

Sensor de humedad basado en carbono derivado de cascarilla de arroz

Humidity Sensor Based on Rice Husk-Derived Carbon Materials

J.R. Castro-Ladino¹  Santiago Mesa²   Dora A. Hoyos-Ayala² 

¹Grupo de Investigación en Tecnologías Emergentes (GITEM), Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.

²Grupo de Catalizadores y Adsorbentes (CATALAD), Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia (UdeA), Medellín, Colombia.

Resumen

Introducción: Los materiales carbonosos derivados de residuos agrícolas, como la cascarilla de arroz (HR), han despertado un creciente interés debido a su potencial en aplicaciones sostenibles, especialmente en los campos de la electrónica, la detección ambiental y el almacenamiento de energía.

Objetivos: Este estudio tiene como objetivo investigar la síntesis de materiales carbonosos a partir de HR mediante descomposición térmica a distintas temperaturas (900 °C y 1000 °C), y evaluar su aplicación en la fabricación de sensores de humedad, analizando cómo la temperatura de carbonización afecta sus propiedades estructurales y funcionales.

Materiales y Métodos: Se sintetizaron materiales carbonosos a partir de HR mediante pirólisis a 900 °C y 1000 °C. Las propiedades estructurales y el grado de grafitización se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia Raman. Posteriormente, los materiales obtenidos se integraron en tintas conductoras, empleando distintos aglutinantes y disolventes, para fabricar sensores resistivos. La respuesta eléctrica de estos sensores se evaluó en condiciones de humedad relativa controlada.

Resultados: Los análisis estructurales indicaron que una mayor temperatura de carbonización favorece la formación de estructuras más cristalinas y un mayor grado de grafitización. Los sensores fabricados mostraron diferentes respuestas eléctricas según la temperatura de pirólisis, evidenciando una relación variable entre la resistencia y la humedad relativa.

Conclusiones: La temperatura de carbonización tiene un impacto significativo en las propiedades estructurales y funcionales de los materiales carbonosos derivados de HR. Estos resultados demuestran el potencial de estos materiales para ser optimizados en aplicaciones de detección ambiental, específicamente en la monitorización de la humedad, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles en electrónica flexible e impresa.

Palabras clave: carbono, pirólisis, caracterización de materiales, sensor

Abstract

Introduction: Carbon-based materials derived from agricultural waste, such as rice husk (RH), have attracted increasing attention due to their potential for sustainable applications, particularly in electronics, environmental sensing, and energy storage.

Objectives: This study aims to investigate the synthesis of carbon materials from RH through thermal decomposition at two different temperatures (900 °C and 1000 °C), and to evaluate their application in humidity sensor fabrication, focusing on the influence of carbonization temperature on their structural and functional properties.

Materials and Methods: Carbon materials were synthesized from RH via pyrolysis at 900 °C and 1000 °C. Their structural properties and degree of graphitization were characterized using X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy. The resulting materials were then incorporated into conductive inks using different binders and solvents to fabricate resistive humidity sensors. The electrical response of the sensors was evaluated under controlled relative humidity conditions.

Results: Structural analyses revealed that higher carbonization temperatures led to more crystalline structures and enhanced graphitization. The fabricated sensors exhibited varying electrical responses depending on the pyrolysis temperature, showing different resistance-relative humidity relationships.

Conclusions: Carbonization temperature significantly affects the structural and functional properties of RH-derived carbon materials. These findings highlight the potential of optimizing such materials for environmental sensing applications, particularly humidity monitoring, contributing to the development of sustainable solutions in flexible and printed electronics.

Keywords: carbon, pyrolysis, materials characterization, sensor.

¿Cómo citar?

Catro-Ladino JR, Mesa S, Hoyos-Ayala, DA. Sensor de humedad basado en carbono derivado de cascarilla de arroz. Ingeniería y Competitividad, 2025,27;(2):e-20314751

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i2.14751>

Recibido: 19-02-25

Evaluado: 26-03-25

Aceptado: 10-04-25

Online: 19-05-25

Correspondence

santiago.mesa@udea.edu.co



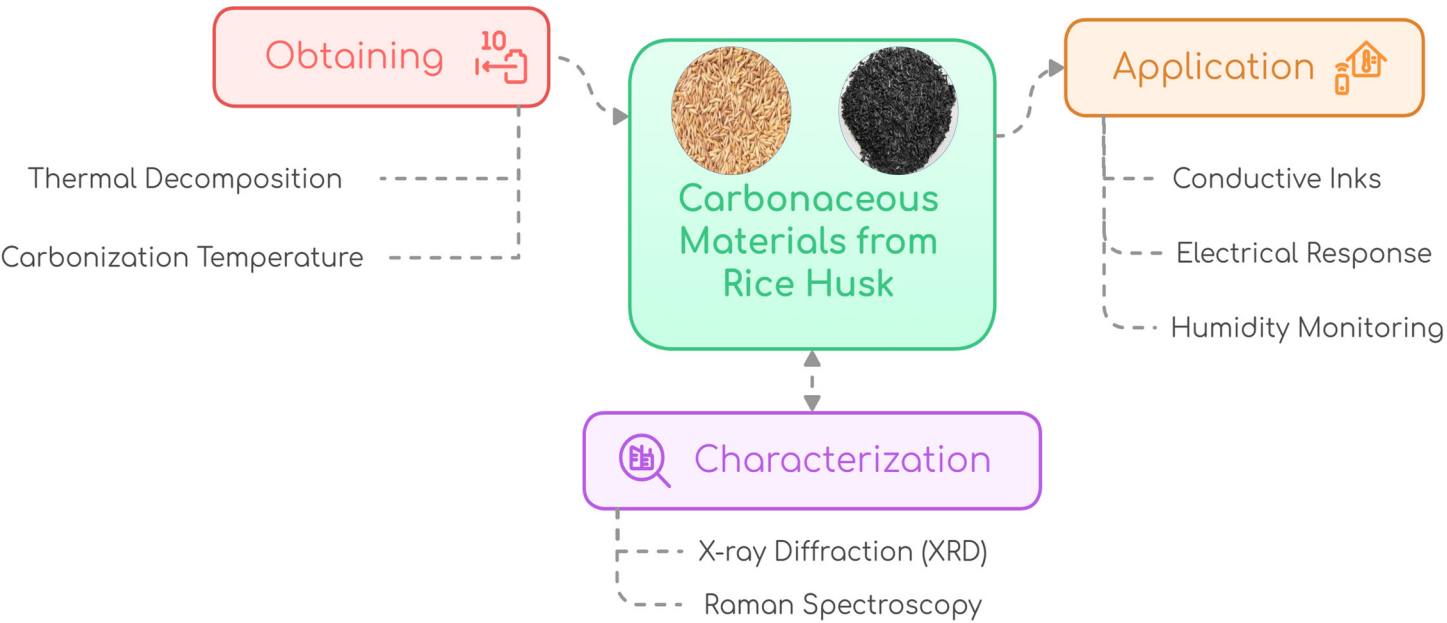
Contribución a la literatura

¿Por qué se realizó?

El estudio tuvo como objetivo desarrollar y caracterizar sensores de humedad utilizando materiales carbonosos derivados de la cascarilla de arroz mediante pirólisis. Surgió de un proyecto de investigación más amplio centrado en explorar la cascarilla de arroz como fuente de subproductos con valor añadido. Este trabajo investigó específicamente cómo la temperatura de carbonización influye en las propiedades estructurales, eléctricas y de detección de los materiales resultantes. Este enfoque promueve el desarrollo sostenible de sensores mediante la valorización de residuos agrícolas.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes? ¿Qué aportan estos resultados?

El estudio demostró que los materiales de carbono obtenidos a partir de cascarilla de arroz pirolizada mostraron grafitización, conductividad y rendimiento de detección. Estas propiedades se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía Raman. Con los carbonos obtenidos, se elaboraron cuatro tintas con diferentes aglutinantes para obtener un sensor de humedad. Entre las tintas probadas, las basadas en silicona y acetona proporcionaron una mejor estabilidad mecánica y respuestas de humedad consistentes, mostrando un aumento de la resistencia altamente lineal con la humedad. Por el contrario, las tintas con aglutinantes solubles en agua mostraron una adhesión deficiente. La investigación destaca la eficacia de la pirólisis directa, en un solo paso, de la cáscara de arroz, sin pretratamiento químico, como un método sostenible y de bajo coste para desarrollar sensores de humedad de alto rendimiento, contribuyendo a soluciones versátiles en electrónica flexible e impresa.



Introducción

Los materiales carbonosos derivados de residuos agrícolas han atraído una atención considerable en los últimos años debido a su potencial para aplicaciones sostenibles en electrónica, detección ambiental y almacenamiento de energía (1) (2). Entre ellos, la cáscara de arroz (HR), un subproducto agrícola abundante, es particularmente atractiva debido a su alto contenido de carbono, alta disponibilidad y la capacidad de transformarse en productos de valor agregado mediante tratamientos térmicos (3) (4). Estos tratamientos, como la pirólisis, permiten la conversión de RH en materiales carbonosos con propiedades estructurales y funcionales adaptadas, como la conductividad eléctrica y la estabilidad térmica, adecuadas para diversas aplicaciones tecnológicas.

En este sentido, la necesidad de materiales innovadores, rentables y respetuosos con el medio ambiente en el campo de la electrónica ha impulsado la investigación de pastas y tintas conductoras a base de carbono (5) (6). Las pastas conductoras, que son componentes integrales en sensores, circuitos y otros dispositivos electrónicos, deben exhibir una alta conductividad eléctrica, estabilidad estructural y compatibilidad con varios sustratos (7).

En este sentido, los sensores de humedad son esenciales en diversas industrias, incluidas la agricultura, la atención médica y el monitoreo ambiental. Estos sensores requieren materiales que no solo sean sensibles a los cambios de humedad, sino también robustos en condiciones ambientales variables (8) (9). Los materiales a base de carbono se han mostrado prometedores en este sentido debido a su alta área de superficie, variabilidad de grupos funcionales y propiedades eléctricas sintonizables. En este sentido, la utilización de residuos agrícolas como la HR para el desarrollo de sensores basados en carbono representa una alternativa sostenible con impactos económicos y ambientales positivos, ya que disminuye la contaminación al valorizar los residuos que de otro modo se quemarían o desecharían (10).

Sin embargo, lograr un rendimiento óptimo en términos de sensibilidad, confiabilidad e integridad estructural exige un control preciso sobre la síntesis de materiales, las formulaciones de tintas y los procesos de fabricación de sensores (11). A partir de esta idea, en este estudio se presenta la síntesis de materiales carbonosos a partir de HR mediante un proceso de descomposición térmica y su posterior utilización en la fabricación de sensores de humedad. El proceso de síntesis implicó tratamientos térmicos a dos temperaturas distintas (900 °C y 1000 °C) para investigar la influencia de la temperatura de carbonización en las propiedades estructurales y funcionales de los materiales obtenidos. La caracterización completa del material se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía Raman.

Los sensores fabricados emplearon tintas carbonosas formuladas con diferentes aglutinantes y solventes para evaluar su respuesta eléctrica. Al integrar estas tintas en un circuito interdigitado de cobre, se desarrollaron sensores resistivos y se probaron en condiciones de humedad controlada. El estudio exploró el comportamiento eléctrico de los sensores, centrándose en sus variaciones de resistencia en función de la humedad relativa. Esta investigación contribuye al creciente campo de la electrónica sostenible al demostrar el potencial de los materiales carbonosos derivados de la HR en el desarrollo de sensores de humedad de alto rendimiento.

Metodología

Síntesis de muestras carbonáceas

La síntesis de material orgánico a partir de cáscara de arroz (HR) se llevó a cabo utilizando el método de descomposición térmica, siguiendo el flujo de trabajo ilustrado en la Figura 1 (12) (13). Posteriormente, se realizó un proceso de limpieza y tamizado antes del tratamiento térmico para eliminar las impurezas y el polvo de la materia prima. Para el tratamiento térmico se colocó el HR dentro de un reactor tubular. Luego, se activó un sistema de vacío y se inyectó un flujo de nitrógeno. Al hacerlo, el oxígeno fue expulsado del reactor y se creó una atmósfera inerte dentro de la cámara. Posteriormente, se inició el proceso de carbonización mediante el control de la temperatura con un controlador PID y un software de recopilación de datos. Esto permitió el monitoreo gráfico del comportamiento de la temperatura dentro del reactor. El proceso de carbonización se llevó a cabo durante un promedio de 2 horas después de alcanzar la estabilidad térmica. Se obtuvieron dos tipos de muestras, una a 900°C y otra a 1000°C.

Una vez finalizado el proceso la muestra se recolectó y se molió manualmente con un mortero de ágata, seguido de un proceso de tamizado con un tamiz Adamas-Beta TYJS-0074. Este procedimiento condujo a partículas de muestra de aproximadamente 105 μm .

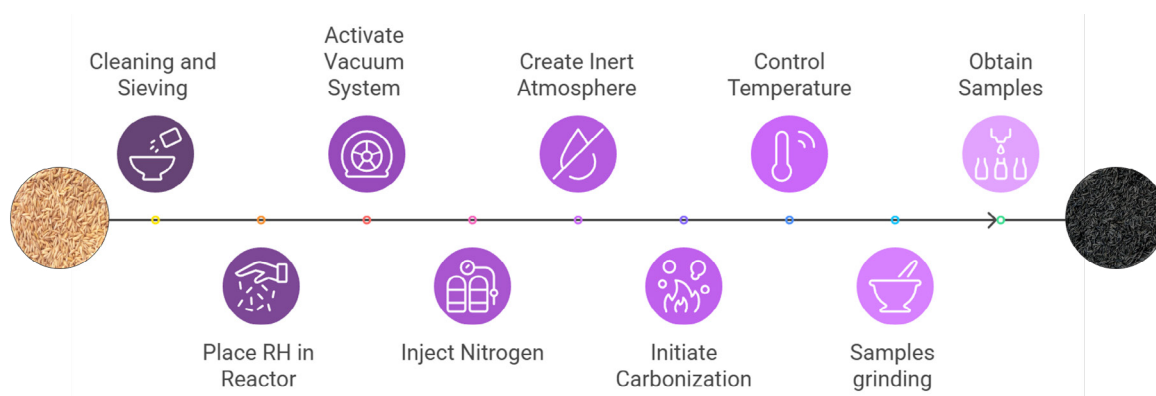


Figura 1. Proceso esquemático de la preparación de la muestra carbonosa

Caracterización de muestras y fabricación de sensores

El análisis de difracción de rayos X (DRX) se llevó a cabo utilizando un difractómetro PANalytical Empyrean Series II equipado con radiación Cu K filtrada con Ni. Las mediciones se realizaron con un tamaño de paso de 0,02626° y una velocidad de escaneo de 0,11°/s, cubriendo un rango de 2θ de 5° a 85°. La espectroscopia Raman se realizó a temperatura ambiente utilizando un espectrómetro confocal Horiba Jobin Yvon Labram HR. Para la excitación se utilizó un láser HeNe con una longitud de onda de 632 nm y una distancia focal de 800 mm. Todos los espectros se registraron en condiciones idénticas dentro del rango de 400 a 3500 cm^{-1} . Para crear el sensor, se imprimió un circuito interdigitado de cobre en una PCB flexible, como se muestra en la Figura 2a. Este circuito se utilizaba como plataforma para depositar las tintas. Las tintas carbonosas, utilizadas como materiales dieléctricos entre los dedos del circuito, se prepararon utilizando agua destilada, carboximetilcelulosa (CMC), silicona acética, alcohol isopropílico (99%), ácido acético, silicona líquida y acetona (99%). Estos reactivos se combinaron en diferentes cantidades para crear cuatro

tintas, como se muestra en la Figura 2b. Las propiedades eléctricas de los sensores se midieron con un multímetro FLUKE 289 True RMS.

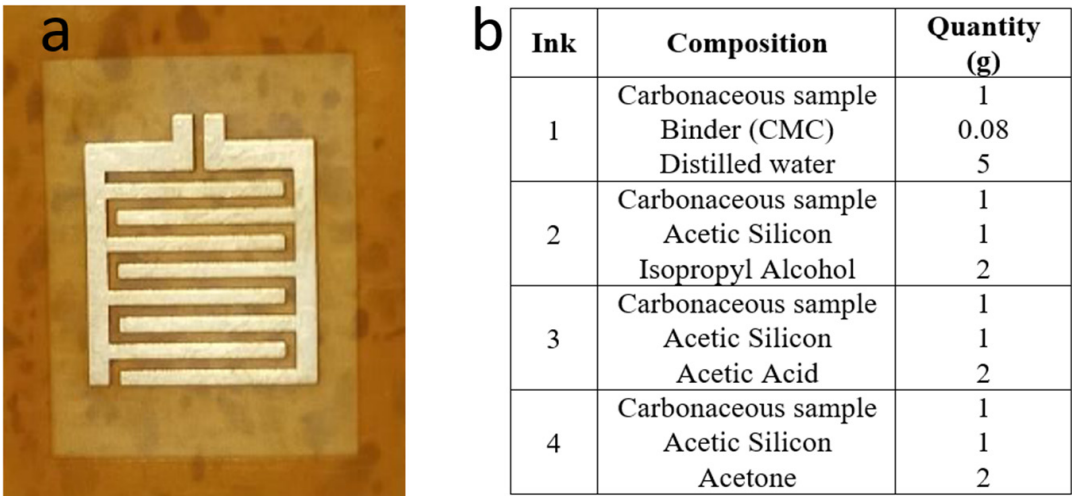


Figura 2. a) Circuito interdigitado de cobre y b) Composición de las tintas

Pruebas de sensores

Para la adquisición de datos se construyó una cámara de ambiente cerrado, lo que permitió la caracterización de los sensores. La configuración incluía un recipiente hermético, una bomba de vacío convencional, un humidificador (Mini-Nano Vaporizer) y un sensor de humedad (Monitoring Traceable Hygrometer, MTH). Se hicieron dos agujeros en el recipiente, uno a cada lado. La boquilla del humidificador se conectaba a una de estas aberturas para introducir la humedad en la cámara, mientras que la otra se conectaba a la manguera de la bomba de vacío para eliminar la humedad. Luego, los sensores fabricados se colocaron uno al lado del otro dentro de la cámara, lo que permitió tomar medidas utilizando un multímetro para la recopilación y comparación de datos en condiciones controladas, como se ilustra en la Figura 3. El sistema de humedad se inició dentro de la cámara hasta que el MTH indicó saturación. A continuación, se activó la bomba de vacío para reducir la humedad. Una vez que se registró la humedad máxima permitida, se recopilaron datos de resistencia para los sensores basados en OGF a medida que la humedad disminuía, cubriendo un rango de 58% a 90%.



Figura 3. Configuración experimental para la prueba de humedad de los sensores

Resultados y discusión

Caracterización de los materiales

La Figura 4a muestra una comparación entre los patrones de difracción de rayos X (XRD) de las muestras. Ambas muestras indicaron dos picos cerca de $2\theta = 25^\circ$ y 45° , lo que sugiere la existencia de carbono desordenado con una disposición turbostática. (14). En este tipo de estructura, el carbono exhibe orden dentro de las capas de grafeno, pero carece de orden entre las capas. Se descubrió que el aumento de la temperatura de pirólisis dio lugar a picos de DRX más definidos. Así, la muestra obtenida a 1000°C exhibió picos XRD alrededor de $26,5^\circ$, $35,7^\circ$ y 57° que corresponden a las direcciones (002), (100) y (004) de la estructura del grafito, respectivamente (15). Este resultado sugiere la presencia de una estructura de grafito dentro de los materiales obtenidos, especialmente para el obtenido a 1000°C (16). Los otros picos se asociaron con la fase estructural de óxidos (12).

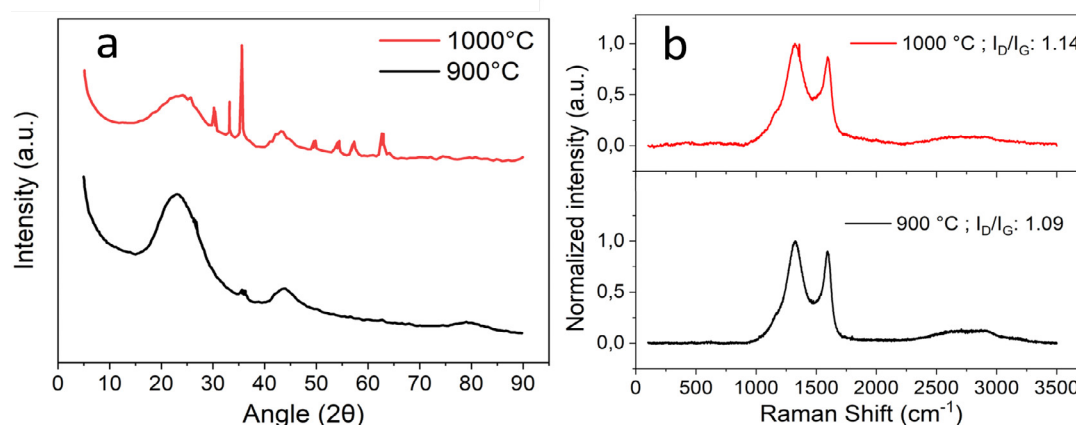


Figura 4. a) Patrones XRD y b) Espectros Raman, de las muestras obtenidas

Se realizó una espectroscopia Raman y los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4b. Todos los materiales exhibieron características vibratorias similares. Los picos espectrales correspondientes a D y G a 1328 y 1590 , respectivamente. Las bandas 2D aparecieron aproximadamente a 2630

^{cm¹}. La banda D está asociada con defectos, y su intensidad está directamente relacionada con el número de átomos sp³ presentes en la superficie del material (17) (18). Por otro lado, la banda G es causada por las vibraciones de los átomos de carbono sp², que representan el carbono grafitizado y está directamente relacionada con la cristalinidad del material. En este sentido, la relación de intensidades (ID/IG) aumentó ligeramente con la temperatura de pirólisis, lo que sugiere la presencia de más bordes y defectos. Estos resultados sugieren que, si bien el material obtenido a 1000°C exhibe mejores características cristalinas que el obtenido a 900°C, también presenta un mayor número de grupos funcionales (sp³) (12) (19).

Proceso de fabricación e implementación de sensores

Una vez caracterizados los materiales se procedió a la preparación de las tintas. La tinta 1 se preparó con CMC y agua destilada y exhibió una excelente consistencia, lo que demuestra las propiedades aglutinantes de CMC (20) (21). Ambos materiales carbonosos, a 900 y 1000 °C, se integraron bien en la tinta, lo que dio lugar a una mezcla homogénea, altamente maleable, con una adherencia decente al sustrato. La figura 5 muestra la tinta 1 depositada en el sustrato.



Figura 5. PCB recubierto con tinta 1

En consecuencia, la tinta 2 hecha con silicona acética y alcohol isopropílico, resultó ser difícil de mezclar ya que no se integraban correctamente, lo que resultaba en una pasta inconsistente e inmanejable. La alta volatilidad del alcohol isopropílico provocó una rápida evaporación al contacto con la silicona, dificultando la dispersión del material carbonoso.

Asimismo, la Tinta 3 compuesta por silicona acética y ácido acético se secó casi al instante, formando una pasta similar a la observada con la Tinta 2. Este comportamiento puede atribuirse al papel del ácido acético en la facilitación del proceso de reticulación de la silicona acética (22), que promueve la rápida evaporación de los subproductos. Por último, se preparó Ink 4 con silicona líquida y acetona. Esta tinta se disolvía rápidamente y permitía una homogeneidad adecuada. Cuando se mezcló con los materiales carbonosos, la tinta conservó sus características, lo que permitió una aplicación suave en los PCB, como se muestra en la Figura 6.

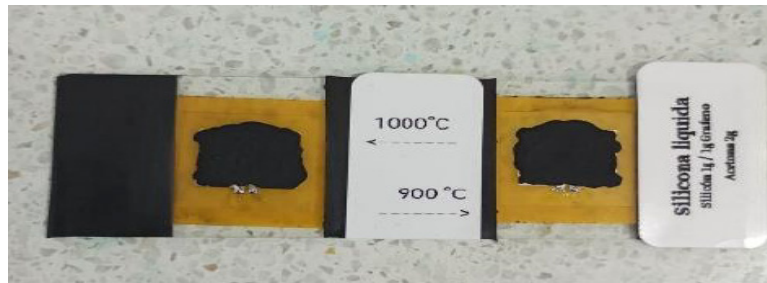


Figura 6. PCB recubierto con tinta 4

Sobre la base de estos resultados se seleccionaron la tinta 1 y la tinta 4 para la fabricación del sensor debido a su homogeneidad superior, facilidad de mezcla, aplicación suave y secado rápido. Así, se fabricaron cuatro sensores de la siguiente manera: los sensores 1 y 2 estaban compuestos por agua destilada, CMC y muestras de 900 y 1000 °C, respectivamente. Los sensores 3 y 4 estaban compuestos por acetona de silicona líquida y muestras de 900 y 1000 °C, respectivamente.

Sensores ensamblados de respuesta eléctrica

Con las tintas mencionadas se fabricaron cuatro sensores y se midieron sus propiedades eléctricas. Las mediciones de las pruebas de capacitancia y resistencia se realizaron en condiciones ambientales idénticas. No fue posible medir la capacitancia porque los cuatro sensores alcanzaron un punto de saturación. Entre las razones de este comportamiento se encuentran: 1) Los sensores pueden haber alcanzado su capacidad máxima de almacenamiento de carga, lo que hace que el multímetro no pueda medir el voltaje y la capacitancia resultantes, 2) Los factores ambientales, como la humedad o la temperatura, podrían haber influido en las propiedades eléctricas del material carbonoso causando la saturación, y 3) Limitaciones del instrumento, como la impedancia indeterminada en el multímetro, puede haber afectado a la respuesta del sensor.

Por otro lado, las mediciones de resistencia se realizaron con éxito, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de resistencia obtenidos de los sensores

Tinta	Sensor	Composición	Resistencia (Ω)
1	1	Agua + CMC + 900 °C	87.2
	2	Agua + CMC + 1000 °C	15.8
4	3	Silicona + Acetona + 900 °C	22.34
	4	Silicona + Acetona + 1000 °C	4.68

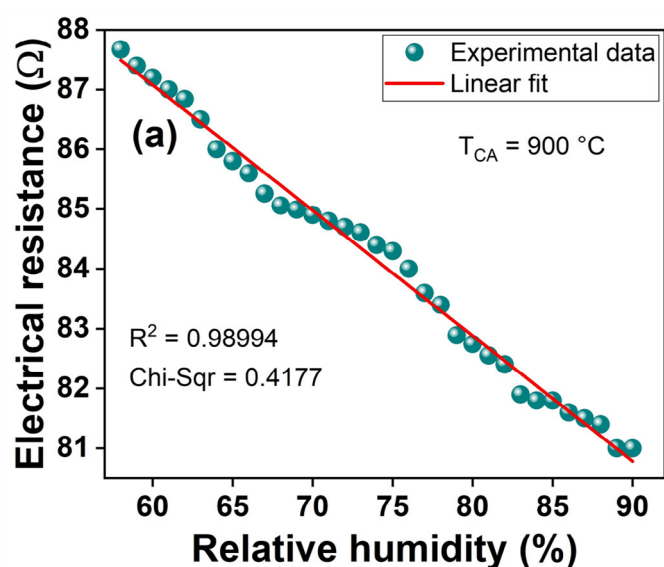
Cabe destacar que los valores más bajos de resistividad para cada tipo de sensores se lograron con los materiales carbonosos obtenidos a 1000 °C, lo que confirma la estructura similar al grafito del material sintetizado a esta temperatura (23) (24).

Sobre la base de las mediciones de resistencia obtenidas se tomó la decisión de centrarse en los sensores resistivos debido a los desafíos en la medición de las características capacitivas. Así, las pruebas posteriores se centraron en la caracterización de las propiedades resistivas de los sensores.

Propiedades resistivas de los sensores en ambientes húmedos

Los sensores se caracterizaron como sensores de humedad en función de sus propiedades resistivas. Se eligió esta aplicación debido a su rendimiento confiable y compatibilidad estructural con los requisitos de detección ambiental. Se implementó un sistema de ambiente cerrado para monitorear y registrar las variaciones resistivas en respuesta a la exposición a la humedad, como se detalla en la sección de Metodología.

En consecuencia, la variación de la resistencia del Sensor 1 con la humedad relativa se muestra en la Figura 7a. El sensor 2 fabricado con la tinta 1, se desprendió inmediatamente después de la exposición a la humedad, lo que hizo imposible la recopilación de datos, como se muestra en la Figura 7b. Dado que este sensor se fabricó utilizando material carbonoso obtenido a 1000 °C, es probable que el desprendimiento se debiera a la naturaleza hidrofóbica de los materiales similares a los gráficos, que restringen la humectabilidad del componente carbonoso de la tinta (25) (26). Para el Sensor 1, se observa una clara relación lineal inversa entre la resistencia y la humedad relativa, como lo demuestra la disminución de la resistencia con el aumento de la HR (Figura 7a). El ajuste lineal, representado como una línea roja, indicó una excelente correlación y la alta precisión del sensor en la detección de cambios en la humedad. Este comportamiento lineal sugiere que el sensor fabricado es altamente sensible a las variaciones en los niveles de humedad dentro del rango probado. El alto valor de R^2 confirma aún más la fiabilidad de la respuesta del sensor, lo que lo convierte en un candidato prometedor para aplicaciones en sistemas de control de humedad. Según lo revelado por XRD, las muestras carbonáceas exhibieron cierto grado de grafitización, lo que muestra una buena conductividad eléctrica, promoviendo el flujo de electrones a través del material sensor. Esta conductividad garantiza que el sensor pueda detectar pequeños cambios en la resistencia eléctrica con precisión a medida que varía la humedad. Además, como se explica por espectroscopía Raman, la estructura superficial del carbono obtenido a 900 °C puede poseer grupos funcionales que mejoran su interacción con las moléculas de agua, causando cambios medibles en la resistencia a medida que cambia la humedad relativa.



(b)

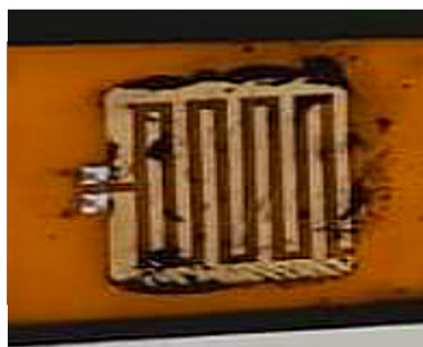


Figura 7. a) Variación de la resistencia con la humedad relativa del sensor 1 y b) Sensor 2 separado de la placa de circuito impreso

En consecuencia, la respuesta de resistencia de los sensores 3 y 4 se muestra en la Figura 8. El Sensor 3 (Figura 8a) demostró buenas propiedades físicas, ya que la tinta permaneció intacta durante la prueba. Este comportamiento se debe probablemente a la excelente resistencia ambiental de la silicona (27) (28). Se observó un comportamiento no lineal, correlacionando positivamente la relación entre la resistencia eléctrica y la humedad relativa, ya que la resistencia aumenta con mayores niveles de humedad. Así, se logró un ajuste polinómico a los datos, con un coeficiente de determinación de 0.9975.

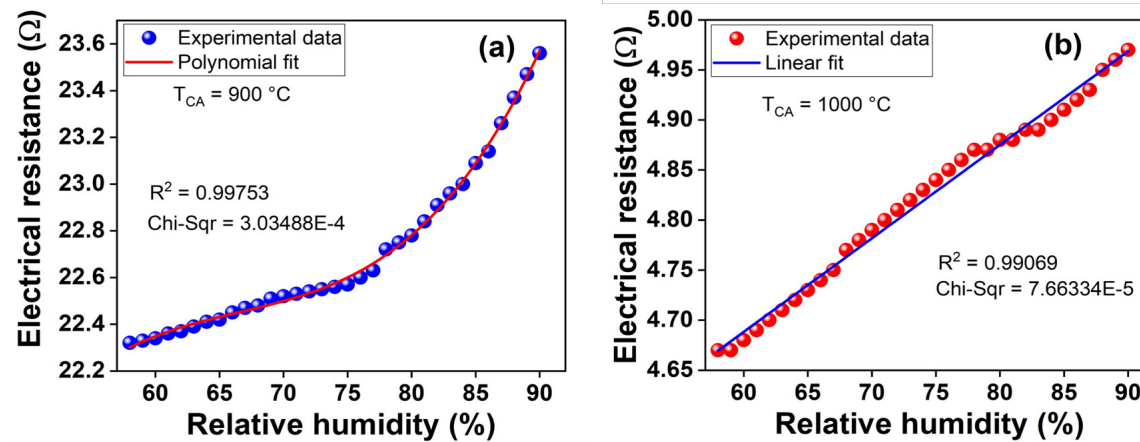


Figura 8. a) Variación de la resistencia con la humedad relativa del Sensor 3 y b) Sensor 4

Esta respuesta no lineal sugiere que la interacción del sistema material con las moléculas de agua cambia dinámicamente a diferentes niveles de humedad. A menor humedad, la interacción entre el material del sensor y las moléculas de agua es menos pronunciada, lo que provoca cambios más pequeños en la resistencia. A medida que aumenta la humedad, las moléculas de agua pueden acumularse en la superficie del sensor, lo que resulta en un punto de saturación que conduce a un aumento significativo de la resistencia.

Por otro lado, los datos del Sensor 4 (Figura 8b) demostraron una clara relación lineal entre la resistencia eléctrica y la humedad relativa, con una resistencia que aumentaba constantemente a medida que aumentaban los niveles de humedad. Se obtuvo un ajuste lineal con un valor de R^2 de 0,9906, lo que indica la precisión del sensor. A diferencia del Sensor 1, el Sensor 4 exhibió una excelente robustez mecánica y resistencia a la humedad, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones prácticas. La linealidad observada sugiere que la interacción entre el material del sensor y las moléculas de agua se produce de manera uniforme en todo el rango de humedad probado, lo que conduce a un cambio sistemático y predecible en la resistencia.

Los resultados obtenidos sugieren que es posible desarrollar un sensor de humedad a partir de la pirólisis directa de la cáscara de arroz, sin ningún tratamiento previo. En este sentido, es importante destacar que, en general, los sensores desarrollados en otros estudios utilizan derivados de la cáscara de arroz que se someten a un proceso de pretratamiento (29) (30) (31). Por lo tanto, este trabajo destaca el potencial del carbono derivado del tratamiento directo de la cáscara de arroz. Se descubrió que la temperatura de carbonización desempeña un papel fundamental en las características de respuesta del sensor. A $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, el sensor mostró una respuesta polinómica, probablemente debido a la menor conductividad del material y al reducido número de grupos

funcionales disponibles para la interacción con las moléculas de agua. Por el contrario, el sensor fabricado con carbono obtenido a 1000 °C mostró una respuesta lineal, que puede atribuirse al mayor grado de grafitización (32) y a una mayor presencia de grupos funcionales en la superficie del carbono. Estas características mejoran la conductividad del material y su capacidad para interactuar constantemente con las moléculas de agua, lo que resulta en una respuesta estable y lineal. Las diferencias en las propiedades del material entre las dos temperaturas de carbonización se corroboraron mediante difracción de rayos X (XRD) y análisis de espectroscopia Raman. Estos resultados ponen de manifiesto la influencia crítica de las condiciones de procesamiento en el rendimiento del sensor y subrayan el potencial para adaptar las propiedades del material a aplicaciones de detección específicas.

Conclusiones

La temperatura de carbonización influye significativamente en las propiedades estructurales y funcionales de los materiales carbonosos sintetizados, y las muestras obtenidas a 1000 °C exhiben una grafitización mejorada, una mejor cristalinidad y una mayor presencia de grupos funcionales, como lo confirman los análisis de espectroscopia XRD y Raman. Estas características fueron críticas para mejorar el rendimiento del sensor, particularmente en aplicaciones de detección de humedad. Entre las tintas probadas, las formuladas con agua destilada y CMC (Tinta 1) o silicona líquida y acetona (Tinta 4) demostraron una homogeneidad superior y facilidad de aplicación, lo que permitió la fabricación exitosa de cuatro sensores resistivos con propiedades físicas y eléctricas robustas. Sin embargo, los sensores fabricados con Ink 1 mostraron una mala adherencia y se desprendieron rápidamente del sustrato, lo que mostró la limitación del aglutinante CMC. Los sensores fabricados con materiales carbonosos obtenidos a 1000 °C superaron a sus homólogos, y el sensor 4 exhibió una relación altamente lineal entre la resistencia y la humedad relativa, lo que indica interacciones consistentes entre las moléculas de agua y la superficie del sensor en todo el rango de humedad probado. La respuesta de los sensores varió en función de la temperatura de carbonización, ya que los materiales obtenidos a 900 °C mostraron una respuesta no lineal debido a una menor conductividad y menos grupos funcionales, mientras que los obtenidos a 1000 °C mostraron una respuesta lineal atribuida a una mayor conductividad y a un mayor número de espesores funcionales en la superficie.

Este estudio destaca el papel crítico de las condiciones de procesamiento de la cáscara de arroz en la adaptación de las propiedades del material para cumplir con los requisitos específicos de detección. Además, en este estudio se presentaron las limitaciones de las tintas basadas en aglutinantes solubles en agua como electrodos para la detección de humedad. Por último, la investigación destaca el potencial de optimización de los materiales carbonosos obtenidos a partir de la cáscara de arroz como sensores para pruebas ambientales, como el control de la humedad en entornos controlados.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del proyecto 82347 financiado por la subvención 890-2020 de Minciencias.

Declaración de contribución de autoría CRediT

Conceptualización - Ideas: J.R. Castro-Ladino. Curación de datos: Santiago Mesa. Análisis formal: J.R. Castro-Ladino, Santiago Mesa. Adquisición de financiación: Santiago Mesa, Dora A. Hoyos-Ayala. Investigación: J.R. Castro-Ladino. Metodología: J.R. Castro-Ladino. Dirección de Proyecto: Dora A. Hoyos-Ayala. Supervisión: Dora A. Hoyos-Ayala. Validación: J.R. Castro-Ladino. Visualización - Elaboración: Santiago Mesa. Redacción - borrador original - Elaboración: J.R. Castro-Ladino, Santiago Mesa. Redacción - revisión y edición - Elaboración: J.R. Castro-Ladino, Santiago Mesa, Dora A. Hoyos-Ayala.

Financiamiento: Minciencias, proyecto 82349, Convocatoria 890-2020. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

References

- (1) Durga M L, Gangil S, Bhargav V K. Conversion of agricultural waste to valuable carbonaceous material: Brief review'. *Mater Today Proc*, 2022; 56:1290-1297. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.259>
- (2) Khoshnood E, Motlagh N, Asasian-Kolur S. A comparative study on rice husk and rice straw as bioresources for production of carbonaceous adsorbent and silica', *Biomass Convers Biorefin*, 2022; 12(12): 5729-5738. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01145-7>
- (3) Mesa S, Jaramillo DL, Urán C, Vélez C. A. Amorphous silica production from Colombian rice husk: demonstration in scaled-up process Products'. *Ingeniería y Competitividad*, 202; 26, (3). <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14396>
- (4) F Akhter S A, Soomro A R, Jamali Z A. Chandio M. Siddique, and M. Ahmed, 'Rice husk ash as green and sustainable biomass waste for construction and renewable energy applications: a review', *Biomass Convers Biorefin*, 2023; 13, (6):4639-4649. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01527-5>
- (5) Vela-Carrillo A Z. et al., Carbon Paste Electrodes Obtained from Organic Waste After a Biodrying Process and Validation in an Electro-Fenton System Towards Alternative Valorization. *J Mex Chem Soc*, 2023; 67(4): 359-370. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v67i4.1962>
- (6) Ortiz-Martínez A K, Godínez L A, Martínez-Sánchez C J, García-Espinoza D, Robles I. Preparation of modified carbon paste electrodes from orange peel and used coffee ground. New materials for the treatment of dye-contaminated solutions using electro-Fenton processes. *Electrochim Acta*, 2021; 390: 138861. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138861>
- (7) Malode S J, Sharma P, Hasan M R, Shetti N P, Mascarenhas R J. Carbon and carbon paste electrodes. *Electrochemical Sensors*, Elsevier, 2022; 79-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823148-7.00004-0>
- (8) Shahi N, Lee E, Min B, Kim D J. Rice Husk-Derived Cellulose Nanofibers: A Potential Sensor for Water-Soluble Gases. *Sensors*, 2021; 21(13): 4415. <https://doi.org/10.3390/s21134415>
- (9) Ziegler D, Boschetto F, Marin E, Palmero P, Pezzotti G, Tulliani J M. Rice husk ash as a new humidity sensing material and its aging behavior. *Sens Actuators B Chem*, 2021; 328:129049, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129049>
- (10) Fathy N A, Sayed Ahmed S A, Aboelenin R M, El-Shafey S S. Fabrication and optimization of

activated carbon-based graphene oxide from rice husks as an alternative to graphite', *New Journal of Chemistry*, 2024; 48(17): 7726-7738. <https://doi.org/10.1039/D4NJ00475B>

(11) Swetha N, Venkata Lakshmi V, Mylarappa M, Chandruvasan S, Harisha K S. Development of SiO₂/rGO from Rice Husk for Photocatalysis, Antioxidant, Electrochemical and Green Sensor Detection Studies. *Silicon*, 2024; 16 (9):4037-4059. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02938-5>

(12) Castro-Ladino J R, Cuy-Hoyos C A, Prías-Barragán J J. Basic physical properties and potential application of graphene oxide fibers synthesized from rice husk. *Sci Rep*, 2023; 13 (1):17967. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45251-8>

(13) Javier J R, Vacca-Casanova A B, Cuy-Hoyos C A. Pyrolysis system to obtain carbonaceous material from rice husk used as a precursor. *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, 2020; 44(172): 805-813. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1109>

(14) Liou T H, Wang PY. Utilization of rice husk wastes in synthesis of graphene oxide-based carbonaceous nanocomposites. *Waste Management*, 2020; 108: 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.029>

(15) Al-Gaashani R, Najjar A, Zakaria Y, Mansour S, Atieh M A. XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods. *Ceram Int*, 2019; 45(11):14439-14448. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.165>

(16) Stobinski L, et al., Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. *J Electron Spectros Relat Phenomena*, 2014; 195: 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2014.07.003>

(17) Tian Y, Lin Y, Hagio T, Hu Y H. Surface-microporous graphene for CO₂ adsorption. *Catal Today*, 2020; 356: 514-518. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.06.002>

(18) Ismail M S, et al. Synthesis and characterization of graphene derived from rice husks. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2019; 15(4): 516-521. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n4.1228>

(19) Arias-Niquepa R A, Prías-Barragán J J, Ariza-Calderón H, Rodríguez-García M E. Activated Carbon Obtained from Bamboo: Synthesis, Morphological, Vibrational, and Electrical Properties and Possible Temperature Sensor. *Physica status solidi (a)*, 2019; 216 (4) <https://doi.org/10.1002/pssa.201800422>

(20) Hidayat S, Ardiaksa P, Riveli N, Rahayu I. Synthesis and characterization of carboxymethyl cellulose (CMC) from salak-fruit seeds as anode binder for lithium-ion battery. *J Phys Conf Ser*, 2018; 1080: 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012017>

(21) Maizal Hairi N I I, et al. Recent advance in using eco-friendly carbon-based conductive ink for printed strain sensor: A review. *Cleaner Materials*, 2024;12:100248. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100248>

(22) Gubbels F, An overview of the chemistry of condensation curing silicone sealants and adhesives. *Int J Adhes Adhes*, 2024; 132:103728. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103728>

(23) Walker P L, Thrower P A. *Chemistry and Physics of Carbon*. Boca Raton: CRC Press, 2021; <https://doi.org/10.1201/9781003209065>

(24) Zhang H, Yang Y, Ren D, Wang L, He X. Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances. *Energy Storage Mater*, 2021; 36:147-170. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.027>

- (25) Reina G, González-Domínguez J M, Criado A, Vázquez E, Bianco A, Prato M. Promises, facts and challenges for graphene in biomedical applications. *Chem Soc Rev*, 2017; 46(15): 4400-4416. <https://doi.org/10.1039/C7CS00363C>
- (26) Shadabfar M, Ehsani M, Khonakdar H A, Abdouss M, Ameri T. Waterborne conductive carbon paste with an eco-friendly binder. *Cellulose*, 2023; 30(3):1759-1772. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04998-5>
- (27) Liu Z, Chen K, Heng C, Dong L, Lin Y. Review on Degradation Behaviors of Silicone Rubber Under Ultraviolet Radiation for Outdoor Insulators. *IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, IEEE, 2024; 1490-1495 <https://doi.org/10.1109/CIEEC60922.2024.10583189>
- (28) Yang H, Wen R, Zhao H, Guo M, Zhang L, Chen Y. Study on ageing characteristics and evaluation methods of RTV silicone rubber in high humidity area. *PLoS One*, 2021; 16(6): e0251092. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251092>
- (29) Jessy Mercy D, Kiran V, Thirumalai A, Harini K, Girigoswami K, Girigoswami A. Rice husk assisted carbon quantum dots synthesis for amoxicillin sensing. *Results Chem*, 2023; 6: 101219. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101219>
- (30) Sumaila JL, et al., 'Morphology and Electrical Properties of Pristine and Composite Rice Husk Ash Nano/Micro Particles Thick Films for Gas Sensing Applications. *IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*, IEEE, 2023; 90-93. <https://doi.org/10.1109/RSM59033.2023.10327321>
- (31) Swetha N, Venkata Lakshmi V, Mylarappa M, Chandruvasan S, Harisha K S, Development of SiO₂/rGO from Rice Husk for Photocatalysis, Antioxidant, Electrochemical and Green Sensor Detection Studies. *Silicon*, 2024; 16(9):4037-4059. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02938-5>
- (32) You H, et al. Sustainable Production of Biomass-Derived Graphite and Graphene Conductive Inks from Biochar. *Small*, 2024; 20(52) <https://doi.org/10.1002/sml.202406669>