metanol que puede adsorberse y desorberse durante un ciclo de refrigeración, lo cual a su vez determina la capacidad de producción del hielo del sistema. Si bien la capacidad de adsorción es una propiedad inherente a los carbones activados, su determinación a nivel experimental depende de las condiciones de operación y de la metodología empleada [14].

La morfología superficial muestra una marcada dependencia del origen vegetal del precursor, aun cuando los materiales se obtienen mediante el mismo proceso de activación. A continuación, se analizan en forma conjunta las propiedades texturales y las características morfológicas de cada carbón vegetal para comprender la influencia del origen en la estructura final.

En la Fig. 3 se presentan las micrografías SEM obtenidas por los autores, para los tres carbones activados. En Fig. 3.a, correspondiente a la muestra CAL, se detectan cavidades amplias y algunas partículas de menor tamaño. En Fig. 3.b, vinculada a la muestra CCI, se exhiben cavidades circulares y de menor tamaño relativo. En Fig. 3.c, correspondiente al carbón CDU, se observan aglomeraciones con cavidades aún más pequeñas. Este tipo de morfología es característico de los carbones activados obtenidos a partir de biomasa, en los que la estructura original del precursor determina la presencia y distribución de las cavidades internas [15].

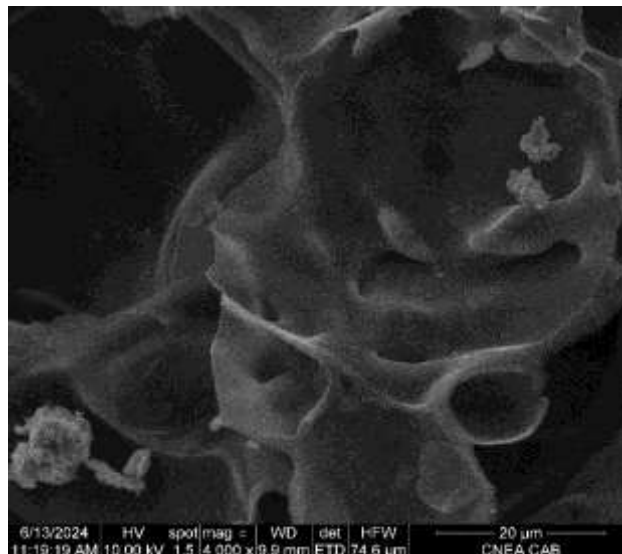


Fig. 3.a. Micrografía SEM de carbones activados CAL. Fuente: Autores.

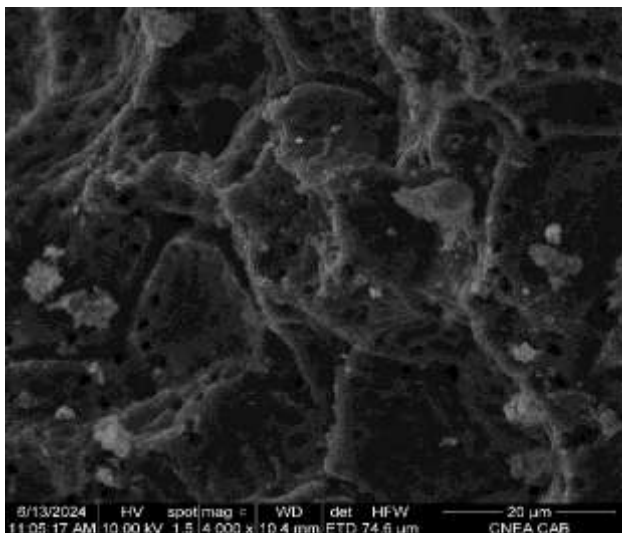


Fig. 3.b. Micrografía SEM de carbones activados CCI. Fuente: Autores.

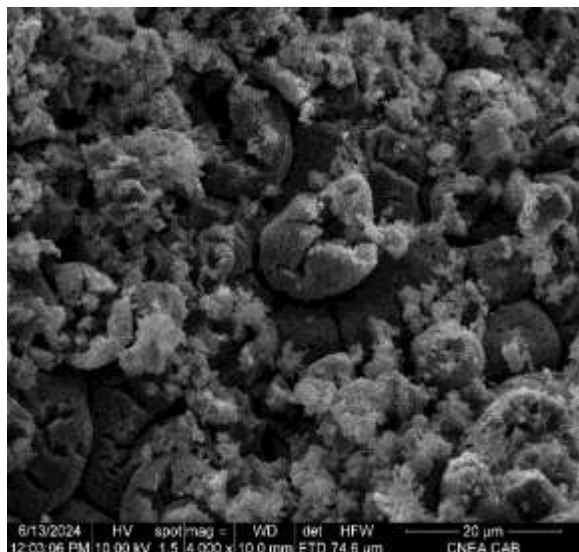


Fig. 3.c. Micrografía SEM de carbones activados CDU. Fuente: Autores.

La morfología del carbón CAL es más desarrollada, lo que se asocia con un mayor valor de área específica superficial ($670 \text{ m}^2/\text{g}$) en relación con las otras muestras analizadas. Estos resultados evidencian que el origen del precursor influye notablemente en la morfología superficial y en el desarrollo del área específica bajo idénticas condiciones de síntesis. Generalmente, los carbones activados producidos a partir de carozos y cáscaras de frutas pueden desarrollar elevadas áreas específicas, en algunos casos comparables o superiores a las de carbones comerciales, dependiendo de las condiciones de activación [9] [10], lo que refuerza el potencial de estos residuos agrícolas como precursores de materiales adsorbentes con buen desempeño.

Los rendimientos del proceso de activación, determinados mediante (1), y las áreas específicas determinadas por el método BET a partir de los datos de adsorción-desorción de N_2 a 77K (S_{BET}) se resumen en la Tabla I.

TABLA I
RENDIMIENTO Y S_{BET} DE LOS CARBONES ACTIVADOS

Muestra	Rendimiento (%)	S_{BET} (m^2/g)
CCI	12	$474 \pm 14 \text{ m}^2/\text{g}$
CDU	7	$422 \pm 13 \text{ m}^2/\text{g}$
CAL	7	$670 \pm 19 \text{ m}^2/\text{g}$

Las propiedades texturales y químicas de los carbones activados dependen de su proceso de activación y de la biomasa empleada como precursor, entre otras variables [15]. En concordancia con la morfología observada en las micrografías SEM, los valores de área específica resultaron, en todos los casos, superiores a $400 \text{ m}^2/\text{g}$. El mayor desarrollo textural se registró en la muestra CAL, que alcanzó un área específica de $670 \text{ m}^2/\text{g}$, coherente con la presencia de cavidades de mayor amplitud y una estructura más abierta. Si bien estos valores son representativos de la activación aplicada en este estudio, se ha

reportado que, mediante activación química, es posible obtener áreas aún mayores, del orden de $1200 \text{ m}^2/\text{g}$ para carbones activados obtenidos a partir de carozos de durazno [15].

Por otro lado, en el proceso de adsorción-desorción del metanol también intervienen de manera decisiva el volumen, el tamaño y la distribución de los poros. Estos parámetros complementan al área específica en la determinación del desempeño adsorbente. En la Tabla II se presentan los valores obtenidos para el volumen total de poros y el tamaño medio de poro. Una vez más, se observa que la muestra CAL presenta los mayores valores entre los tres carbones evaluados.

A la vista de los resultados obtenidos y en concordancia con

TABLA II
PROPIEDADES TEXTURALES DE LOS CARBONES ACTIVADOS

Muestra	Rendimiento (%)	S_{BET} (m^2/g)
CCI	0,261	22
CDU	0,220	21
CAL	0,384	23

lo reportado en la literatura [9], la muestra CAL resulta ser la más apropiada para aplicaciones en refrigeración solar por adsorción, dado que un mayor tamaño de poro favorece la difusión del metanol y, por lo tanto, aumenta la capacidad de adsorción del material. Grandes áreas superficiales y porosidad facilitan una alta capacidad de adsorción para las moléculas de metanol. Esto se traduce en un aumento potencial de extracción de calor durante el proceso de adsorción, contribuyendo a un enfriamiento eficiente [16].

En la Fig. 4.a se observa la micrografía SEM correspondiente a la muestra CCI, en la cual se realizaron análisis EDS en diferentes áreas seleccionadas (AS). Los espectros obtenidos para AS1 y AS2 se presentan en las Fig. 4.b y 4.c, respectivamente. En ambos casos, es posible distinguir las líneas características tipo K correspondientes a C, O, K y Ca, entre otros elementos (Tabla III).

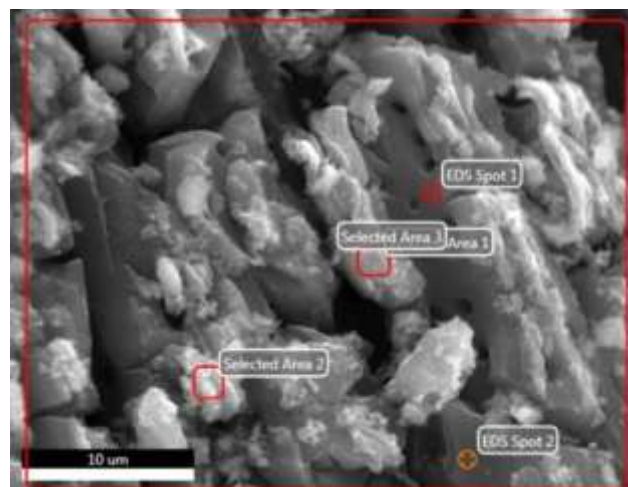


Fig. 4.a. Micrografía SEM de la muestra CCI con puntos y áreas seleccionadas para análisis EDS. Fuente: Autores.

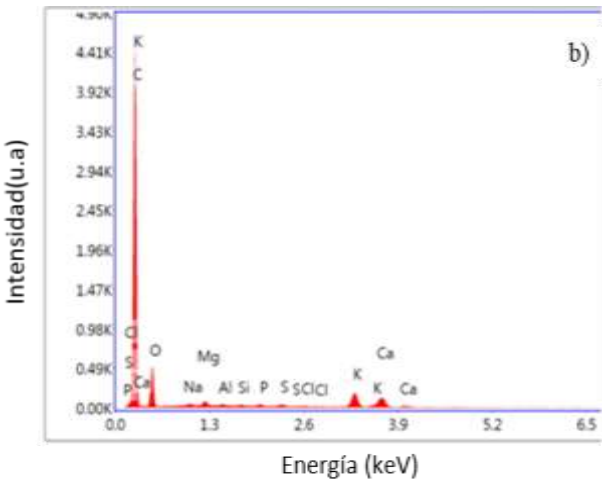


Fig. 4.b. Espectro para “Área selecta 1” de la muestra CCI. Fuente: Autores.

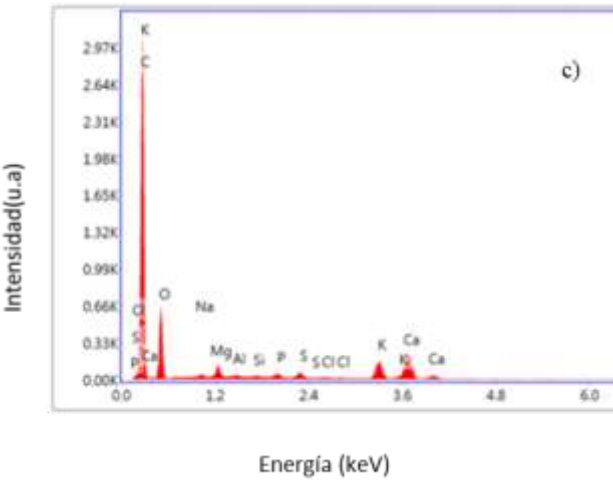


Fig. 4.c. Espectro para “Área selecta 2” de la muestra CCI. Fuente: Autores.

Ambas áreas analizadas presentan composiciones similares y un mayor porcentaje relativo de C en relación al O, lo cual es consistente con la estructura carbonosa obtenida luego del proceso de activación.

Por otra parte, en la Fig. 5.a se observa la micrografía SEM de la muestra CDU, sobre la cual se analizaron las áreas seleccionadas AS3 y AS4. Los espectros EDS obtenidos para estas áreas se presentan en las Fig. 5.b y 5.c, respectivamente. En ambos casos es posible distinguir las líneas características tipo K correspondientes a C, O, K, Ca y Si, entre otros elementos. Ambas áreas son similares en composición y, al igual que lo observado para la muestra CCI, presentan un mayor porcentaje relativo de C en relación con el O.

TABLA III
COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA CADA ÁREA SELECTA DE LOS CARBONES ACTIVADOS

Muestra	CCI		CDU		CAL	
Elemento	AS1 (wt.%)	AS2 (wt.%)	AS3 (wt.%)	AS4 (wt.%)	AS1 (wt.%)	AS3 (wt.%)
C K	70.2	60.8	49.7	66.4	7.6	9.7
O K	23.1	28.4	31.2	23.3	45.1	41.1
NaK	0.9	0.8	2.1	1.0	2.0	3.1
MgK	0.7	1.2	1.3	0.7	0.5	1.0
AlK	0.3	0.3	1.8	0.6	0.4	2.5
SiK	0.2	0.2	3.4	0.6	1.3	9.5
P K	0.2	0.5	0.4	0.2	0.8	0.4
S K	0.2	0.5	0.2	-	-	-
ClK	0.1	0.1	-	-	-	-
K K	2.1	2.5	5.7	5.6	5.4	-
CaK	2.0	4.6	3.9	1.6	36.4	-
TiK	-	-	-	-	-	0.3
FeK	-	-	0.3	-	0.5	2.2

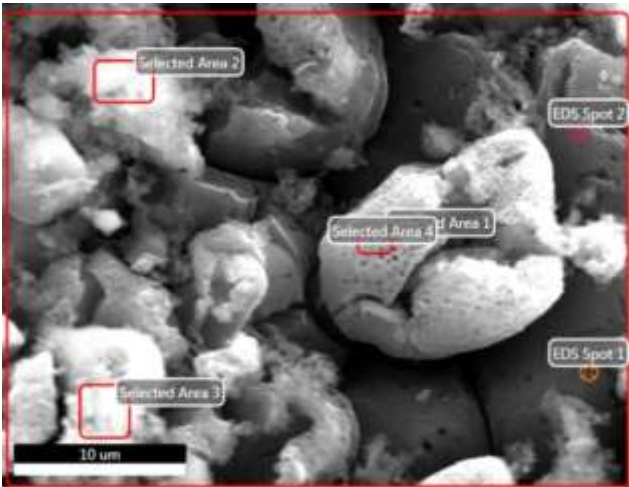


Fig. 5.a. Micrografía SEM de la muestra CDU con puntos y áreas seleccionadas para análisis EDS. Fuente: Autores.

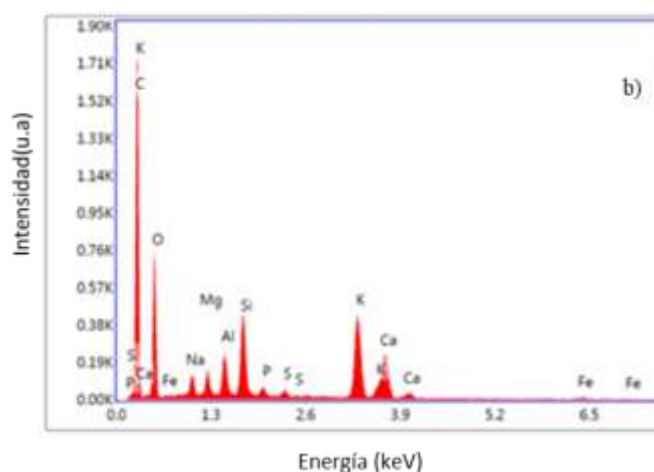


Fig. 5.b. Espectro para "Área selecta 3" de la muestra CDU. Fuente: Autores.

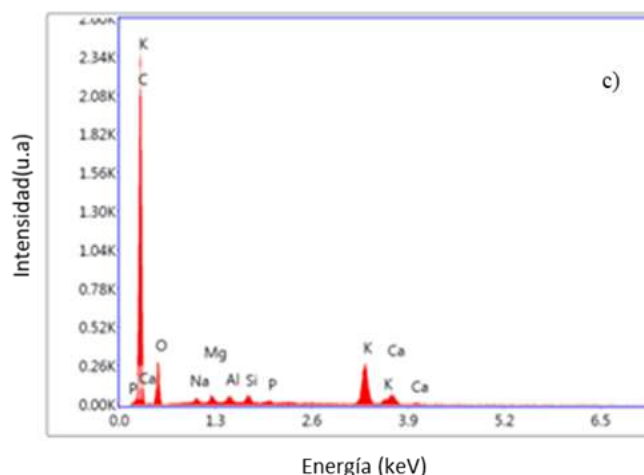


Fig. 5.c. Espectro para "Área selecta 4" de la muestra CDU. Fuente: Autores.

En la muestra CAL, cuya micrografía se presenta en la Fig. 6.a, se seleccionaron dos áreas de análisis, AS1 y AS3 para realizar los estudios por EDS. Los espectros obtenidos se muestran en las Fig. 6.b y 6.c, respectivamente. En esta muestra se puede distinguir un mayor número de líneas características tipo K, lo que evidencia la presencia de un mayor número de elementos, tales como C, O, K, Ca, Si, Al y Fe. Además, el porcentaje de O es mayor al de C, en relación con los otros carbones activados analizados. Estas diferencias en la composición química superficial podrían influir notablemente en los mecanismos de adsorción-desorción de metanol [17], afectando la interacción química y la estabilidad térmica del material.

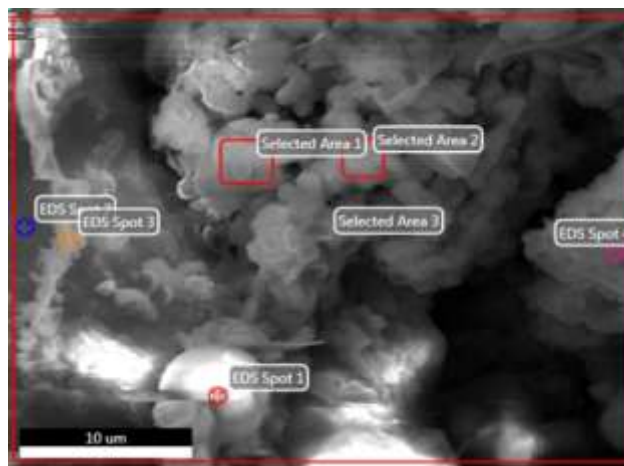


Fig. 6.a. Micrografía SEM de la muestra CAL con puntos y áreas seleccionadas para análisis EDS. Fuente: Autores.

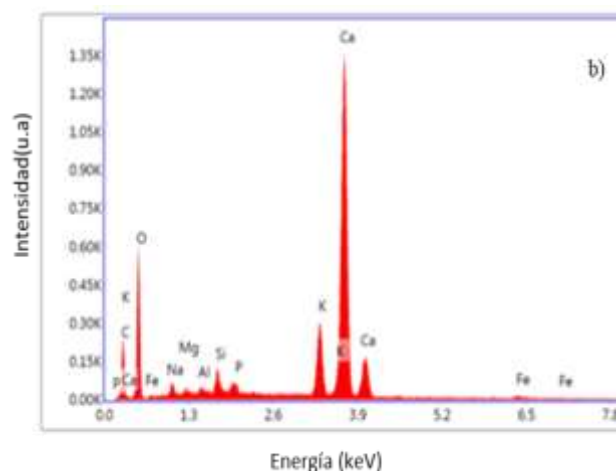


Fig. 6.b. Espectro para "Área selecta 1" de la muestra CAL. Fuente: Autores.

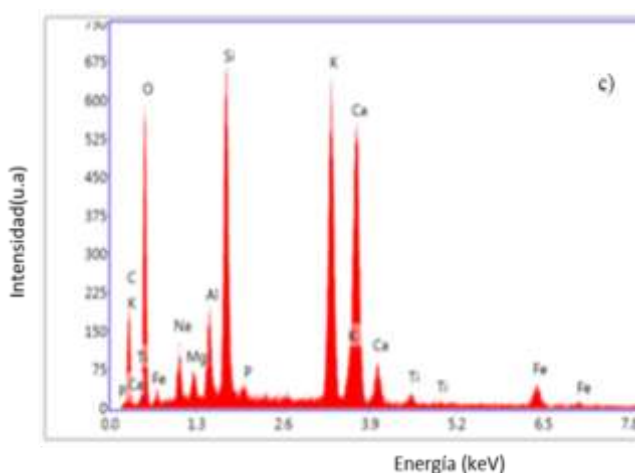


Fig. 6.c. Espectro para "Área selecta 3" de la muestra CAL. Fuente: Autores.

Para carbones activados obtenidos a partir de distintos precursores se registraron curvas térmicas disímiles. Las curvas DTA-TG en atmósfera de N_2 se muestran en las Fig. 7. En Fig.

7.a, correspondiente a la muestra CDU, se observa una zona endotérmica a los 73 °C relacionada con pérdidas de agua por deshidratación. Además, se observa un pico exotérmico a los 634 °C, posiblemente vinculado con la pérdida de compuestos volátiles y, coincidente con una pronunciada pérdida de masa en la curva TG. La pérdida de masa total durante el análisis fue de 10%. Para la muestra CCI (Fig. 7.c), la pérdida de compuestos volátiles ocurre a los 761 °C, mientras que en la muestra CDU se produce a los 578 °C, siendo esta última la menor temperatura entre los carbones activados estudiados. Estas variaciones indican que la estabilidad térmica y la naturaleza de los grupos funcionales presentes dependen en gran medida del origen del precursor.

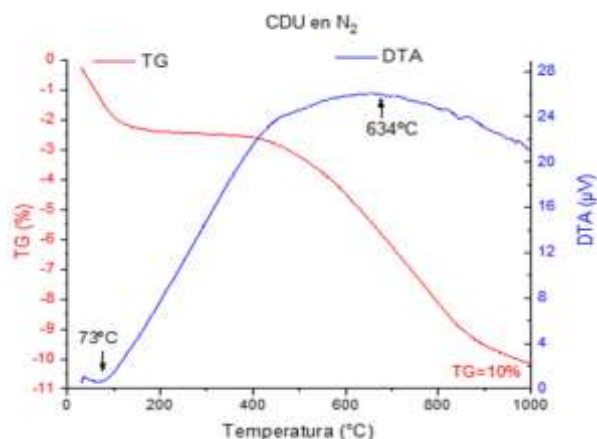


Fig. 7.a. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CDU obtenida bajo atmósfera de N₂. Fuente: Autores.

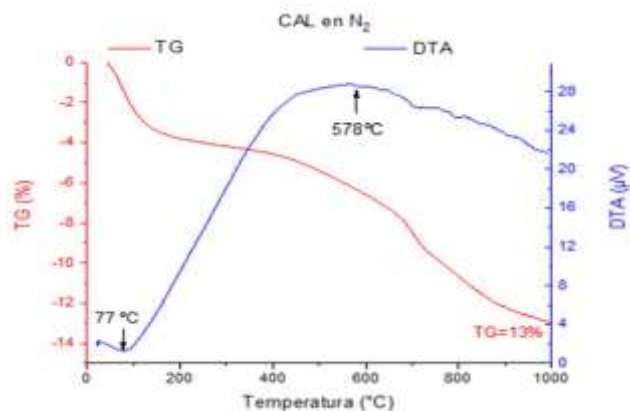


Fig. 7.b. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CAL obtenida bajo atmósfera de N₂. Fuente: Autores.

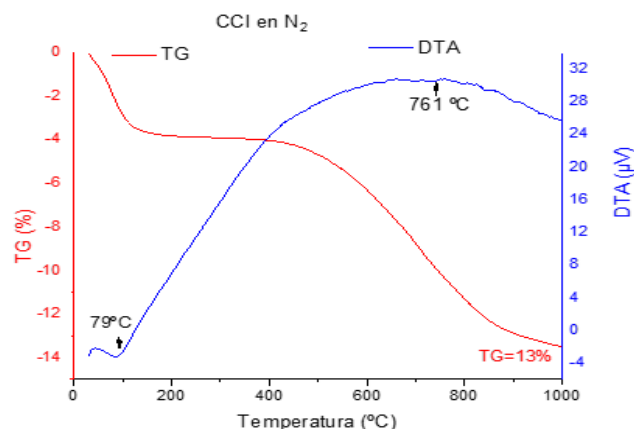


Fig. 7.c. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CCI obtenida bajo atmósfera de N₂. Fuente: Autores.

Las curvas DTA-TG obtenidas en atmósfera oxidante (O₂) también muestran diferencias relevantes según el origen del carbón activado estudiado Fig.8.

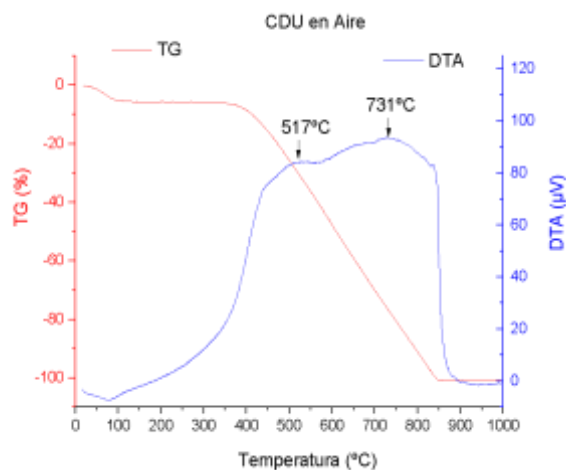


Fig. 8.a. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CDU obtenida en atmósfera de aire. Fuente: Autores.

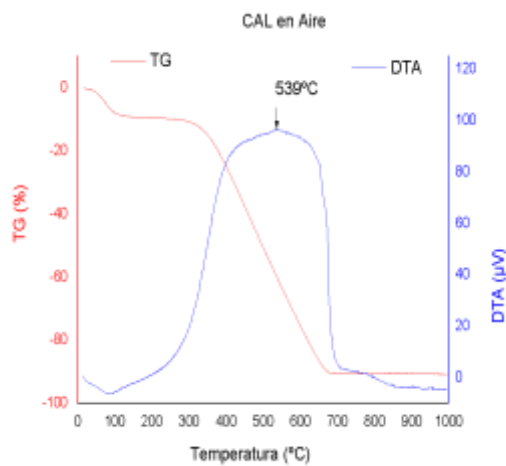


Fig. 8.b. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CAL obtenida en atmósfera de aire. Fuente: Autores.

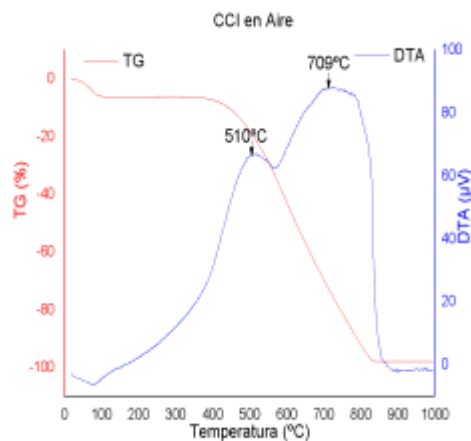


Fig. 8.c. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TG–DTA) de CCI obtenida en atmósfera de aire. Fuente: Autores.

Para la muestra CDU (Fig. 8.a) se registran dos zonas exotérmicas con picos a los 517 °C y a los 731 °C. Estos picos podrían estar vinculados con la combustión de materia orgánica remanente [15]. De forma similar, la muestra CCI (Fig. 8.c) presenta dos picos exotérmicos a 510 °C y a 709 °C. Por el contrario, en la muestra CAL (Fig. 8.b) se observa solo una zona exotérmica a los 539 °C. Teniendo en cuenta que este CAL, obtenido a partir del carozo de la almendra, presenta la mayor área específica BET y un tamaño de poro superior, es probable que su estructura altamente accesible favorezca una mayor reactividad y, en consecuencia, inicie su combustión a menor temperatura.

B. Evaluación de impactos de ciclo de vida

En la Tabla IV se presentan los resultados de la evaluación de impactos de ciclo de vida para los distintos carbones activados analizados. Se observa que el carbón activado obtenido a partir de partículas de almendra menores a 10 mm (CAL<10mm) presenta los mayores valores de impacto en las categorías

asociadas con la formación de ozono. Esto se debe principalmente a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) generadas durante la carbonización de la biomasa, los cuales actúan como precursores clave en la formación de ozono troposférico al reaccionar con los óxidos de nitrógeno (NOx) en presencia de radiación solar.

TABLA IV
RESULTADOS DE IMPACTO CARACTERIZADOS

Categoría	Unidad	CDU	CCI > 10mm	CCI < 10mm	CAL > 10mm	CAL < 10mm
CG	kg CO ₂ eq	8,14	8,95	12,13	4,52	8,80
THC	kg 1,4-DCB	1,22	1,26	1,64	0,72	1,21
FOSH	kg NOx eq	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10
ET	kg 1,4-DCB	19,11	21,16	27,53	12,20	20,15
EAD	kg 1,4-DCB	0,33	0,37	0,49	0,21	0,34
FOET	kg NOx eq	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15
THnC	kg 1,4-DCB	7,91	8,23	11,22	4,01	8,43
FMP	kg PM2.5 eq	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
EM	kg 1,4-DCB	0,42	0,48	0,63	0,27	0,44

CG: Calentamiento global; THC: Toxicidad humana-carcinogénica; FOSH: Formación de ozono-salud humana; ET: Ecotoxicidad terrestre; EAD: Ecotoxicidad de agua dulce; FOET: Formación de ozono-ecosistemas terrestres; THnC: Toxicidad humana-no carcinogénica; FMP: Formación de material particulado; EM: Ecotoxicidad marina.

En el resto de las categorías analizadas, los mayores valores de impacto corresponden al carbón activado obtenido a partir de partículas de ciruela menores a 10 mm (CCI<10mm). La cantidad de biomasa procesada fue diferente en cada ensayo (entre 10,5 y 27,7 g) y en ningún caso se operó con la capacidad máxima de los equipos. Además, las condiciones de proceso, como la cantidad de N₂ y CO₂, y los tiempos de secado y calcinación, se mantuvieron constantes en todos los casos. Esta situación explica el mayor consumo de gases y electricidad por kilogramo de carozo empleado, así como los mayores valores de impacto ambiental que se obtuvieron para este tratamiento, en comparación con los demás.

La producción del N₂ utilizado en la etapa de activación se identifica como el proceso con mayor contribución a las categorías formación de material particulado fino y toxicidad humana (carcinogénica y no carcinogénica). Por otra parte, la producción de CO₂, también empleado en la activación, es el principal contribuyente a la ecotoxicidad terrestre. En las categorías ecotoxicidad en agua dulce y marina, los mayores impactos se asocian a la generación y distribución de electricidad. Finalmente, en la categoría cambio climático destacan la producción de N₂ y la electricidad requerida para el secado y la calcinación (Fig. 9).

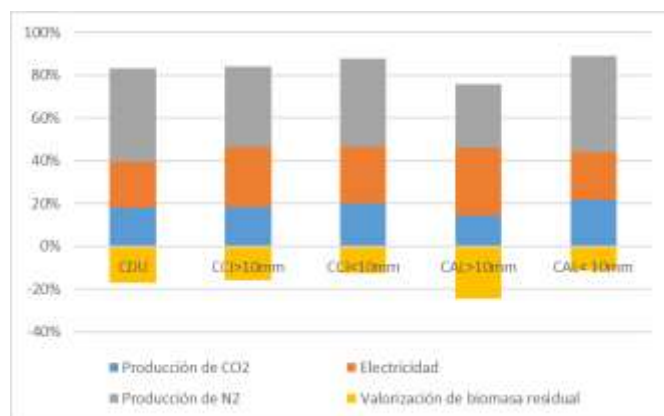


Fig. 9. Contribución relativa de procesos al impacto en cambio climático. Fuente: Autores.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, puede afirmarse que la eficiencia en el uso de recursos, particularmente de gases y energía, constituye un aspecto clave a optimizar en futuros ensayos.

El mejor desempeño ambiental, considerando todas las categorías evaluadas, corresponde al carbón activado producido con partículas de almendra mayores a 10 mm (CAL>10mm) (Tabla IV). Se destaca que, tanto para CAL como para CCI, el empleo de partículas de mayor tamaño condujo a menores valores de impacto que las de menor tamaño.

A pesar de las diferencias observadas en el desempeño ambiental de los distintos tratamientos, el uso de carozos como materia prima para la producción de carbón activado genera, en todos los casos analizados, importantes beneficios ambientales. Estos derivan del aprovechamiento de un residuo que, en ausencia de valorización, sería dispuesto en vertederos ocasionando emisiones de GEI y liberando contaminantes al suelo y al agua. Dichos beneficios se reflejan como reducciones en los valores netos de las distintas categorías de impacto, alcanzando el 32% en cambio climático (Fig. 9), 19% en ecotoxicidad y 27% en toxicidad humana (no carcinogénica), para el caso de CAL>10mm. Incluso en los casos con peor desempeño ambiental, los beneficios resultan relevantes, con disminuciones netas del 13% en cambio climático y del 8% en otras categorías de impacto.

Los impactos ambientales asociados a la producción de carbones activados varían ampliamente, principalmente debido a las diferencias en las características de la biomasa y en los procedimientos de activación utilizados. No obstante, en la categoría cambio climático, los resultados obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango de valores reportados en la literatura. Por ejemplo, en [18] se informaron emisiones de 7,5 kg CO₂ eq/kg y 9,2 kg CO₂ eq/kg para carbones activados obtenidos a partir de cáscara de coco y de residuos de la industria maderera, respectivamente. De manera similar, en [19] reportaron un valor de 8,6 kg CO₂ eq/kg para carbón activado producido a partir de madera de coníferas. En dicho estudio, los autores identificaron que la principal contribución

al cambio climático proviene de la energía requerida en las etapas de carbonización y activación, lo cual coincide con lo observado en el presente trabajo. Sin embargo, cabe destacar que la fuente de energía difiere entre ambos estudios, ya que en [19] reportan el uso, además de electricidad, de gas natural para la activación y GLP para la carbonización. Por otra parte, en [20] reportaron valores considerablemente más elevados para carbón activado producido a partir de hojas de olivo (5,2 kg CO₂ eq/g) e identificaron a la activación química con H₃PO₄ como el proceso de mayor contribución al impacto evaluado. Este resultado refuerza la gran influencia del agente y del método de activación en el desempeño ambiental de los carbones activados.

IV. CONCLUSIÓN

Se obtuvieron carbones activados a partir de carozos de durazno, ciruela y almendra a escala de laboratorio mediante activación física. Se evaluaron sus propiedades físicas y químicas, así como su desempeño ambiental mediante un análisis de ciclo de vida.

Los resultados muestran que el origen de la biomasa precursora influye considerablemente en las propiedades texturales, químicas y térmicas de los carbones activados, aun cuando se aplica un mismo proceso de activación. En particular, el carbón activado obtenido a partir de carozos de almendra presentó la mayor área específica (670 m²/g), junto con un mayor volumen y tamaño de poro. Estas características favorecen su capacidad de adsorción-desorción de metanol, lo que lo hace adecuado para su aplicación en sistemas de refrigeración solar por adsorción.

Las diferencias observadas en la composición química entre los distintos carbones (principalmente en el contenido relativo de carbono y oxígeno), junto con las variaciones en su morfología superficial, podrían explicar los comportamientos térmicos diferenciales evidenciados en los análisis DTA-TG. Cabe destacar que el carbón obtenido del carozo de almendra mostró una mayor reactividad, reflejada en la aparición de un único pico exotérmico a menor temperatura, lo cual sugiere una combustión más eficiente.

El análisis de ciclo de vida evidenció que la eficiencia en el uso de gases de activación (N₂ y CO₂) y en el uso de energía eléctrica constituyen factores determinantes en el desempeño ambiental de los carbones activados. El carbón activado obtenido con partículas de almendra mayores a 10 mm presentó los menores valores de impacto en la mayoría de las categorías evaluadas, especialmente en cambio climático, ecotoxicidad y toxicidad humana. Más allá de las diferencias entre tratamientos, el aprovechamiento de carozos como materia prima para la producción de carbones activados implica un beneficio ambiental neto, al valorizar un residuo agroindustrial y evitar su disposición en vertederos. De esta manera, se contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la promoción de estrategias de economía circular en el sector de materiales adsorbentes. El Análisis de Ciclo de Vida muestra, por otra parte, los aspectos que más contribuyen al impacto determinado, y brinda estrategias para

su solución, considerando la dificultad asociada con su implementación, y el potencial beneficio. Por ejemplo, se identificó que la electricidad consumida en algunos procesos contribuye significativamente al potencial de cambio climático, lo que en la actualidad puede reducirse simplemente cambiando el proveedor por uno basado en fuentes renovables. En conjunto, los resultados indican que el carbón activado obtenido a partir del carozo de almendra no solo presenta un desempeño técnico favorable, sino también ventajas ambientales, lo que lo convierte en una opción prometedora para su aplicación en sistemas de refrigeración solar de bajo impacto ambiental. No obstante, dado que los procedimientos aplicados a escala de laboratorio pueden diferir de los procesos industriales, los resultados deben interpretarse con cautela. Será necesario profundizar en la optimización del uso de recursos (energía y gases) a nivel de laboratorio y, posteriormente, evaluar la viabilidad técnica y económica del proceso a escala industrial.

REFERENCES

- [1] A. M. Abdel-Dayem and M. Abdulrahman Baharith, "Numerical simulation and optimization of a solar adsorption icemaker," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 40, no. 4, pp. 1033–1043, 2022. <https://doi.org/10.18280/ijht.400421>
- [2] A. Mostafa, M. Hassanain, and E. Elgendy, "Transient simulation and design parameters optimization of a cold store utilizing a solar-assisted adsorption refrigeration system," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 37, Art. no. 102273, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102273>
- [3] R. Wang, L. Wang, and J. Wu, *Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application*. Singapore: John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118197448>
- [4] G. Adenane, B. Mohammed, and G. Mea, "Effect of operating temperatures and working pairs on performance of solar adsorption cooling system," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 1280–1286, 2021. <https://doi.org/10.18280/ijht.390426>
- [5] F. Nollas, "Diseño, construcción y evaluación de prototipo de refrigerador solar por adsorción," M.S. thesis, Inst. Invest. Energía No Convencional, Univ. Nac. Salta, Salta, Argentina, 2023.
- [6] A. Sartarelli and E. Cyrulies, "Entalpía isostérica de adsorción de metanol en carbones activados con alto grado de microporosidad," *Av. Energías Renov. Medio Ambiente*, vol. 23, pp. 02.01–02.12, 2019.
- [7] N. Arena, J. Lee, and R. Clift, "Life cycle assessment of activated carbon production from coconut shells," *J. Clean. Prod.*, vol. 125, pp. 68–77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.073>
- [8] J. J. Arroyo-Gómez et al., "Applicability of activated carbon obtained from peach stone as an electrochemical sensor for detecting caffeine," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 822, pp. 171–176, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.05.028>
- [9] O. Ioannidou and A. Zabaniotou, "Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 9, pp. 1966–2005, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- [10] A. Demirbas, "Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, no. 1–3, pp. 1–9, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.114>
- [11] R. Piastrellini et al., "Evaluación ambiental del aprovechamiento de aserrín para la producción de carbones activados destinados a sistemas de refrigeración solar por adsorción," *Braz. J. Anim. Environ. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 480–489, 2022. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-037>
- [12] Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines, ISO Standard 14044, 2006.
- [13] Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework, ISO Standard 14040, 2006.
- [14] I. I. El-Sharkawy, M. Hassan, B. B. Saha, S. Koyama, and M. M. Nasr, "Study on adsorption of methanol onto carbon-based adsorbents," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 7, pp. 1579–1586, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.06.011>
- [15] S. Harabi et al., "Adsorption of pesticides on activated carbons from peach stones," *Processes*, vol. 12, Art. no. 238, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12010238>
- [16] L. Listiawati, J. Istant, and M. Ivandy, "Solar-powered adsorption cooling using activated carbon and methanol: Efficiency, feasibility, and optimization pathways," *J. Mekintek*, vol. 15, no. 2, pp. 34–42, 2024.
- [17] Manual de carbón activo, Univ. Sevilla, Sevilla, Spain, 2022. [Online]. Available: <https://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- [18] A. Vilén et al., "Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials," 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116356>
- [19] H. Gu, R. Bergman, N. Anderson, and S. Alanya-Rosenbaum, "Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass," *Wood Fiber Sci.*, vol. 50, pp. 229–243, 2018. <https://doi.org/10.22382/wfs-2018-024>
- [20] M. Amin et al., "Conversion of waste biomass into activated carbon and evaluation of environmental consequences using life cycle assessment," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 11, Art. no. 5741, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12115741>

Gustavo A. Pastrana is a graduate in Occupational Health and Safety and is affiliated with the Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina, where he is involved in activities related to nuclear science and technology. He is associated with the Isotopic Separation Division, Centro Tecnológico Pilcaniyeu. His areas of expertise include nuclear science, occupational health and safety, and nuclear technology. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2112-6306>

Dimar Villarroel-Rocha holds a Ph.D. in Physics and is affiliated with the Instituto de Física Aplicada (INFAP-CONICET), Universidad Nacional de San Luis, Argentina, where he is a member of the Laboratory of Porous Solids (LabSoP). His areas of expertise include materials, adsorption, energy storage, and energy. His academic interests focus on the development and characterization of materials for adsorption and energy-related applications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-0264>.

Leandro Martín Dufou is a Chemical Technician and is affiliated with the Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina, where he is associated with the Isotopic Separation Division, Centro Tecnológico Pilcaniyeu. His area of expertise includes inorganic chemistry. His academic and professional interests focus on chemical processes, isotopic separation, and nuclear technology.

María Celeste Gardey Merino holds a Ph.D. in Science and Technology, with a specialization in Materials, and is affiliated with the Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. She is associated with the Isotopic Separation Division, Centro Tecnológico Pilcaniyeu. Her areas of expertise include materials, environmental science, and the nuclear fuel cycle. Her academic interests focus on materials development, environmental applications, and processes related to the nuclear fuel cycle. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6616-3545>

Karim Sapag holds a Ph.D. in Sciences and is affiliated with the Instituto de Física Aplicada (INFAP-CONICET), Universidad Nacional de San Luis, Argentina, where he is a member of the Laboratory of Porous Solids (LabSoP). His areas of expertise include porous materials, adsorption, catalysis, and the development of porous solids. His academic interests focus on the synthesis, characterization, and application of porous materials for adsorption and catalytic processes. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2266-1363>

Dora Fanny Andrea Rivarola is a Specialist in Environmental Engineering and is affiliated with the Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina. Her area of expertise includes environmental assessment and environmental footprints within sustainable production. Her academic interests focus on environmental sustainability and the evaluation of environmental impacts associated with sustainable production processes.

Roxana Piastrellini holds a Ph.D. in Engineering, with a specialization in Civil-Environmental Engineering, and is affiliated with the Universidad Tecnológica Nacional – CONICET, Facultad Regional Mendoza, Argentina. She is a member of the CLIOPE Energy, Environment and Sustainable Development Group. Her areas of expertise include life cycle assessment, bioenergy, and sustainable development. Her academic interests focus on life cycle assessment, bioenergy, environmental sustainability, and sustainable energy systems. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0936-9325>

Alejandro Pablo Arena holds a Ph.D. in Energy Engineering and is affiliated with the Universidad Tecnológica Nacional – CONICET, Facultad Regional Mendoza, Argentina. He is a member of the CLIOPE Energy, Environment and Sustainable Development Group. His areas of expertise include life cycle assessment, energy, and environmental analysis. His academic interests focus on life cycle assessment, energy systems, environmental sustainability, and the evaluation of environmental impacts associated with energy and production systems. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1073-8039>