

Obtención y Caracterización de Nanopartículas de Sílice (SiO₂) a Partir de Biochar de Cáscara de Arroz: Una Estrategia de Valorización de Residuo Agroindustrial

Presentación: 23/10/2025

Silvana Tourn

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica, Argentina.
tournsilvana@ca.frre.utn.edu.ar

Nora Pellegrini

Universidad Nacional de Rosario – CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Instituto de Física Rosario, Rosario, Argentina.
pellegrini@ifir-conicet.gov.ar

Resumen

El presente estudio se centra en la valorización de la cáscara de arroz residual, enfocándose en la obtención de nanopartículas de sílice (SiO₂) de alto valor agregado. La materia prima, previamente purificada con HCl 0.1 N, fue sometida a pirólisis a 400 °C en lecho fijo, obteniendo un alto rendimiento de biochar (55.0%p). El biochar se transformó en sílice mediante un tratamiento térmico controlado hasta 600 °C, seguido de una purificación ácido-lavado. La caracterización del producto final reveló una nanoestructura altamente texturizada y porosa, formada por agregados de partículas primarias de ~5 a 25 nm (TEM). El análisis elemental (EDS) confirmó que la matriz final es principalmente silíceo (O: 47.8 %p; Si: 40.6 %p), demostrando que la secuencia de pirólisis y post-tratamiento es una estrategia efectiva para obtener sílice nanoestructurada a partir de residuos agroindustriales.

Palabras Claves: Cáscara de Arroz, Pirólisis, Biochar, Nanopartículas de Sílice (SiO₂), SEM-TEM, Valorización de Biomasa.

Abstract

This study focuses on the valorization of residual rice husk, emphasizing the obtaining of high-value added silica (SiO₂) nanoparticles. The raw material, previously purified with 0.1 N HCl, was subjected to pyrolysis at 400 °C in a fixed-bed reactor, yielding a high biochar production (55.0wt%). The biochar was converted into silica through a controlled thermal treatment up to 600 °C, followed by an acid-washing purification. Characterization of the final product revealed a highly texturized and porous nanostructure, composed of aggregates of primary particles ranging from ~5 to 25 nm (TEM). Elemental analysis (EDS) confirmed that the final matrix is mainly siliceous (O: 47.8 wt%; Si: 40.6 wt%), demonstrating that the sequence of pyrolysis and post-treatment is an effective strategy for obtaining nanostructured silica from agro-industrial waste.

Keywords: Rice Husk, Pyrolysis, Biochar, Silica Nanoparticles (SiO₂), SEM-TEM, Biomass Valorization.

1. Introducción

Con miras a cumplir con el Acuerdo de París (2015) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los países concentran esfuerzos en diversificar la matriz energética e incorporar alternativas renovables. En este marco, la región del Nordeste Argentino (NEA) presenta un gran potencial bioenergético a partir de la biomasa.

De acuerdo con el estudio WISDOM Argentina (Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping), realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) junto al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Secretaría de Energía de la Nación, la contribución de la biomasa a la Oferta Interna de Energía Primaria (OIEP) en 2005 fue de apenas el 3% (2.255 ktep). Sin embargo, el potencial estimado de biomasa comercialmente accesible y disponible asciende a más de 37.200 ktep, es decir, alrededor de la mitad de la oferta energética primaria del país (FAO, INTA & Secretaría de Energía de la Nación, 2009).

Las principales fuentes incluyen residuos forestales, subproductos agrícolas y agroindustriales — como el bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de arroz, residuos de la industria algodonera, entre otros— que en conjunto representan un gran margen para ampliar la participación de la bioenergía en la matriz energética nacional.

En este contexto, resulta particularmente relevante el caso de la producción arroceras en el Litoral argentino, donde la cascarilla de arroz constituye una fuente importante de biomasa residual con potencial energético. Durante el período 2023–2024, la superficie total sembrada de arroz en el país alcanzó las 187.192 hectáreas, con una producción de aproximadamente 5,16 millones de toneladas (Instituto Nacional de Semillas [INASE], 2024).

La mayor parte de esta producción se concentra en la región NEA: Corrientes (46,8%), Entre Ríos (28,1%), Santa Fe (13,9%), Formosa (7,8%) y Chaco (3,4%). Considerando que la cáscara de arroz representa entre el 20 y el 25% del peso total cosechado, se estima que en la campaña 2023–2024 se generaron entre 1,03 y 1,29 millones de toneladas de cascarilla (Llanos Páez, Ríos Navarro, Jaramillo Páez & Rodríguez Herrera, 2016). Este volumen de residuo agroindustrial, actualmente subutilizado, representa un recurso bioenergético estratégico para diversificar la matriz energética regional.

Uno de los tratamientos térmicos más utilizados para la valorización de biomasa residual es la pirólisis, un proceso termoquímico de descomposición en ausencia de oxígeno que produce biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Bertero et al., 2018; Bertero et al., 2020). A diferencia de trabajos previos, donde se ha investigado la pirólisis de la cáscara de arroz en la región para la obtención de biocombustibles líquidos y gaseosos (Tourn et al., 2023), el presente estudio se centra en el biochar obtenido como subproducto. Específicamente, se explorará el tratamiento físico y químico de este biochar para la síntesis de nanopartículas de sílice (SiO_2) de alto valor agregado. Este enfoque de valorización integral de la biomasa no solo contribuye a la diversificación de la matriz energética, sino que también genera nanomateriales funcionales a partir de un residuo, alineándose con los principios de la economía circular y el desarrollo sostenible. Finalmente, el trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se detallan los materiales y métodos empleados; en la Sección 3 se presentan y discuten los resultados experimentales; y en la Sección 4 se exponen las conclusiones y las proyecciones del estudio.

2. Materiales y Métodos

2.1. Preparación de la Materia Prima

La materia prima, cáscara de arroz del Grupo de Puerto Las Palmas (PLP Group), se lavó inicialmente con agua corriente para eliminar la suciedad superficial y las impurezas gruesas. Posteriormente, se realizó un segundo lavado con agua destilada. Finalmente, la cáscara de arroz se secó en un horno, un proceso que, además de eliminar la humedad, provocó un ligero tostado del material. Seguidamente, para reducir el contenido de impurezas inorgánicas, la cáscara de arroz seca se trató con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 M. La mezcla se agitó mecánicamente y se mantuvo bajo reflujo durante 2 horas. Tras este tratamiento, el material se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, y se volvió a secar durante 24 h en bandejas y ambiente libre de humedad.

2.2. Pirólisis de la Cáscara de Arroz y Obtención de Productos

La cáscara de arroz acondicionada fue pirolizada en un sistema a escala de laboratorio con un reactor de lecho fijo, diseñado para maximizar la producción de la fase sólida. El sistema estaba constituido por un horno de calentamiento aislado, un controlador de temperatura, una válvula de regulación de flujo, un medidor de burbuja Shimadzu, un baño frío para la condensación y una bombona de nitrógeno. Se cargó una masa de cascarilla de

arroz de 3 g, con una humedad relativa inferior al 8%, y el proceso se llevó a cabo bajo una atmósfera inerte de nitrógeno a un flujo de 28.5 ml/min. Las condiciones de operación se fijaron en una temperatura de 400 °C, con una rampa de calentamiento de 35 °C/min y un tiempo de retención de 1 hora. Los rendimientos de los productos sólido (biochar) y líquido (bio-oil) se determinaron gravimétricamente por pesada, mientras que el rendimiento de la fase gaseosa se calculó por diferencia de masa.

2.3. Tratamiento Térmico Controlado

El biochar de cáscara de arroz, obtenido por pirólisis, se sometió a un tratamiento térmico controlado en una mufla con salida de gases de combustión para transformarlo en cenizas. El proceso consistió en un calentamiento gradual en dos etapas:

- Primera etapa: La temperatura se incrementó a razón de 5°C/min hasta alcanzar los 500°C, manteniéndose constante durante 60 minutos.
- Segunda etapa: Posteriormente, se elevó la temperatura a la misma velocidad hasta los 600°C y se sostuvo por 30 minutos.

Una vez completado el tratamiento, la muestra se enfrió gradualmente hasta alcanzar la temperatura ambiente.

2.4. Tratamiento Ácido y Lavado de las Cenizas

Las cenizas obtenidas se prepararon de la siguiente manera:

- Porfirización: Las muestras se molieron finamente en un mortero de ágata hasta obtener un polvo homogéneo.
- Tratamiento ácido: Se pesaron 0.2 g de cada muestra y se suspendieron en 25 mL de agua destilada en un vaso de precipitados. Se ajustó el pH a 1.0 con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 1 M, añadida gota a gota bajo agitación constante. La suspensión se mantuvo en agitación continua durante dos horas.
- Lavado por Centrifugación: Para neutralizar la suspensión, se transfirió la mezcla a un tubo de centrifuga Roca, Modelo 2030, y se centrifugó a 3000 rpm durante 5 minutos. Se decantó el sobrenadante ácido y se lavó el sólido con 40-45 mL de agua destilada, agitando durante 5 minutos. Este ciclo de centrifugación y lavado se repitió hasta que el pH del sobrenadante alcanzó la neutralidad (pH 7.0).
- Secado: Finalmente, el sólido lavado se transfirió a una caja de Petri y se secó en una estufa a 60 °C por 8 horas antes de los análisis.

2.5. Caracterización de Materiales y Equipos

Para la caracterización morfológica y elemental de la materia prima y los productos obtenidos, se emplearon las siguientes técnicas:

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS): Los análisis se realizaron con un microscopio electrónico de barrido ZEISS EVO 18 a un voltaje de aceleración de 20 kV, utilizando el modo de electrones secundarios (SE) para las imágenes morfológicas. La composición elemental se determinó con un detector Bruker X-Flash 6/30 acoplado al SEM. Para obtener un valor representativo de la composición, se tomaron tres lecturas en posiciones aleatorias de cada muestra. Los datos fueron procesados utilizando el software Aztec.
- Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM): Se realizó un análisis de alta resolución de la morfología de las partículas obtenidas con un microscopio electrónico de transmisión JEOL JEM- 2100Plus, con un voltaje de trabajo de 200 kV (variable) y filamento de LaB6.
- Análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial (DTA-TG): La estabilidad térmica y la variación de densidad de la materia prima se estudiaron con un equipo Shimadzu 60/60H DTA/TG con una rampa de 10 °C/min desde temperatura ambiente hasta 800°C, lo que permitió determinar las condiciones óptimas para los tratamientos térmicos.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización de la Materia Prima

Se estudió la cáscara de arroz lavada con agua y secada, junto con una muestra tratada con una solución de HCl 0,1 N durante 2 horas. El objetivo fue observar el efecto del tratamiento ácido en la composición y morfología del material. Los resultados de los estudios de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) demostraron la efectividad del tratamiento con ácido clorhídrico (HCl) para remover

los componentes inorgánicos no deseados de la cáscara de arroz.

Las Figuras 1A y 1B ilustran la morfología superficial de la cáscara de arroz antes y después del tratamiento, respectivamente, mientras que la Tabla 1 presenta los resultados de la composición elemental.

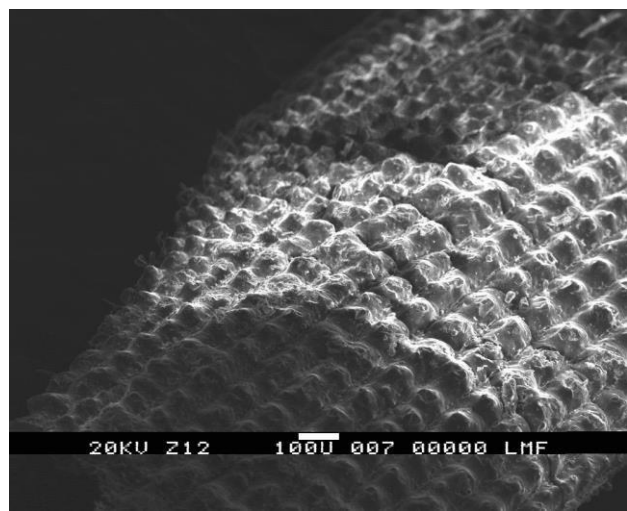


Figura 1A. Imagen SEM de la cáscara de arroz sin tratar, mostrando una superficie rugosa y porosa.

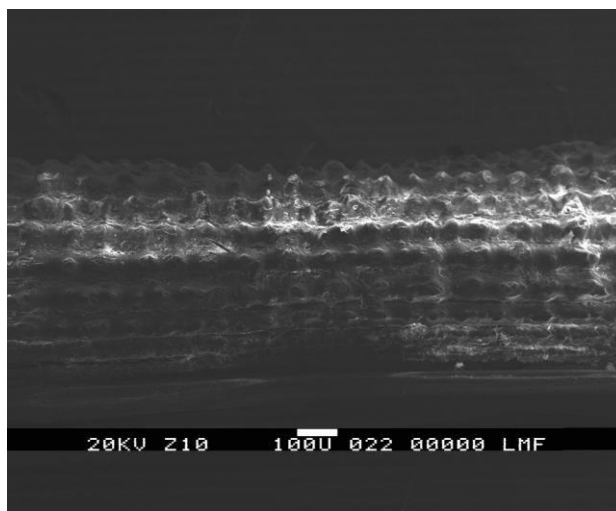


Figura 1B. Imagen SEM de la cáscara de arroz tratada con HCl, evidenciando una superficie más lisa y con protuberancias menos prominentes en comparación con la muestra sin tratar, lo que sugiere la remoción de componentes inorgánicos.

Tabla 1. Composición elemental (%p) de la cáscara de arroz sin tratar y tratada con HCl, determinada por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS).

	CA	CA (Tratada)
Elemento	% en peso	
Carbono (C)	29,88	38,93
Oxígeno (O)	52,40	49,56
Silicio (Si)	16,89	10,14
Aluminio (Al)	0,33	1,03
Níquel (Ni)	0,34	0,31
Hierro (Fe)	0,07	0,07
Calcio (Ca)	0,04	-
Potasio (K)	0,04	-
Indio (In)	0,15	-

En la muestra de cáscara de arroz sin tratamiento se observa un mayor contenido de C, O y Si, mientras que aparecen en menor medida Al, Ni, Fe, Ca, K e In. En la muestra tratada con HCl, la composición sigue dominada por C, O y Si, aunque con un aumento relativo en el contenido de C y una disminución en Si. Asimismo, se detecta un incremento en el Al, lo cual podría estar asociado a una contaminación o interferencia del equipo durante el análisis. En ambas muestras se mantienen trazas de Ni y Fe, mientras que Ca, K e In desaparecen tras el tratamiento ácido, indicando la purificación de la muestra

3.2. Rendimiento de Productos de Pirólisis

La pirólisis de la cáscara de arroz a 400 °C se llevó a cabo siguiendo la metodología previamente desarrollada por

[Tourn et al., 2023], en la que se evaluaron los efectos de temperatura, tiempo de residencia y tamaño de partícula sobre la producción de biochar, bio-oil y gases. Bajo estas condiciones, se obtuvieron tres productos principales: un sólido rico en sílice (biochar), un líquido condensable (bio-oil) que tiene dos fases, una acuosa y una oleosa, y un gas no condensable. Los rendimientos promedio fueron 55,0%p para el biochar, 34,9%p para el bio-oil y 10,0%p para el gas, determinados por diferencia de masa. Estos resultados indican que la operación a 400 °C favorece de manera consistente la formación de la fase sólida, el producto de interés principal en esta investigación. La Tabla 2 resume los rendimientos promedio de los productos obtenidos.

Tabla 2: Rendimientos promedio de los productos obtenidos a 400 °C.

Producto	Rendimiento Promedio (%p)
BIO-OIL	34,9
BIOCHAR	55,0
GAS	10,0

3.3. Análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial (DTA-TG)

El análisis termogravimétrico (TGA) y el análisis térmico diferencial (DTA) se emplearon para evaluar el comportamiento térmico del carbón de cáscara de arroz tratado con HCl.

El análisis DTA/TG de las muestras pirolizadas mostró dos reacciones exotérmicas centradas en 390 °C y 510 °C, asociadas a una pérdida de masa del 55%, que culmina en torno a los 600 °C. Este proceso se corresponde con la combustión del residuo carbonoso formado durante la pirólisis.

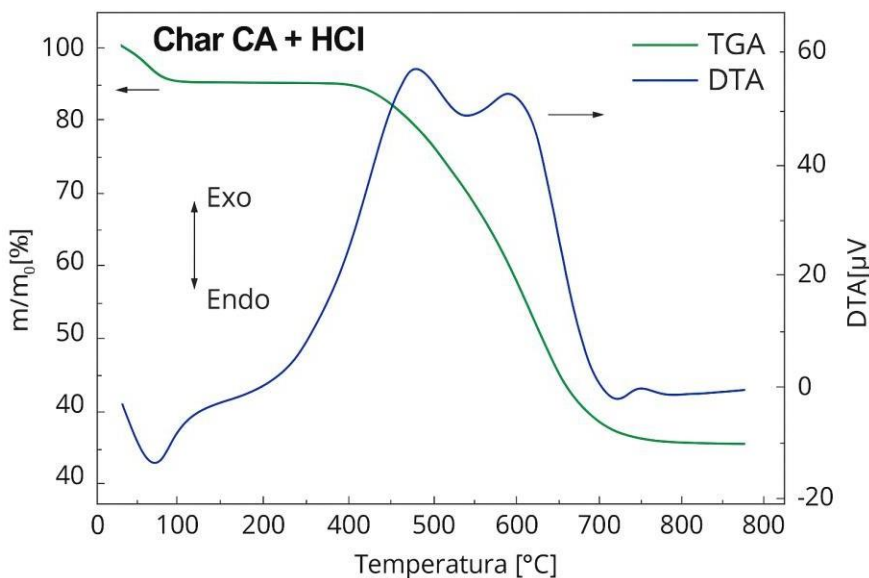


Figura 2. Curvas TGA y DTA del char de cáscara de arroz tratado con solución de HCl 0,1 N.

3.4. Efecto del tratamiento térmico controlado y del lavado ácido en la obtención de sílice nanoestructurada

La secuencia de imágenes ilustra la evolución de la cáscara de arroz tras las etapas de tratamiento térmico controlado y de purificación ácido-lavado. Luego de la pirólisis, el tratamiento térmico a temperaturas moderadas favorece la eliminación progresiva de la fracción carbonosa residual y la concentración de la fase inorgánica. En esta etapa se identifica una pérdida de la estructura fibrosa característica y la formación de cenizas con alto contenido de sílice amorfa.

Posteriormente, el tratamiento ácido, seguido de lavados sucesivos, permite la remoción de impurezas

metálicas y carbonosas, obteniéndose partículas de sílice con mayor homogeneidad. La micrografía correspondiente al producto final evidencia la presencia de partículas de sílice, las cuales tienden a presentarse en forma de aglomerados debido a su elevada energía superficial y a las interacciones electrostáticas entre partículas.

Estos resultados confirman que la combinación del tratamiento térmico controlado y la purificación ácido-lavado constituye una estrategia eficiente para la obtención de sílice nanoestructurada a partir de cáscara de arroz, en concordancia con lo reportado previamente para materiales similares (Carraro et al., 2020), lo que demuestra la viabilidad de este procedimiento como ruta de valorización de residuos agroindustriales.



Figura 3. Secuencia de transformación de la cáscara de arroz: (a) materia prima, (b) cáscara de arroz lavada con agua y secada en estufa. (c) cáscara de arroz lavada con HCl 0,1 N durante 2 h, (d) biochar tras pirólisis, (e) cenizas obtenidas por tratamiento térmico controlado y (f) micropartículas de sílice tras purificación ácido-lavado.

El material fue sometido a un análisis integral utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).

La morfología a nivel microestructural, observada por SEM, revela que el material es un polvo microparticulado compuesto por una distribución de fragmentos irregulares que varían desde el orden de las micras hasta partículas submicrométricas.

En las micrografías TEM se observa que las partículas no aparecen aisladas sino fuertemente aglomeradas en estructuras heterogéneas. Estos conglomerados presentan morfologías irregulares, con tamaños promedio en el rango de 25–30 nm para las partículas primarias más definidas, aunque en la mayoría de los casos se trata de agrupamientos mayores que superan los 100 nanómetros.

La porosidad observable parece provenir de los espacios de interconexión entre los aglomerados, más que de poros intrínsecos en las partículas individuales. En algunas zonas se distinguen posibles canales lineales originados por la alineación parcial de las unidades, lo que sugiere la coexistencia de dos tipos de organización: una más ordenada en forma de canales y otra más desordenada e irregular.

De manera general, puede describirse la estructura como heterogénea, lo cual es esperable considerando el origen natural del material.

Finalmente, la composición elemental determinada por EDS establece que el material está compuesto predominantemente por Oxígeno (O, 47,8 %p) y Silicio (Si, 40,6 %p), lo que confirma la naturaleza silícea (SiO_x) de la matriz principal. Se detecta una fracción de Carbono (C, 10,6 %p), probablemente residual del precursor biológico. Además, se identificaron trazas menores de Aluminio (Al, 0,5 %p) y Níquel (Ni, 0,4 %p).

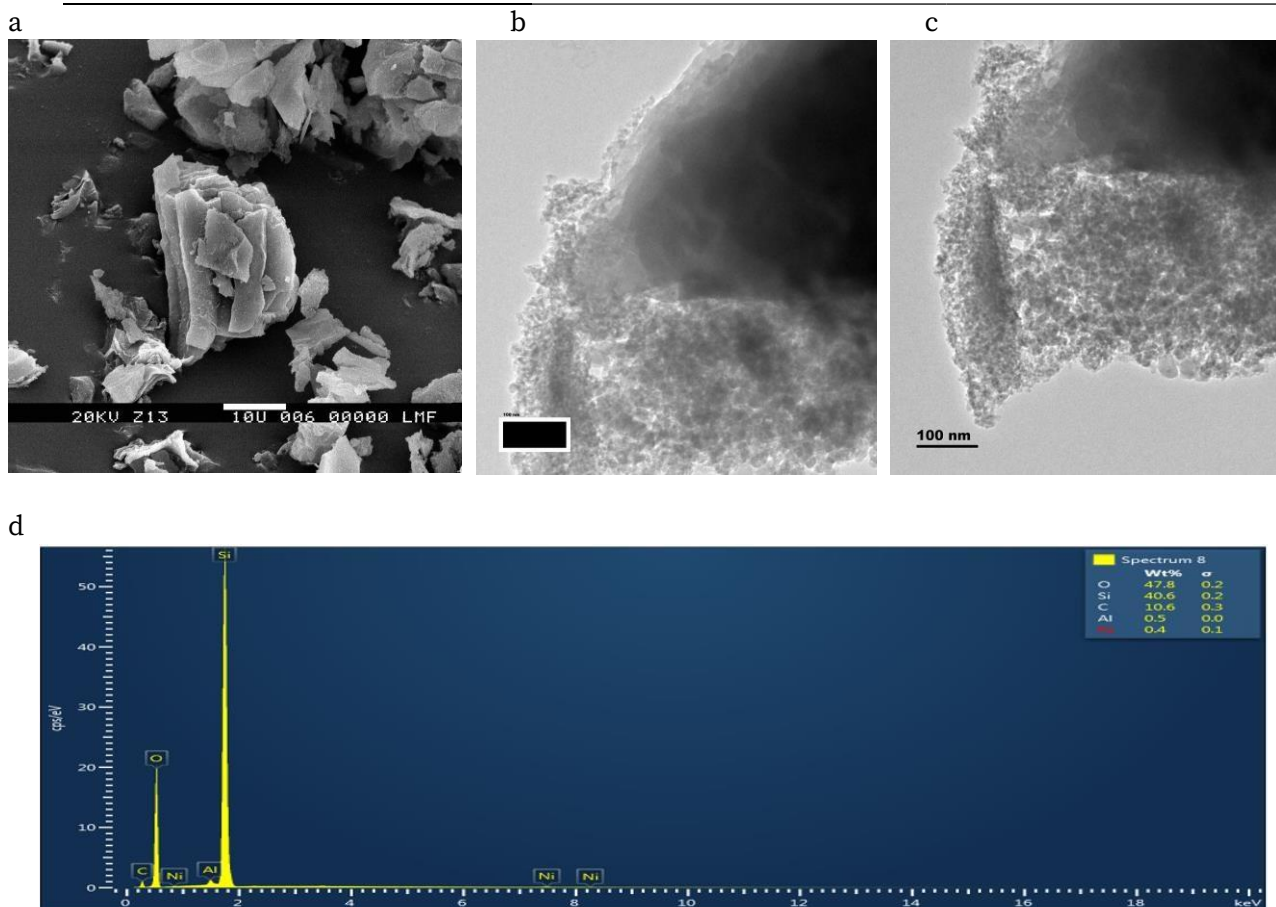


Figura 4. (a) Micrografía SEM de la muestra (2000×), donde se observa la morfología irregular de las partículas. (b-c) Micrografías TEM que muestran agregados de partículas y posibles canales de alineación. (d) Espectro EDS con la composición elemental de la muestra.

4. Conclusiones

Este estudio demostró con éxito que la secuencia de pirólisis a baja temperatura (400 °C) seguida de un tratamiento térmico a 600 °C y purificación ácido-lavado es una estrategia efectiva y de alto rendimiento para la valorización de la cáscara de arroz residual en nanomateriales de alto valor agregado.

El proceso no solo produjo un alto rendimiento de biochar (55.0 %p), sino que la caracterización elemental por EDS confirmó la obtención de una matriz con pureza silícea (O: 47.8 %p; Si: 40.6 %p). Las micrografías de TEM revelaron la naturaleza nanoestructurada del producto, formado por agregados de partículas primarias con diámetros en el rango de 5 a 25 nm.

Impacto y Proyección de la Economía Circular: La conversión de la cáscara de arroz, un residuo agroindustrial abundante en la región NEA, en nanopartículas de SiO_2 se alinea directamente con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esto abre una vía sostenible, de bajo costo y ambientalmente responsable para la producción de nanomateriales funcionales de sílice, con potencial para su uso en aplicaciones de catálisis, remediación ambiental o como refuerzos en materiales compuestos.

Referencias

Bertero, M., García, J. R., Falco, M. y Sedran, U. (2019). "Conversion of cow manure pyrolytic tar under FCC conditions over modified equilibrium catalysts", *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2925–2933. doi:

10.1007/s12649-019-00588-y.

Bertero, M. y Sedran, U. (2016). "Immediate catalytic upgrading of soybean shell bio-oil", *Energy*, 94(1), 171–179. doi: 10.1016/j.energy.2015.10.114.

Carraro, P. M., Benzaquén, T. B. y Eimer, G. A. (2020). "Eco-friendly synthesis of nanostructured mesoporous materials from natural source rice husk silica for environmental applications", *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 43232–43241. doi: 10.1007/s11356-020-11043-0.

FAO, INTA y Secretaría de Energía de la Nación. (2009). WISDOM Argentina: Mapeo Integrado de Oferta y Demanda de Biocombustibles. Recuperado de <https://www.fao.org/3/a-am172s.pdf>.

Instituto Nacional de Semillas. (2024). Informe SISA Arroz 2023-2024. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-sisa-arroz-2023-2024.pdf>.

Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Jaramillo Páez, C. y Rodríguez Herrera, L. (2016). "La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación", *Revista Colombiana de Materiales*, Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200013#tab2.

Tourn, S., Saires, P., Bertero, M., Falco, M. y Chamorro, E. (2023). "Developing alternatives to hydrocarbon via pyrolysis and gasification of industry residual biomass", *Pisco Med Publishing*, 12(1). doi: 10.18282/pef.v12i1.3333.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a las siguientes instituciones por el soporte financiero y la infraestructura proporcionada:

1. A la Secretaría de Investigación del Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), por el apoyo continuo a la investigación, esencial para la consecución del presente trabajo.
2. Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCT) de la Nación por la financiación del proyecto marco "Optimización de procesos de producción de nanomateriales a partir de la abundante biomasa del Chaco" (Expediente N° EX-2023-82422655- -APN-DDYGD#MCT), bajo la línea PFI-2023, que posibilitó la ejecución de las actividades experimentales aquí reportadas.
3. Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y a la Universidad Nacional de Rosario.
4. Agradezco la colaboración de los becarios y estudiantes de la UTN FRRe, Enzo Pozzer, Maylen García y Víctor Barrios.