

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN DE ENDOCARPIO DE COCO PARA GENERAR MATERIALES CARBONÁCEOS DE INTERÉS COMERCIAL

RECIBIDO: 24/01/2023 ACEPTADO: 20/03/2023 ÚLTIMA VERSIÓN: 10/04/2023

STUDY AND OPTIMIZATION OF THE COCONUT ENDOCARP CARBONIZATION PROCESS TO GENERATE CARBONACEOUS MATERIALS OF COMMERCIAL INTEREST

Carlos Fernando Vanegas Vitola ¹

Estudiante del programa de biología del Departamento de Biología y Química

Reynaldo José Pestana Arrieta ²

Químico investigador del Departamento de Biología y Química

Álvaro Ángel Arrieta Almario ³

Profesor e investigador del Departamento de Biología y Química

RESUMEN

Introducción. En el presente trabajo se presenta la síntesis de materiales a base de carbono a partir del endocarpio de la semilla de cocoteros (*Cocos nucifera*), procurando estandarizar la producción de biocarbón por medio de la maximización de los parámetros de rendimiento y la correlación con una muestra estándar de grafito comercial. Metodología. La biomasa fue recolectada y sometida a calentamiento aplicando la metodología de diseño experimental de superficie de respuesta con un total de 20 experimentos, a partir de la interacción entre el tiempo y la temperatura. Además, se calculó el porcentaje de rendimiento (%R) para cada tratamiento, y se estimó una correlación que comparo cada grafito obtenido con una muestra estándar comercial, utilizando la técnica de Espectrometría de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR). Por otro lado, se realizó una caracterización de la biomasa aplicando el análisis termogravimétrico (TGA/DSC). Resultados. Se pudo demostrar que la temperatura y el tiempo de calentamiento influyen significativamente los parámetros estudiados de los tratamientos en el proceso de carbonización. En cuanto a la caracterización, se pudo evidenciar que a una temperatura de 800°C la biomasa experimenta un cambio en el flujo de calor que tras exponer la muestra a temperatura ambiente ocasiona que esta se humedezca con facilidad. Discusión y conclusión. El rendimiento y la correlación de similitud para el proceso de carbonización del endocarpio de la semilla de cocotero, encuentra una optimización bajo un tiempo de 3 h y una temperatura de 632°C, con un porcentaje de rendimiento de 16.29% y un índice de similitud de 0.5526.

PALABRAS CLAVE

Biomateriales, desechos agroindustriales, endocarpio de coco, FTIR, TGA/DSC.

¹ Estudiante del programa de biología del Departamento de Biología y Química - Universidad de Sucre, UDS, Colombia - carlosvanegas0619@gmail.com

² Químico investigador del Departamento de Biología y Química - Universidad de Sucre, UDS, Colombia - reinaldopestana10@gmail.com

³ Profesor e investigador del Departamento de Biología y Química - Universidad de Sucre, UDS, Colombia - alvaro.arrieta@unisucra.edu.co

ABSTRACT

Introduction. The aim was to synthesize carbon-based materials from the endocarp of coconut (*Cocos nucifera*) seed, seeking to standardize the production of biochar by maximizing the performance parameters and correlating them with a standard commercial graphite sample. **Methodology.** The biomass was collected and subjected to heating by applying the response surface experimental design methodology with a total of 20 experiments, based on the interaction between time and temperature. In addition, the percentage yield (%R) was calculated for each treatment, and a correlation was estimated comparing each graphite obtained with a standard commercial sample, using the Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) technique. On the other hand, a biomass characterization was performed by applying thermogravimetric analysis (TGA/DSC). **Results.** It was possible to demonstrate that the temperature and heating time significantly influence the studied parameters of the treatments in the carbonization process. As for the characterization, it could be evidenced that at a temperature of 800°C the biomass undergoes a change in the heat flow which, after exposing the sample to room temperature, causes it to wet easily. **Discussion and conclusion.** The yield and similarity correlation for the coconut seed endocarp carbonization process is optimized under a time of 3 h and a temperature of 632°C, with a yield percentage of 16.29% and a similarity index of 0.5526.

KEYWORDS

Biomaterials, agro-industrial wastes, coconut endocarp, FTIR, TGA/DSC.

RESUMO

Introdução. O presente estudo tem como objetivo sintetizar materiais à base de carbono a partir do endocarpo da semente do coco (*Cocos nucifera*), procurando padronizar a produção de biochar através da maximização dos parâmetros de desempenho e correlacionar com uma amostra padrão de grafite comercial. **Metodologia.** Esta biomassa foi recolhida e aquecida utilizando a metodologia de desenho experimental de superfície de resposta com um total de 20 experiências, baseadas na interação entre tempo e temperatura. Para além disso, calculou-se o rendimento percentual (%R) para cada tratamento e estimou-se uma correlação comparando cada grafite obtida com uma amostra comercial padrão, utilizando a técnica de espectrometria de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR). Por outro lado, foi efectuada uma caracterização da biomassa através da análise termogravimétrica (TGA/DSC). **Resultados.** Entre os resultados obtidos, foi possível demonstrar que a temperatura e o tempo de aquecimento influenciam significativamente os parâmetros estudados dos tratamentos no processo de carbonização. Em termos de caracterização, verificou-se que a uma temperatura de 800°C a biomassa sofre uma alteração no fluxo de calor que, após a exposição da amostra à temperatura ambiente, faz com que esta fique facilmente molhada. **Discussão e conclusão.** A correlação de rendimento e de semelhança do processo de carbonização do endocarpo da semente de coco é otimizada com um tempo de 3 h e uma temperatura de 632°C, com uma percentagem de rendimento de 16,29% e um índice de semelhança de 0,5526.

PALAVRAS-CHAVE

Biomateriais, resíduos agro-industriais, endocarpo de coco, FTIR, TGA/DSC.

SUMARIO

1. Introducción. 1.1. Materiales carbonáceos. 1.2. Tipos de materiales carbonáceos. 1.2.1. Carbono amorfo. 1.2.2. Carbono activado. 1.2.3. Grafito. 1.2.4. Carbono pirolítico. 1.2.5. Nanotubos de carbono. 1.2.6. Grafeno. 1.3. Propiedades físicas y químicas de los materiales carbonáceos. 1.4. Formación natural de los materiales carbonáceos. 1.5. Fuentes de obtención de los materiales carbonáceos. 1.6. Métodos de extracción y síntesis de materiales carbonáceos. 1.6.1. Métodos mecánicos. 1.6.2. Métodos químicos. 1.7. Uso y aplicaciones potenciales. 1.8. ¿Qué métodos se pueden utilizar para caracterizar los materiales carbonáceos? 1.8.1. Espectroscopia Raman. 1.8.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). 1.8.3. Espectrometría de masa de iones secundarios (SIMS). 1.8.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM). 1.8.5. Análisis termogravimétrico (TGA). 1.8.6. Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC). 1.9. Uso de desechos agroindustriales para la síntesis de materiales carbonáceos. 1.10. Planteamiento del problema. 2. Metodología. 2.1. Recolección de biomasa de endocarpo de la semilla de coco. 2.2. Procedimiento. 2.3. Caracterización de biocarbón. 2.4. Análisis estadístico y optimización. 3. Resultados y Discusión. 4. Conclusión. 5. Bibliografías.

CONTENTS

1. Introduction. 1.1. Carbonaceous materials. 1.2. Types of carbonaceous materials. 1.2.1. Amorphous carbon. 1.2.2. Activated carbon. 1.2.3. Graphite. 1.2.4. Pyrolytic carbon. 1.2.5. Carbon nanotubes. 1.2.6. Graphene. 1.3. Physical and chemical properties of carbonaceous materials. 1.4. Natural formation of carbonaceous materials. 1.5. Sources of carbonaceous materials. 1.6. Methods of extraction and synthesis of carbonaceous materials. 1.6.1. Mechanical methods. 1.6.2. Chemical methods. 1.7. Use and potential applications. 1.8. What methods can be used to characterize carbonaceous materials? 1.8.1. Raman spectroscopy. 1.8.2. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). 1.8.3. Secondary ion mass spectrometry (SIMS). 1.8.4. Transmission electron microscopy (TEM). 1.8.5. Thermogravimetric analysis (TGA). 1.8.6. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis. 1.9. Use of agro-industrial waste for the synthesis of carbonaceous materials. 1.10. Problem statement. 2. Methodology. 2.1. Collection of coconut seed endocarp biomass. 2.2. Procedure. 2.3. Biochar characterization. 2.4. Statistical analysis and optimization. 3. Results and discussion. 4. Conclusion. 5. Bibliographies.

Traducción de Carlos Vanegas (Estudiante del Programa de Biología - Universidad de Sucre)

1. INTRODUCCIÓN**1.1. MATERIALES CARBONÁCEOS**

Los materiales carbonosos son materiales versátiles que han encontrado su lugar en una infinidad de aplicaciones para una sociedad “neutral en carbono” [1]. Los materiales carbonosos exhiben una diversidad impresionante de propiedades que los convierten en elementos irremplazables en una extensa gama de aplicaciones. Su versatilidad única abarca diversos campos, destacándose como componentes indispensables en una variedad extraordinaria de contextos y usos [2]. Ya se están utilizando como sensores, biomateriales, electrodos de almacenamiento y conversión de energía y remediación de efluentes [1]. Estos materiales carbonosos encuentran aplicación en diversas áreas, como la electrónica, la industria automotriz, la medicina, la energía y la investigación científica. Además, la investigación continua en este campo busca descubrir nuevas formas de aprovechar las propiedades únicas del carbono para desarrollar materiales innovadores con aplicaciones aún más amplias [1, 2].

Los materiales carbonáceos se originan a partir de la disposición de capas de grafeno provenientes de grafito de cristalización única. Estas capas, que sirven como unidades fundamentales de construcción, exhiben variabilidad en sus dimensiones y en la forma en que se organizan. Este rango de posibilidades en la organización de las capas da lugar a la creación de diversos materiales carbonáceos con propiedades distintivas, dependiendo de cómo se lleva a cabo su ensamblaje [3].

1.2. TIPOS DE MATERIALES CARBONÁCEOS

Los materiales carbonáceos incluyen una amplia gama de sustancias tales como carbono amorfo, carbón activado, grafito, carbono pirolítico, nanotubos de carbono, grafeno, celulosa, lignina, puntos cuánticos de carbono, nitruro de carbono grafitico y nanofibras de carbono [4].

1.2.1. CARBONO AMORFO

El carbono amorfo, una variante no cristalina del carbono, se destaca por su excepcional versatilidad y su amplio espectro de aplicaciones. La síntesis de este material se logra mediante métodos como la síntesis hidrotérmica, empleando sacarosa y ácido cítrico. Este proceso permite controlar el tamaño de las microesferas de carbono producidas, un aspecto crucial para su aplicación en contextos específicos [5].

La exploración en la producción de materiales de carbono dopados con nitrógeno mediante la técnica de deposición química de vapor ha revelado perspectivas prometedoras. La inclusión de metales de transición durante este proceso modifica la cantidad y las características del carbono depositado, influyendo directamente en sus propiedades capacitivas [6]. En un ámbito diferente, se ha investigado el uso de fotocatalizadores basados en carbono derivados de biomasa para la degradación de contaminantes bajo luz visible. Este enfoque destaca por su eficacia y sostenibilidad, abriendo nuevas posibilidades en la remediación ambiental [7].

En investigaciones más recientes, se ha profundizado en la influencia del soporte de carbono en la reacción de reducción de oxígeno en entornos alcalinos. Estos estudios resaltan la importancia de la cristalinidad, conductividad y dopaje del carbono en su desempeño como electrocatalizador [4]. Estos avances colectivos subrayan la importancia del carbono amorfo en campos tan diversos como la síntesis química, el almacenamiento de energía y la remediación ambiental, posicionándolo como un actor clave en la vanguardia de la investigación y aplicación científica [8].

1.2.2. CARBÓN ACTIVADO

Es un tipo de carbón poroso con una gran área superficial. Su capacidad para absorber impurezas y gases lo hace valioso en aplicaciones de purificación de agua y aire, así como en la

industria farmacéutica [3]. Las propiedades fisicoquímicas del carbón activado están intrínsecamente vinculadas a diversos factores, entre los que destacan el método de preparación y la fuente de carbono empleada. Estas propiedades pueden evaluarse mediante parámetros clave como área superficial, volumen de poro, distribución del tamaño de poro, densidad y grado de defectos [9]. El carbón activado, en virtud de su alto grado de porosidad, área superficial bien desarrollada y la presencia de diversos grupos funcionales, se posiciona como un material excepcionalmente apto para la adsorción de contaminantes tanto de soluciones acuosas como de la atmósfera [4]. Las propiedades multifacéticas del carbón activado, desde su eficacia en la adsorción de contaminantes hasta sus cualidades térmicas y electroquímicas, lo consolidan como un material de interés en una variedad de aplicaciones científicas, tecnológicas y medioambientales [9, 10].

La versatilidad del carbón activado se extiende más allá de sus propiedades adsorbentes, ya que también exhibe destacadas propiedades térmicas. Esta característica lo hace idóneo para su aplicación como aislante térmico en materiales de construcción, contribuyendo así a la eficiencia energética y al control de la temperatura [11]. Adicionalmente, se ha evidenciado que el carbón activado presenta excelentes propiedades electroquímicas, lo que lo convierte en una opción idónea para aplicaciones en supercondensadores. Su capacidad para almacenar y liberar energía de manera eficiente en entornos electroquímicos refuerza su posición como material avanzado en la ingeniería de almacenamiento de energía [11].

La elaboración de carbón activado se realiza primordialmente a través de dos enfoques: la activación física, también denominada térmica, y la activación química. En el método de activación física, el material carbonáceo se somete inicialmente a un proceso de carbonización en una atmósfera inerte, seguido de la activación mediante un agente oxidante, como dióxido de carbono o vapor de agua. Por otro lado, la activación química involucra el tratamiento del material con un agente deshidratante, como ácido fosfórico, cloruro de zinc o hidróxido de potasio, seguido por la eliminación cuidadosa de dicho agente a través de un lavado con agua [3].

1.2.3. GRAFITO

El grafito, una estructura compuesta por capas de átomos de carbono dispuestos en una configuración de anillo condensado, se destaca por sus notables propiedades termomecánicas, estructurales y de moderación de neutrones. Esta combinación única de características lo convierte en un material idóneo para su implementación en reactores refrigerados por gas de alta temperatura (HTGR) [12]. La relevancia del grafito en este contexto radica en su capacidad para resistir condiciones extremas y contribuir eficientemente a la gestión térmica y neutra de tales reactores, siendo utilizado en aplicaciones como electrodos en baterías y lubricantes sólidos [12]. En el ámbito de la purificación del grafito, diversos métodos han sido desarrollados por investigadores, y el método del ácido fluorhídrico activado por calor (HAH) destaca como un ejemplo notable. Este método ha demostrado una eficacia sobresaliente al purificar el grafito en escamas sin procesar hasta un 99% de pureza [13, 14]. La purificación del grafito no solo mejora sus propiedades intrínsecas, sino que también

amplía su aplicación en diversas áreas de investigación y desarrollo [13, 14].

Más allá de su papel fundamental en reactores nucleares, el grafito ha despertado un creciente interés por sus posibles aplicaciones en catálisis y en otros dominios. La exploración de estas aplicaciones adicionales resalta la versatilidad y el potencial multifacético del grafito en diversas disciplinas científicas y tecnológicas [15].

La resistencia excepcional del grafito a condiciones extremas, como altas temperaturas y radiación, lo hace ideal para su uso en reactores HTGR. Además, su capacidad para moderar neutrones, es decir, reducir su velocidad de manera eficiente, contribuye significativamente a la seguridad y eficacia de estos sistemas nucleares. El método de purificación HAH representa un avance significativo en la mejora de la calidad del grafito. Al lograr un nivel tan alto de pureza, se abren nuevas posibilidades para su aplicación en áreas que requieren materiales de alto rendimiento, como en la fabricación de electrodos para baterías de alto rendimiento y lubricantes sólidos utilizados en condiciones exigentes [14, 15].

La exploración de aplicaciones adicionales del grafito, como en catálisis, resalta su versatilidad y su capacidad para desempeñar roles fundamentales en diversas disciplinas. En catálisis, su estructura única puede proporcionar sitios activos para reacciones químicas, lo que amplía aún más su utilidad más allá de su función tradicional en reactores nucleares. El grafito, con sus propiedades termomecánicas excepcionales y su capacidad única de moderación de neutrones, demuestra ser un material crucial en el ámbito de la energía nuclear. La purificación mejorada y la exploración de aplicaciones adicionales resaltan su versatilidad y potencial multifacético en diversas disciplinas científicas y tecnológicas, promoviendo un continuo interés en su estudio y desarrollo [14, 15].

1.2.4. CARBONO PIROLÍTICO

El carbono pirolítico, un material derivado de procesos sostenibles como la pirólisis de materiales carbonáceos, ofrece una versatilidad única que puede ser modificada mediante diversas técnicas, entre las que se incluyen oxidación, cicloadiciones y reacciones radicales [16]. La aplicación de diferentes tecnologías de separación para placas de circuito impreso (PCB) emerge como un factor influyente en las propiedades del carbono pirolítico, incidiendo en sus estructuras morfológicas y porosas [17]. En conjunto, el carbono pirolítico se erige como un material polifacético con aplicaciones desde la nanotecnología hasta la energía sostenible, demostrando su relevancia en múltiples disciplinas científicas y tecnológicas.

La estructura precursora del carbono duro ejerce un impacto significativo en la estructura y el rendimiento electroquímico de los materiales del cátodo de carbono fluorado [18]. Esta interrelación subraya la importancia de considerar la composición inicial al buscar optimizar las propiedades finales del carbono pirolítico en aplicaciones específicas [18].

En el ámbito de la deposición de carbono pirolítico mediante el uso de metano e hidrógeno, se observa la formación de

conos basados en grafeno con ápice nanomezado [19]. Estas estructuras no solo poseen propiedades únicas, sino que también tienen aplicaciones potenciales en áreas como la emisión de electrones y la microscopía de campo cercano [19]. Esta versatilidad funcional del carbono pirolítico abre nuevas posibilidades en la investigación de materiales avanzados y tecnologías emergentes. Adicionalmente, el carbono pirolítico puede ser producido eficientemente en un sistema de coproducción de calor, donde la pirólisis de biomasa genera gas utilizable para la producción de vapor limpio y el suministro de calor [19].

1.2.5. NANOTUBOS DE CARBONO

Los nanotubos de carbono se revelan como estructuras tubulares extraordinarias, caracterizadas por su diámetro nanométrico y una impresionante relación longitud/diámetro. Dotados de propiedades físicas y mecánicas excepcionales, como un elevado módulo de Young y una resistencia a la tracción sobresaliente, estos nanotubos encuentran aplicaciones prometedoras en materiales compuestos y dispositivos electrónicos [20, 21]. Los nanotubos de carbono han captado la atención significativa de la comunidad científica y tecnológica gracias a sus propiedades únicas y su potencial versatilidad en diversas aplicaciones. Desde la nanotecnología hasta la medicina, estos nanotubos representan un campo emocionante de investigación y desarrollo con el potencial de transformar numerosos sectores industriales [20, 21].

La diversidad intrínseca de los nanotubos de carbono se manifiesta en su capacidad para adoptar formas metálicas o semiconductoras, dependiendo de sus parámetros estructurales. Esta flexibilidad estructural amplía su utilidad en una variedad de aplicaciones, que incluyen transistores de efecto de campo, transistores de un solo electrón y diodos rectificadores [22, 23]. Su versatilidad se extiende a campos tan diversos como la aeroespacial, electrónica, medicina, defensa, automotriz, energía, construcción y administración de fármacos [24, 25]. En este orden de ideas, la fabricación de nanotubos de carbono abarca diversos métodos avanzados, como la deposición química de vapor, descarga de arco, ablación láser y antorcha de plasma. Estos enfoques innovadores permiten la síntesis controlada de nanotubos con propiedades específicas, potenciando su aplicación en una amplia gama de sectores [24, 25].

1.2.6. GRAFENO

El grafeno, una lámina aislada de grafito, emerge como un cristal bidimensional de singular importancia en la investigación y desarrollo científico y tecnológico. Su obtención se lleva a cabo mediante un proceso innovador que implica la separación de las capas de grafito utilizando cinta adhesiva, dando lugar a una estructura bidimensional única [6, 7]. Aunque comparte similitudes estructurales con el grafito tridimensional, el grafeno exhibe propiedades excepcionales que lo distinguen significativamente. La singularidad de su estructura bidimensional confiere al grafeno propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas notables, que lo posicionan como un material de gran interés y relevancia en diversas aplicaciones [26, 27].

Este proceso de obtención es crucial para entender las propiedades únicas del grafeno. La separación de las capas de grafito revela una lámina de carbono con una estructura hexagonal de átomos dispuestos de manera ordenada. Este arreglo atómico especial es responsable de las propiedades extraordinarias del grafeno. La definición del grafeno como un cristal bidimensional subraya su carácter distintivo, marcando una diferencia esencial con respecto al grafito tridimensional del cual proviene. Mientras que ambos comparten una raíz común, el grafeno se erige como una entidad única con propiedades sobresalientes que lo destacan en la investigación y desarrollo científico y tecnológico [26, 27].

Desde una perspectiva más detallada, las propiedades eléctricas del grafeno son excepcionales debido a su estructura de banda de energía única, que permite la conducción ultra eficiente de la corriente eléctrica. Esto ha llevado a numerosas investigaciones y aplicaciones en dispositivos electrónicos avanzados, como transistores y dispositivos fotovoltaicos [28]. En cuanto a las propiedades mecánicas, el grafeno es increíblemente resistente y liviano. Su resistencia excepcional se atribuye a los enlaces carbono-carbono fuertes y su estructura en capas. Esto ha llevado a exploraciones en aplicaciones como materiales compuestos y nanotecnología [28].

Las propiedades térmicas del grafeno también son notables. Su alta conductividad térmica lo hace ideal para aplicaciones en disipadores de calor y sistemas de refrigeración avanzados. Estudios adicionales sobre el grafeno incluyen su comportamiento en campos magnéticos y su potencial en aplicaciones médicas, como sensores y dispositivos biomédicos [26, 27, 28]. Cabe decir que, la obtención y definición del grafeno como un cristal bidimensional no solo resalta su origen en el grafito tridimensional, sino que también destaca sus propiedades únicas que lo hacen excepcionalmente valioso en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas. La investigación continua en este campo promete revelar aún más aspectos fascinantes y posibilidades innovadoras para el grafeno [26, 27, 28].

1.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS MATERIALES CARBONÁCEOS

El papel de los materiales carbonáceos en la catálisis está intrínsecamente vinculado a sus excepcionales propiedades físicas. Un contribuyente significativo a su destreza catalítica es la extensa área de superficie interna y el volumen de poros que los dota de notables capacidades adsorbentes [3]. La adaptación de la estructura porosa de estos materiales se convierte en una herramienta invaluable, permitiendo el ajuste preciso de la distribución del tamaño de los poros para satisfacer las demandas de aplicaciones específicas [3]. La versatilidad de los carbones porosos se ejemplifica en sus diversas formas físicas, desde telas de carbón activado hasta monolitos, cada uno diseñado para abordar aplicaciones novedosas [3].

En el ámbito de la catálisis, los materiales carbonáceos encuentran aplicación como catalizadores y soportes catalíticos en diversas industrias. Desde la conversión de metanol hasta la hidrodesulfuración (HDS) del tiofeno y la síntesis de Fischer-Tropsch, su utilidad abarca procesos críticos [3]. Las propiedades físicas controlables, incluida el

área de superficie, el volumen de poros y la distribución del tamaño de los poros, ofrecen un lienzo para la personalización. Esto permite la creación de un área de superficie generosa para la dispersión efectiva de fases activas, una distribución óptima del tamaño de poro que facilita la difusión eficiente de reactivos y productos, y la obtención del carácter ácido-base necesario para un rendimiento óptimo [3].

Los materiales carbonáceos destacan como la elección preferida para una multitud de reacciones, celebrados por sus excelentes atributos [3]. Entre ellos se encuentran su destacada conductividad, elevada estabilidad, rentabilidad, ventanas de potencial amplias y la facilidad con la que se pueden modificar sus superficies [3]. Este conjunto colectivo de propiedades subraya la utilidad inigualable de los materiales carbonáceos en la catálisis, consolidando su estatus como componentes indispensables en una variedad de procesos químicos [3].

La estructura física de los materiales carbonáceos, como los carbones activados, se caracteriza por una disposición desorganizada de láminas y tiras aromáticas, generalmente dobladas, que se asemejan a una mezcla de virutas de madera y papel arrugado, con brechas variables de dimensiones moleculares entre ellas, que son los microporos [3]. Esta estructura desorganizada depende del material precursor y su pretratamiento. Durante la pirólisis del precursor, heteroátomos como oxígeno, nitrógeno e hidrógeno se eliminan como productos volátiles, y los átomos de carbono restantes se agrupan en pilas de láminas aromáticas planas entrecruzadas de manera aleatoria [3]. La disposición irregular de estas láminas deja intersticios libres entre ellas, que pueden obstruirse con alquitranes y otros productos de pirólisis que generan átomos de carbono desorganizados. Durante la activación térmica, este carbono desorganizado es el primero en reaccionar, despejando la porosidad incipiente del carbón. Posteriormente, los átomos de carbono en las láminas aromáticas comienzan a reaccionar para desarrollar porosidad, lo que a su vez depende de la extensión de la activación [3]. Los poros en el carbón activado pueden clasificarse en tres grupos principales según sus tamaños: microporos, mesoporos y macroporos [3]. Los microporos son poros con un tamaño inferior a 2 nm y son el tipo de poro más abundante en los carbones activados [3]. Los mesoporos tienen un tamaño entre 2 y 50 nm, y los macroporos tienen un tamaño superior a 50 nm [3]. La estructura física de los materiales carbonáceos, especialmente la estructura de poros, desempeña un papel crucial en sus propiedades de adsorción y química de superficie, haciéndolos adecuados para diversas aplicaciones en industrias como adsorción, catálisis y procesos de separación [3].

Por ejemplo, la capacidad de adsorción del carbón activado se ve significativamente afectada por su estructura física. Esta estructura incluye parámetros como área superficial, volumen de poros y distribución de tamaño de poro, los cuales determinan la capacidad de adsorción del adsorbente [3]. El carbón activado es principalmente un sólido amorfo con una estructura física relacionada con la del grafito. Se forma mediante capas de átomos de carbono sp^2 , dispuestos en hexágonos regulares, y contiene pequeños cristallitos formados por capas paralelas de hexágonos de carbono, las capas de grafeno, que no están perfectamente orientadas con respecto a su eje perpendicular y pueden superponerse de manera irregular [3].

La presencia de una gran área superficial interna y una estructura porosa polimodal, especialmente la microporosidad,

contribuye a la alta capacidad de adsorción del carbón activado [3]. Los microporos, con tamaños menores a 2 nm, proporcionan una gran área superficial para la adsorción y son el tipo de poro más abundante en los carbones activados [3]. La estrecha distribución de tamaños de microporos puede adaptarse para dar carbones activados con diferentes tamaños de microporos, los cuales pueden ser adecuados para aplicaciones específicas en procesos de adsorción en fase gaseosa o líquida [3].

La estructura física del carbón activado también influye en su química de superficie, lo que a su vez afecta las propiedades adsorptivas [3]. La modificación de la química de la superficie mediante la introducción de heteroátomos como oxígeno y nitrógeno puede tener un efecto importante en las interacciones adsorbente-adsorbato y, por ende, en las propiedades adsorptivas resultantes [3]. La presencia de complejos superficiales o grupos funcionales, como carboxilo, fenol y carbonilo, principalmente ácidos, proporciona al carbón activado un carácter específico, permitiéndole comportarse como un ácido sólido [3].

En resumen, la estructura física del carbón activado, incluyendo su área superficial, volumen de poros y distribución de tamaño de poro, desempeña un papel crucial en la determinación de su capacidad de absorción [3]. La presencia de una gran área superficial interna, microporosidad y una química de superficie adaptada permite que el carbón activado adsorba selectivamente una amplia gama de moléculas, convirtiéndolo en un adsorbente versátil para diversas aplicaciones en procesos de adsorción en fase gaseosa y líquida [3].

1.4. FORMACIÓN NATURAL DE LOS MATERIALES CARBONÁCEOS

Los materiales carbonáceos, elementos fundamentales en diversas formaciones geológicas, se originan a partir de la alteración de materia orgánica, como la biomasa, durante procesos geológicos significativos, tales como la diagénesis y el metamorfismo. Estos materiales, presentes en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, abarcan una variedad de compuestos como kerógeno, pirobetún, carbón grafitizante y grafito cristalino, todos productos de procesos geológicos complejos [28, 29].

La formación de materiales carbonáceos puede adoptar dos enfoques fundamentales: biogénico, donde su origen se vincula a organismos vivos, y abiogénico, emergente de procesos químicos no biológicos [29, 30]. Esta dualidad en su génesis añade una dimensión intrigante a la diversidad de estos materiales y su papel en la historia geológica de la Tierra [29, 30].

La presencia ubicua de materiales carbonáceos en distintos tipos de rocas confiere una ventaja única, ya que actúan como archivos que preservan información crucial sobre la historia temprana de nuestro planeta y la evolución de la vida [29]. Estos materiales, al ser testigos de procesos geológicos a lo largo del tiempo, ofrecen pistas valiosas sobre la Tierra primitiva y los eventos que moldearon su superficie y atmósfera en las eras tempranas [29].

Entender la presencia y la composición de los materiales carbonáceos es vital para desentrañar los procesos

biogeoquímicos en la Tierra primitiva [29, 30]. Además, la capacidad de estos materiales para contener pistas sobre la existencia de vida temprana añade una capa adicional de fascinación y relevancia científica a su estudio [29, 30]. En conjunto, los materiales carbonáceos se revelan como tesoros geológicos que permiten acceder a los secretos más profundos de la historia de nuestro planeta [29, 30].

1.5. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES CARBONÁCEOS

La obtención de materiales carbonáceos, regida por principios específicos según diversas fuentes especializadas, es un proceso diverso que involucra la utilización de una variedad de precursores [1, 31]. Estos precursores abarcan desde biomasa, polímeros y líquidos iónicos hasta sales fundidas, e incluso compuestos orgánicos notables como la cafeína. La selección cuidadosa de estos precursores desempeña un papel fundamental en la preparación de materiales carbonáceos con propiedades altamente específicas, como porosidad controlada y composición química modificada [1, 31]. La versatilidad excepcional de los materiales resultantes, derivada de estas características particulares, los posiciona como soluciones idóneas para una amplia variedad de aplicaciones en campos diversos. La literatura especializada destaca la importancia de estas elecciones en la obtención de materiales carbonáceos avanzados, enfatizando su capacidad para adaptarse a requisitos específicos y ofrecer soluciones innovadoras en distintos ámbitos de aplicación [1, 31].

En este contexto, la diversidad de precursores no sólo amplía el rango de propiedades que se pueden lograr, sino que también permite la adaptación de los materiales a aplicaciones específicas [1, 31]. Por ejemplo, la utilización de compuestos orgánicos notables, como la cafeína, puede introducir propiedades únicas en los materiales carbonáceos resultantes, lo que podría tener aplicaciones específicas en campos como la catálisis o la adsorción selectiva [1, 31]. Además, la atención a la composición química modificada abre la puerta a la personalización de propiedades que son cruciales en aplicaciones específicas. Por ejemplo, la capacidad de controlar la porosidad puede ser esencial en aplicaciones como la captura y almacenamiento de gases, donde la eficiencia está directamente relacionada con la estructura porosa del material [1, 31].

Por otra parte, la elección de precursores en la obtención de materiales carbonáceos no solo es un paso crucial, sino que también influye directamente en las propiedades y aplicaciones potenciales de los materiales resultantes [1, 31]. La diversidad en estos precursores no sólo amplía el espectro de propiedades disponibles, sino que también resalta la capacidad de estos materiales para adaptarse a requisitos específicos y proporcionar soluciones innovadoras en diversos campos científicos y tecnológicos [1, 31].

1.6. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN Y SÍNTESIS DE MATERIALES CARBONÁCEOS

La elaboración de materiales carbonáceos, como se ha detallado en una exhaustiva revisión científica, se rige por pautas específicas que destacan la importancia de la síntesis

“verde” y sostenible [1, 32, 33]. Esta perspectiva impone la necesidad de que la síntesis de estos materiales sea respetuosa con el medio ambiente, utilizando precursores de origen renovable [32]. La literatura científica resalta la exigencia de que los materiales resultantes no solo cumplan con estándares de referencia elevados, sino que también superen las expectativas asociadas a metales nobles [1, 32].

Una recomendación fundamental proveniente de la revisión científica es la minimización tanto de residuos como de productos químicos empleados en el proceso de síntesis. Se aboga por la simplificación de dichos procesos y la reducción significativa del consumo de energía como una estrategia clave para avanzar hacia prácticas más sostenibles y eficientes en la obtención de materiales carbonáceos avanzados [1, 32]. En este contexto, es crucial no sólo evaluar la eficacia de los métodos de síntesis, sino también considerar su impacto ambiental [1, 32]. La investigación actual se centra en el desarrollo de técnicas que no solo sean eficientes desde el punto de vista de la producción de materiales avanzados, sino que también minimicen la huella ambiental asociada con la síntesis de materiales carbonáceos. Este enfoque implica una revisión integral de los procesos, desde la elección de precursores hasta la manipulación de residuos, con el objetivo de optimizar la sostenibilidad del ciclo de vida de estos materiales [1, 32].

La selección cuidadosa de precursores de origen renovable y la optimización de procesos para reducir residuos y productos químicos son áreas clave de interés en la vanguardia de la síntesis de materiales carbonáceos sostenibles [32, 33]. Además, se está explorando la integración de tecnologías más limpias y eficientes, como la energía renovable, para abordar el consumo de energía en estos procesos [32, 33]. Esta diversificación en las fuentes de energía no solo tiene beneficios ambientales directos, sino que también contribuye a la reducción de la dependencia de recursos no renovables [32, 33].

Es relevante destacar que este proceso de síntesis de materiales carbonáceos avanzados no solo se enfoca en la eficacia y las propiedades intrínsecas de los materiales, sino que también aboga por prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente [32, 33]. La integración de estas consideraciones en la investigación y desarrollo de nuevos materiales no solo responde a una responsabilidad científica, sino que también abre nuevas posibilidades para el desarrollo de materiales carbonáceos avanzados con aplicaciones más amplias en campos como la nanotecnología, la electrónica y la catálisis. Este enfoque holístico promete avanzar hacia una producción más responsable y ética en el campo de la ciencia de materiales carbonáceos, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad y la innovación en la comunidad científica [32, 33].

1.6.1. MÉTODOS MECÁNICOS

La síntesis de materiales carbonáceos mediante métodos mecánicos ha experimentado notables avances en los últimos años, con un enfoque particular en la síntesis asistida por microondas [34].

Esta técnica ha demostrado ser altamente eficiente, facilitando la creación de nanopartículas carbonáceas luminiscentes.

Un aspecto destacado de esta metodología es su carácter ecológico, proporcionando una vía más eficiente para la producción de seda de gusano de seda fluorescente [34].

En el ámbito de la síntesis de grafeno, se han explorado métodos alternativos que incluyen la irradiación por microondas y la aplicación de energía ultrasónica [35]. Estas variaciones en las técnicas de síntesis no solo ofrecen nuevas perspectivas, sino que también amplían significativamente las posibilidades de producir grafeno a partir de una diversidad de materiales [35]. Un avance significativo en la convergencia de materiales es la creación de compuestos de óxido de titanio con grafeno, así como el grafeno inducido por láser, diseñado específicamente para aplicaciones ambientales [36]. Destaca la eficiencia de los métodos de síntesis de un solo paso, lo que sugiere un potencial considerable para la producción de materiales avanzados con propiedades mejoradas [36].

Finalmente, la síntesis de materiales carbonáceos a partir de residuos biológicos para su aplicación en supercapacitores ha sido objeto de una revisión exhaustiva [37]. Se ha resaltado la importancia de la activación química y la carbonización en este contexto, ya que contribuyen significativamente a mejorar la porosidad y la eficiencia electroquímica de los materiales resultantes [37].

En conjunto, estos avances subrayan la diversidad y la innovación en los métodos de síntesis de materiales carbonáceos, evidenciando su potencial no solo en la producción de materiales fluorescentes y grafeno, sino también en aplicaciones medioambientales y electroquímicas [37].

La continua exploración de nuevas técnicas y enfoques en este campo promete abrir nuevas fronteras para el desarrollo de materiales carbonáceos con propiedades mejoradas y aplicaciones más amplias [37].

1.6.2. MÉTODOS QUÍMICOS

Los métodos químicos para la síntesis de materiales carbonáceos han experimentado avances significativos, ofreciendo nuevas posibilidades en diversas aplicaciones.

Un enfoque notable es el uso de métodos asistidos por microondas para sintetizar nanopartículas carbonáceas luminiscentes, un proceso que combina eficiencia y sostenibilidad [38]. Además, se ha desarrollado un método de síntesis de un solo paso para la producción de HMF a partir de carbohidratos utilizando un catalizador carbonáceo ácido-base funcional soportado en nanotubos de haloisita, lo que representa un avance en la química de conversión de biomasa [39]. Otro estudio importante se centró en la síntesis y caracterización de carbón activado a partir de materiales de desecho biológico, demostrando su eficacia como adsorbente de bajo costo para la eliminación de impurezas del agua [40]. Por último, se ha revisado la síntesis de puntos cuánticos de grafeno derivados de biomoléculas, destacando su potencial en aplicaciones avanzadas como la optoelectrónica y la biomedicina [41].

Estos avances ilustran la diversidad y la innovación en los métodos químicos de síntesis de materiales carbonáceos, resaltando su potencial en una amplia gama de aplicaciones.

1.7. USO Y APLICACIONES POTENCIALES

Los materiales carbonáceos, con sus diversos alótropos, desempeñan un papel fundamental en una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de energía en celdas de combustible hasta usos medicinales, cosméticos y como catalizadores [42]. Dentro de este abanico, destacan tres clases principales de alótropos de carbono: los carbones activados, los nanotubos de carbono y el grafeno. La investigación en torno a estos materiales se ha centrado tanto en entender sus metodologías de síntesis como en explorar sus aplicaciones sostenibles, que incluyen el tratamiento de agua, almacenamiento de energía y eliminación de dióxido de carbono de la atmósfera [42].

En particular, los carbones activados han encontrado un amplio campo de aplicación en el tratamiento del agua, donde su capacidad para absorber contaminantes ha sido explotada de manera exitosa [42]. Por otro lado, los nanotubos de carbono y el grafeno se han destacado en el ámbito del almacenamiento de energía y la captura de CO₂, contribuyendo significativamente a resolver la crisis energética y abordar preocupaciones medioambientales [42].

La versatilidad y utilidad de estos alótropos de carbono radican en sus propiedades físicas y químicas sobresalientes [42]. La sólida resistencia mecánica, la estabilidad química excepcional, la elevada área superficial y la presencia de numerosos grupos funcionales hacen de estos materiales opciones prometedoras para diversas aplicaciones [42]. Además, el proceso de obtención de carbón activado a partir de diversos tipos de residuos sólidos, como desechos domésticos, municipales e industriales, mediante métodos de activación como procesos físicos, químicos, fisicoquímicos y de microondas, demuestra la viabilidad de aprovechar recursos disponibles para fines beneficiosos [42].

Los materiales carbonáceos se erigen como activos invaluableles en el ámbito del almacenamiento de energía, ofreciendo una multitud de ventajas [42]. Los carbones activados, el grafeno y los nanotubos de carbono destacan como actores clave, mostrando un rendimiento excepcional tanto en la mitigación de la crisis energética como en la abordación de preocupaciones ambientales [42]. Sus características distintivas, como notables áreas de superficie, conductividad eléctrica superior y sólida resistencia mecánica, los convierten en contribuyentes fundamentales para abordar ambos desafíos [42].

Dentro del ámbito del almacenamiento de energía, los materiales basados en carbono toman protagonismo, principalmente debido a su rentabilidad, disponibilidad abundante y atributos respetuosos con el medio ambiente [42]. Los carbones activados, el grafeno y los nanotubos de carbono sobresalen como opciones altamente efectivas para supercondensadores, gracias a su sustancial área de superficie específica y excepcional conductividad eléctrica, lo que los hace versátiles para una amplia gama de aplicaciones de almacenamiento de energía [42].

Las propiedades de estos materiales, influenciadas intrínsecamente por su tamaño y características superficiales, desempeñan un papel crucial en la mejora de las actuaciones de conversión y almacenamiento de energía [42]. Los carbones activados, en particular, son objeto de una exploración extensa por su potencial como electrodos en supercondensadores de alta calidad, capitalizando sus sustanciales áreas de superficie y poros en la superficie superior [42]. En resumen, la utilización

de materiales carbonáceos en el almacenamiento de energía no solo resulta rentable, sino que también ofrece ventajas significativas, que incluyen áreas de superficie sustanciales, excelente conductividad eléctrica y un impacto ambiental favorable [42].

1.8. ¿QUÉ MÉTODOS SE PUEDEN USAR PARA CARACTERIZAR LOS MATERIALES CARBONÁCEOS?

La caracterización de materiales carbonáceos implica la utilización de diversas técnicas analíticas altamente especializadas para llevar a cabo una evaluación y descripción detallada de sus propiedades. Entre los métodos destacados se encuentran la espectroscopía Raman, la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) [43].

La espectroscopía Raman se destaca por su capacidad para proporcionar información detallada sobre las vibraciones moleculares y la estructura cristalina de los materiales carbonáceos. Al incidir luz láser sobre el material, se obtiene un espectro Raman que revela las frecuencias de vibración características, permitiendo una identificación precisa de los enlaces químicos y la composición molecular [43].

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se centra en las vibraciones moleculares asociadas con los enlaces químicos [43]. Este método ofrece una visión detallada de la composición química de los materiales carbonáceos, permitiendo la identificación de grupos funcionales específicos y proporcionando información valiosa sobre la funcionalidad química del material [43].

La microscopía electrónica de transmisión (TEM) es esencial para la caracterización morfológica a nivel nanométrico [43]. Permite la observación directa de la estructura interna de los materiales carbonáceos, revelando detalles sobre la distribución de partículas, la porosidad y la uniformidad estructural [43].

La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) ofrece información sobre la composición elemental de la superficie de los materiales carbonáceos [43]. Mediante el bombardeo de iones primarios, se generan iones secundarios que se analizan para determinar la presencia y la abundancia de elementos en la superficie del material [43].

Estas técnicas analíticas, utilizadas en conjunto, proporcionan una panorámica integral de las propiedades estructurales, químicas y morfológicas de los materiales carbonáceos. Esta aproximación exhaustiva es crucial para desentrañar las complejidades inherentes a estos materiales y maximizar su aplicación en diversas disciplinas científicas y tecnológicas [43]. La combinación de estos métodos permite a los investigadores obtener una comprensión profunda y precisa de las características intrínsecas de los materiales carbonáceos, facilitando su optimización y aplicación en campos que van desde la nanotecnología hasta la catálisis y más allá [43].

Existen otros métodos como el análisis termogravimétrico (TGA) y el análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC), que permiten comprender el comportamiento de la composición de los materiales.

1.8.1. ESPECTROSCOPIA RAMAN

La espectroscopía Raman emerge como una herramienta clave en este proceso, proporcionando información única sobre la vibración molecular y la estructura cristalina de los materiales carbonáceos [44]. Este enfoque no invasivo emerge como una herramienta esencial al proporcionar una rica fuente de información sobre la estructura, calidad y propiedades físicas inherentes a los materiales carbonáceos [44, 45]. La aplicación de técnicas de dispersión Raman en este contexto revela su capacidad para desentrañar la relación entre enlaces sp^2 y sp^3 en nanomateriales de carbono, un aspecto crítico que influye directamente en sus propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas [44].

La versatilidad de la espectroscopía Raman se extiende a la electroquímica, donde ha desempeñado un papel fundamental en la investigación de nanotubos de carbono. Su aplicación se evidencia en la exploración de la absorción óptica en diversas soluciones electrolíticas y en el análisis de la funcionalización química de nanotubos de carbono [45, 46]. Un aspecto adicional de su utilidad radica en su capacidad para caracterizar materiales bidimensionales sintetizados sobre sustratos metálicos, donde la mejora de la intensidad Raman se logra mediante el uso estratégico de películas de nitruro de boro [45, 46].

1.8.2. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Por otro lado, la aplicación de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) emerge como una herramienta esencial en el análisis detallado de materiales carbonáceos. Esta técnica avanzada ofrece una profunda comprensión de las características químicas de estos materiales al identificar las vibraciones moleculares asociadas con sus enlaces [47]. La espectroscopía FTIR se basa en la interacción de la radiación infrarroja con las moléculas de un material. Cuando la radiación infrarroja incide sobre un material carbonáceo, las moléculas absorben la energía en modos vibracionales específicos. La FTIR registra estas absorciones, generando un espectro que revela información detallada sobre la composición química y la estructura molecular del material en cuestión [47].

Uno de los aspectos cruciales de la espectroscopía FTIR aplicada a materiales carbonáceos es su capacidad para identificar enlaces específicos presentes en la estructura molecular [47, 48]. Por ejemplo, puede discernir entre enlaces carbono-carbono, carbono-oxígeno y carbono-nitrógeno, proporcionando una visión detallada de la funcionalidad química presente en el material [47, 48]. En el caso de materiales carbonáceos obtenidos mediante síntesis asistida por microondas, la espectroscopía FTIR puede destacar la presencia de grupos funcionales específicos que han surgido durante la reacción química inducida por las microondas [47]. Esto no sólo valida la eficacia de la síntesis, sino que también permite una comprensión más profunda de los cambios moleculares que han ocurrido durante el proceso [47, 48].

Además, la espectroscopía FTIR brinda información sobre la presencia de impurezas o residuos que podrían afectar las propiedades finales de los materiales carbonáceos. La capacidad de detectar y cuantificar estas impurezas es esencial para garantizar la pureza y calidad del producto final [47, 48]. En

términos de aplicaciones prácticas, la espectroscopía FTIR en materiales carbonáceos encuentra relevancia en una variedad de campos, desde la nanotecnología hasta la catálisis [47, 48]. Por ejemplo, en la nanotecnología, el análisis detallado de la estructura molecular puede guiar la modificación precisa de propiedades para aplicaciones específicas, como la mejora de la conductividad eléctrica en nanomateriales carbonáceos [47, 48].

1.8.3. ESPECTROMETRÍA DE MASAS DE IONES SECUNDARIOS (SIMS)

La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) agrega otra dimensión a la caracterización de los materiales carbonáceos al facilitar la identificación de elementos específicos y la determinación de su distribución espacial en la muestra [49]. Esta técnica analítica avanzada ha revolucionado el análisis de superficies y la caracterización de materiales [49]. El SIMS es capaz de proporcionar información detallada sobre la composición química, elemental e isotópica de áreas localizadas de un objetivo sólido, lo que la hace invaluable en una amplia gama de aplicaciones científicas y tecnológicas [50].

Una de las aplicaciones clave de SIMS es en el análisis de superficies, donde se ha utilizado para estudiar desde nanopartículas poliméricas hasta minerales y materiales geológicos. Por ejemplo, se ha aplicado para cuantificar la distribución del tamaño de partículas en nanopartículas poliméricas, proporcionando una correlación precisa entre los tamaños medidos por SIMS y otras técnicas como la dispersión dinámica de luz [51]. Además, SIMS ha sido fundamental en el estudio de minerales, permitiendo observar la morfología y composición química de minerales como dolomita, calcita y goethita [52].

En el campo de la electroquímica, SIMS se ha combinado con técnicas de microscopía para la creación y análisis a escala atómica de nanoestructuras, como en el caso de la electrodeposición de nanopartículas de platino (Pt) [53]. Además, se ha demostrado la utilidad de SIMS en estudios paleotermométricos, como en el análisis de isótopos de oxígeno en apatito de conodontes del Ordovícico, proporcionando información valiosa sobre las temperaturas oceánicas pasadas [53]. Estos estudios destacan la importancia de SIMS como una herramienta esencial para la investigación y el desarrollo de materiales avanzados [53].

1.8.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (TEM)

La aplicación de la microscopía electrónica de transmisión (TEM) constituye un paso esencial en la caracterización, permitiendo la observación a nivel nanométrico de la morfología y la estructura de los materiales [54]. Esta técnica ofrece una visión detallada de la disposición y la interacción de los componentes a una escala microscópica [54]. Por ejemplo, se ha utilizado TEM para cuantificar la distribución del tamaño de partículas de nanopartículas poliméricas, proporcionando una correlación precisa entre los tamaños

medidos por TEM y por dispersión dinámica de luz (DLS) [54]. Además, TEM ha sido fundamental en el estudio de minerales, permitiendo observar la morfología y composición química de minerales como dolomita, calcita y goethita [55]. En el campo de la electroquímica, TEM se ha combinado con microscopía electroquímica de células de barrido para la creación y análisis a escala atómica de nanoestructuras, como en el caso de la electrodeposición de nanopartículas de Pt [56]. Además, se ha demostrado el crecimiento de nanocables de Ge en agua a temperatura ambiente dentro de un soporte de microscopía electrónica de transmisión líquida, proporcionando información valiosa sobre los procesos de nucleación y crecimiento de nanocables [57]. Estos estudios destacan la importancia de TEM como una herramienta esencial para la investigación y el desarrollo de materiales avanzados [57].

1.8.5. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica analítica esencial en la caracterización de materiales, especialmente útil para estudiar la estabilidad térmica y la composición de diversos compuestos [58]. TGA mide la pérdida de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo bajo un ambiente controlado. Esta técnica es ampliamente utilizada en la investigación y desarrollo de materiales, incluyendo polímeros, compuestos inorgánicos, nanomateriales y biomasa [58].

Una aplicación significativa de TGA es en la evaluación de la pirólisis de biomasa para la producción de bioenergía y biocombustibles. Proporciona información valiosa sobre las características térmicas de diferentes tipos de biomasa, lo que es crucial para optimizar los procesos de conversión térmica [59]. Además, se ha empleado para caracterizar materiales de grafeno, donde se estudia la influencia del tamaño de partícula y la presencia de grupos oxigenados en las propiedades térmicas del grafeno, óxido de grafeno y grafito [60].

En el campo de los nanomateriales, se utiliza para investigar la estabilidad térmica y las propiedades termodinámicas de nanopartículas de óxidos metálicos. Estos estudios son fundamentales para comprender la composición y las impurezas de los nanomateriales, así como para calcular parámetros cinéticos y termodinámicos como la energía de activación y la entalpía [61]. Además, ha demostrado ser una herramienta valiosa en la lucha contra los materiales de grafeno falsificados, permitiendo la caracterización y el control de calidad de los materiales de grafeno fabricados industrialmente [61].

1.8.6. ANÁLISIS POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

El análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica analítica fundamental en la caracterización de materiales, utilizada para medir las transiciones de fase y las propiedades térmicas de una amplia gama de sustancias [62]. DSC mide la diferencia en la cantidad de energía absorbida o liberada por una muestra en comparación con un estándar de

referencia, como función de la temperatura o el tiempo. Esta técnica es ampliamente utilizada en campos como la química de polímeros, la farmacología, la investigación de alimentos y la ciencia de materiales [62].

Una aplicación importante es en el estudio de microplásticos en aguas residuales y otros entornos ambientales [63]. Esta técnica ha demostrado ser una herramienta eficaz para identificar y cuantificar microplásticos, como polietileno (PE), poliestireno (PS), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET), en muestras ambientales [63]. Además, se utiliza en la industria alimentaria y farmacéutica para estudiar transiciones de fase y propiedades térmicas de alimentos y fármacos, lo que es crucial para el desarrollo de nuevos productos y la mejora de los existentes [64].

En el campo de los materiales amorfos y las aleaciones metálicas, DSC es una herramienta esencial para investigar la relajación estructural, la temperatura de Curie, la temperatura de transición vítrea, la cristalización, la separación de fases y la cinética de transformaciones microestructurales inducidas por tratamiento térmico [65]. Además, el análisis por calorimetría diferencial de barrido ha demostrado ser una técnica valiosa para la cuantificación rápida y precisa de microplásticos semicristalinos en matrices ambientales, mejorando la detección y la precisión en la cuantificación de estos contaminantes [65].

1.9. USO DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES PARA LA SÍNTESIS DE MATERIALES CARBONÁCEOS

La utilización de residuos agroindustriales para la síntesis de materiales carbonáceos, como el carbón activado, presenta una innovadora vía para abordar desafíos ambientales y mejorar la calidad de vida en diversas comunidades [66]. Un estudio significativo destacó la viabilidad de este enfoque al demostrar la síntesis exitosa de carbón activado a partir de residuos agrícolas mediante un método sencillo y eficiente [66].

En este estudio, se seleccionaron precursores abundantes y ricos en carbono, como la cáscara de arroz, la mazorca de maíz y la paja de trigo, para la producción de carbón activado [66, 67]. Estos materiales, comúnmente desechados en la agroindustria, se revelaron como fuentes valiosas para la generación de un recurso útil y versátil como el carbón activado [66, 67, 68]. El método empleado para la activación química con NaCl añade un componente de simplicidad y rentabilidad al proceso, lo que subraya la viabilidad de su implementación a mayor escala [66, 67, 68].

La caracterización detallada del carbón activado sintetizado a través de diversas técnicas analíticas, como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) y el análisis de área superficial por Brunauer-Emmett-Teller (BET), proporciona una comprensión profunda de sus propiedades estructurales y químicas [68]. Estas técnicas ofrecen una visión detallada de la morfología, la composición y la superficie del carbón activado, respaldando así la evaluación de su idoneidad para aplicaciones específicas [68].

Los experimentos de adsorción realizados, utilizando azul de metileno como modelo de contaminante, revelaron la alta capacidad de adsorción del carbón activado sintetizado [68]. La investigación detallada sobre los efectos del tiempo de contacto, la cantidad de adsorbente y el pH de la solución en el proceso de adsorción destaca la versatilidad y la adaptabilidad de este material en diversas condiciones [68].

Los resultados obtenidos indican que el carbón activado derivado de residuos agroindustriales podría representar una alternativa eficaz y asequible al carbón activado comercial para la purificación del agua y otras aplicaciones de adsorción. Este enfoque, además de ofrecer beneficios medioambientales al reciclar residuos, tiene el potencial de mejorar significativamente la calidad de vida en áreas rurales y remotas, donde el acceso a agua potable segura es limitado [66, 68]. La implementación de este método sencillo y económico podría tener un impacto positivo, proporcionando soluciones prácticas y sostenibles para desafíos críticos en comunidades vulnerables [68, 69].

1.10. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El coco es un fruto tipo drupa con una estructura dividida en epicarpio, mesocarpio y endocarpio, cada una compuesta principalmente de fibras de celulosa y lignina que le dan su dureza y resistencia [70]. Estos componentes en el sector alimentario y comercial se convierten en desechos, los cuales pueden ser aprovechados para diversos fines, tales como la creación de artesanías, utensilios, herramientas, sustratos y síntesis de compuestos [70]. De acuerdo con los datos proporcionados por la FAOSTAT, la producción mundial de coco alcanzó la considerable cifra de 63.6 millones de toneladas en 2021, generando así un notable volumen de desechos agroindustriales. Esta abundancia de biomasa residual, como las conchas de coco, representa una oportunidad para contribuir a la sostenibilidad y la economía circular [71]. En el ámbito nacional, durante el año 2022, la producción de coco en [nombre del país] alcanzó las 153,832 toneladas, consolidándose como un sector económico destacado, especialmente en la región del Caribe colombiano [71].

No obstante, la gestión adecuada de los residuos vegetales, en particular las conchas generadas tras el consumo del endospermo de las semillas de coco, plantea un desafío ambiental [70]. Aquí es donde se abre una ventana de oportunidad para aplicar tratamientos innovadores, aprovechando la capacidad inherente de los desechos agroindustriales para ser reutilizados en diversos procesos [72].

Sin embargo, la realización de este tipo de estudios requiere del uso de técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC), ya que por medio de estos procesos analíticos se revelan componentes esenciales para el estudio exhaustivo de los materiales en cuestión, contribuyendo así al avance del conocimiento en el campo de la investigación científica y tecnológica [73].

Desde esta perspectiva, el presente estudio busca ofrecer una solución integral para la disposición final de la biomasa del endocarpio de las semillas de coco. Se propone la síntesis de

materiales a base de carbono, como el grafito o el óxido de grafeno, mediante métodos respetuosos con el medio ambiente. Este enfoque no solo busca transformar los residuos en materiales valiosos, sino también garantizar que el proceso de producción minimice la generación de contaminantes. La clave radica en la implementación de un control riguroso y la sistematización precisa de los procesos de extracción, garantizando así una producción eficiente y sostenible.

Estos materiales no solo destacan por su rentabilidad, biodegradabilidad, amigabilidad con el medio ambiente y su condición no tóxica, sino que estas características los perfilan como opciones ideales para técnicas de preparación de muestras verdes [4]. Métodos como la extracción en fase sólida y la extracción magnética en fase sólida encuentran en estos materiales no sólo eficacia sino también una alineación con principios sostenibles, subrayando así su relevancia en la promoción de prácticas respetuosas con el entorno en los procesos de laboratorio [4].

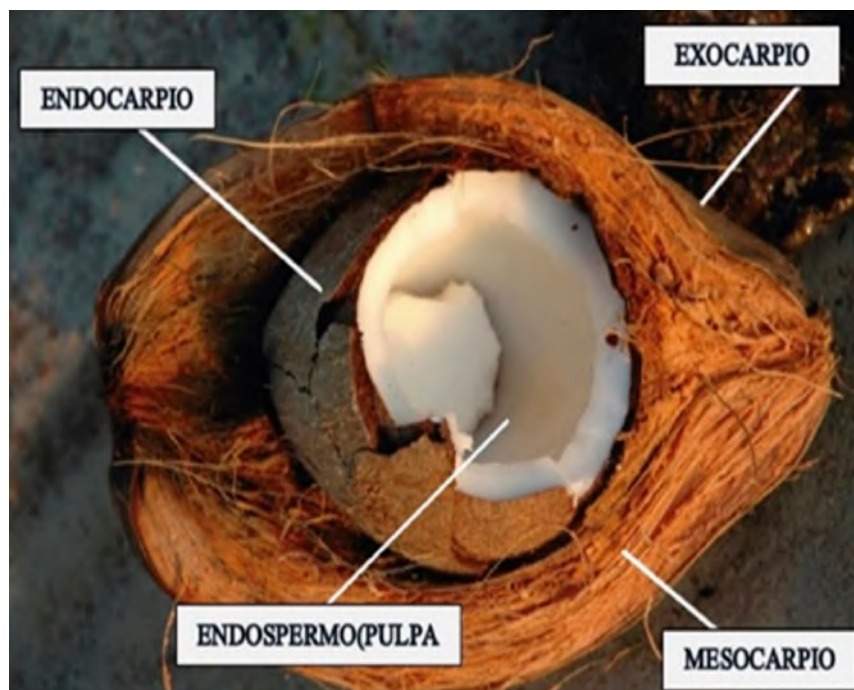
En última instancia, este estudio no solo aborda el problema de gestión de residuos, sino que también representa una contribución significativa a la creciente demanda de materiales carbonosos sostenibles. La síntesis de materiales carbonáceos a partir de desechos de coco se presenta como una alternativa atractiva, alineada con los principios de la economía circular y la responsabilidad ambiental. En este orden de ideas, esta investigación pretende estandarizar la producción de biocarbón por medio de la maximización de los parámetros de rendimiento y la correlación con una muestra estándar de grafito comercial.

2. METODOLOGÍA

2.1. RECOLECCIÓN DE BIOMASA DE ENDOCARPIO DE LA SEMILLA DE COCO

En el transcurso de esta investigación, se llevó a cabo un minucioso proceso de recolección de cáscaras de coco, meticulosamente diferenciando entre el mesocarpio, que constituye la cáscara intermedia fibrosa, y el endocarpio, caracterizado por corresponder a la capa más interna de la semilla con mayor dureza y que recubre al endospermo (figura1).

Figura 1. Partes de la semilla la semilla de cocotero



Fuente: Tomada de Quintero, Nieto, Marín, & Canto (2023)

2.2. PROCEDIMIENTO

Se seleccionó con precisión un total de 1 kg de endocarpio de cáscara de coco, el cual experimentó un proceso de secado a temperatura ambiente durante un día completo. Posteriormente, se procedió a triturar este material hasta alcanzar fragmentos con dimensiones aproximadas de 1 mm (figura 2).

Figura 2. Endocarpio de la semilla de cocotero triturado

Fuente: Completamente generada por los autores, 2023

En la siguiente fase experimental, se tomaron 40 g del residuo de coco proveniente de las muestras previamente trituradas y se colocaron estratégicamente en crisoles de porcelana de 70 mL. Estos crisoles fueron sometidos a un proceso de calentamiento en una mufla Terrígeno MM 10, donde se variaron las temperaturas de incineración en un rango que abarcó desde 300 hasta 1000°C, y los tiempos de exposición al calor oscilaron entre 3, 5, 7 y 10 horas. Cada muestra incinerada fue objeto de una meticulosa pesada en una balanza analítica, permitiendo así calcular con precisión el porcentaje de rendimiento de dicho proceso.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE BIOCARBÓN

En una fase posterior de la investigación, las muestras incineradas fueron sometidas a un análisis más profundo mediante la aplicación de la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La comparación de los espectros obtenidos se llevó a cabo en base a una muestra estándar comercial de grafito (Graphite of Merck), con el propósito de determinar la correlación o similitud entre ambos compuestos, brindando así una perspicacia más detallada sobre las complejidades de sus estructuras orgánicas.

En el contexto de la investigación, se llevó a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) y análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) utilizando un avanzado analizador térmico simultáneo STA 6000. Este análisis se realizó en un amplio rango de temperatura, específicamente desde 25 °C hasta 1200 °C, con una velocidad de rampa de 10 °C/min en una atmósfera controlada de nitrógeno (N₂). Este enfoque experimental permitió realizar un seguimiento detallado de la pérdida de masa del endocarpio de la semilla de coco en relación con la temperatura a la que fue sometido. De esta manera, se logró obtener una visión integral de las propiedades térmicas de las muestras analizadas, proporcionando datos fundamentales para la comprensión de su comportamiento bajo condiciones específicas.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y OPTIMIZACIÓN

Adicionalmente, con el objetivo de dotar a los resultados de un rigor científico, se aplicó un análisis estadístico mediante el método de superficie de respuesta (MSR), con un intervalo de confianza del 95% y un margen de error del 5%. Este enfoque estadístico, implementado utilizando el software Minitab v.19.1, proporcionó una evaluación más robusta y precisa de los resultados, consolidando de manera efectiva las conclusiones derivadas de este estudio que permite la comprensión de las propiedades termoquímicas de las cáscaras de coco.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tonalidades de las muestras obtenidas luego de la incineración fueron principalmente oscuras, con leves coloraciones claras debido a las cenizas resultantes del calentamiento (figura 3), esto sugiere una completa carbonización, mientras que dicha tonalidad puede indicar una estructura más amorfa del carbón, típica de temperaturas más altas y tiempos moderados [4, 37].

Tras el macerado y tamizado, la mayoría de las muestras se tornaron completamente oscuras (figura 4), con excepción de las muestras que fueron expuestas durante 10 h a temperaturas de 800 y 1000°C que presentaron tonalidades grisáceas, diferenciándose del resto, esto puede deberse a alta cantidad de óxido de silicio presente en dichas muestras, lo cual propone una alteración en la estructura del material, probablemente indicando una transición hacia una fase más cristalina del carbón [4, 37].

Por otro lado, las conchas de coco sometidas a 300°C fueron las que presentaron tonalidades marrones, lo que indica que indica una carbonización incompleta (figura 5), y, por tanto, poseer mariales orgánicos con propiedades diferentes [4, 37].

Figura 4. Biocarbón macerado y tamizado



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023

Figura 3. Endocarpio de semilla de cocotero carbonizado a temperaturas mayores de 300°C



Fuente: Elaboración propia, (2023)

Figura 5. Endocarpio de semilla de cocotero carbonizado a una temperatura de 300°C



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023

Se presentan los %R tras la incineración de cada una de las muestras variando tiempo y temperatura (tabla 1). En este caso se denota que, bajo un tiempo de 3 h y temperaturas de 400°C, se obtienen porcentajes de rendimiento más altos en comparación con los de las demás variaciones (22% aproximadamente), teniendo como base que la muestra se tornó completamente oscura luego de la incineración y el tamizado. La eficiencia en esta condición puede ser atribuida a una adecuada carbonización sin pérdida excesiva de masa, pero con presencia de materiales orgánicos evidenciados en las pruebas FTIR. Sin embargo, a temperaturas de 300°C y 3 h de exposición, se alcanzan %R de hasta 27% aproximadamente, pero debido a su coloración resultan no ser significativos. Por su parte, temperaturas de 1000 y 800°C durante largos tiempo de exposición (7 y 10 h exactamente), presentaron %R por debajo del 1 para el rendimiento determinado tras la incineración, obteniéndose masas por debajo de 0.5 g, lo cual es muy bajo teniendo en cuenta que la muestra inicial fue de 40 g, a excepción de la muestra que estuvo a 800°C durante 7 horas, la cual tuvo un %R>1, y aproximadamente 2 g de masa, lo que facilitó dilucidar su espectro FTIR, a diferencia de las otras muestras expuestas a condiciones similares (tabla 2). Esto podría indicar que largos tiempos de incineración no son óptimos a la hora de obtener altos valores de rendimiento, y por ende recuperar la mayor cantidad posible de biocarbón, sino que se debería procurar usar tiempos moderados como los de 4 h o menos.

Tabla 1. Rendimiento obtenido a partir de la carbonización del endocarpio de coco variando temperatura y tiempo

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (H)			
	3	5	7	10
300	27.3	25.9	22.5	20.7
400	21.8	20.2	15.5	10.3
600	18.1	13.0	9.2	6.4
800	13.6	8.6	4.6	0.6
1000	12.0	2.6	0.1	0.0

Los resultados están expresados en porcentaje (%).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Índices de correlación para cada ensayo luego de carbonización y tamizado con respecto a muestra de grafito comercial

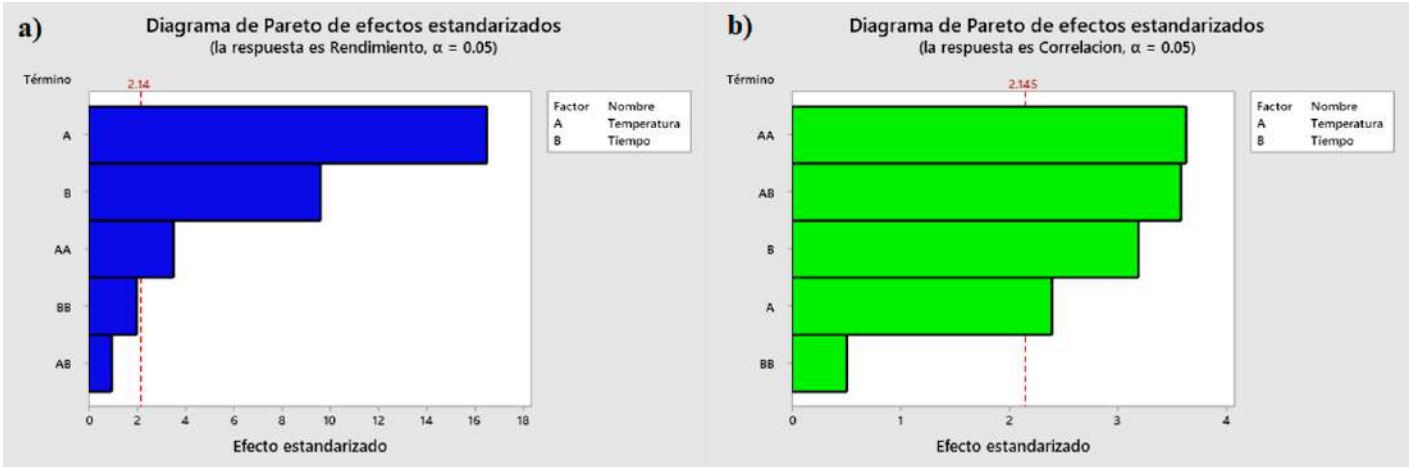
TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (H)			
	3	5	7	10
300	0.1778	0.1398	0.13	0.1598
400	0.1892	0.1507	0.1928	0.1909
600	0.3473	0.5036	0.4988	0.4563
800	0.6229	0.6418	0.5942	0.1547
1000	0.6214	0.5684	0	0

Los resultados corresponden a índices de correlación calculados con base en el software Spectrum IR.

Fuente: Elaboración propia

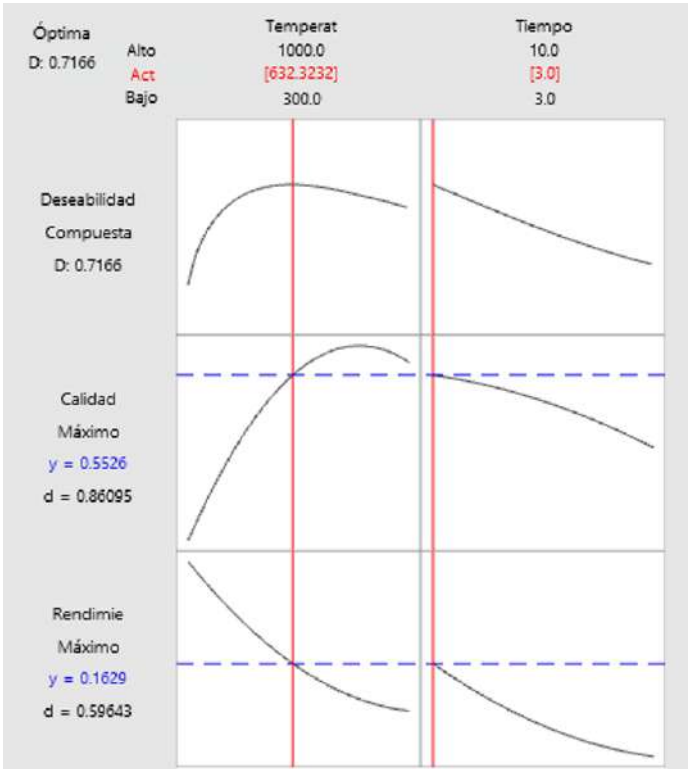
En cuanto al análisis estadístico por medio de un diseño de superficie de respuesta, se encontró que cada uno de los parámetros (temperatura y tiempo) fue significativo y por tanto influencia el porcentaje de rendimiento y la calidad para la cantidad de grafito obtenido. De acuerdo con el diagrama de Pareto de efecto estandarizado para las variables analizadas, se denota que ambas sobrepasan el límite crítico de significancia (figura 6a y 6b). Por su parte, el gráfico de optimización denota que la maximización de las variables respuestas de rendimiento y la correlación respecto a la muestra estándar comercial, el biocarbón presentó un resultado óptimo con un porcentaje de rendimiento de 16.29% y un índice de similitud de 0.5526 (figura 7), los cuales son resultados cruciales para las aplicaciones industriales, donde la eficiencia en la producción y la calidad del producto son igualmente importantes [6, 58]. En cuanto a la caracterización del endocarpio de coco realiza aplicando el análisis termogravimétrico (TGA) y el análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC), se pudo evidenciar que a una temperatura de 800°C la biomasa experimenta un cambio en el flujo de calor que tras exponer la muestra a temperatura ambiente ocasiona que esta se humedezca con facilidad (figura 8).

Figura 6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para análisis de superficie de respuesta en parámetros (a) rendimiento y (b) correlación con muestra estándar comercial (calidad) con base en las variables predictoras temperatura y tiempo.



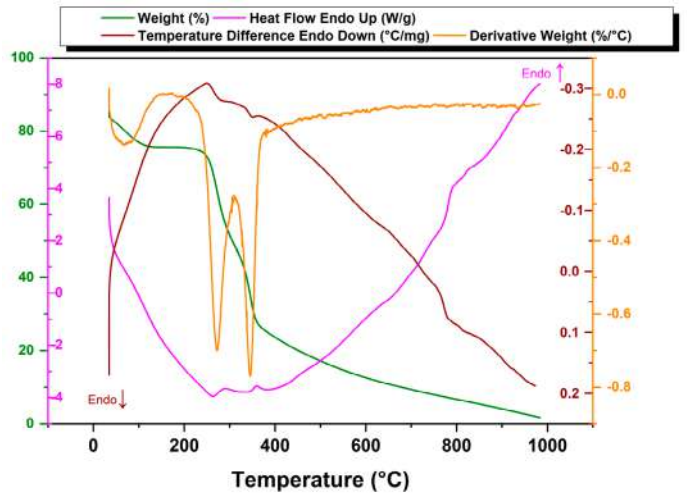
Fuente: Completamente generada por los autores, 2023

Figura 7. Gráfico de optimización para respuestas rendimiento y correlación con muestra estándar comercial (calidad) con base en las variables predictoras temperatura y tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Termograma de descomposición del endocarpio de la semilla de cocotero obtenido por TGA/DSC



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023

4. CONCLUSIÓN

Este estudio ofrece una alternativa para la disposición final del residuo de las semillas de los cocoteros. Además, la temperatura y el tiempo influyen significativamente el rendimiento y la correlación para la síntesis de biocarbón a base de residuos agroindustriales de endocarpio de coco. El análisis de superficie de respuesta y la maximización del mismo arrojan que la temperatura y el tiempo óptimos para extraer este material es de 632°C y 3 h, respectivamente.



REFERENCIAS



- [1] López-Salas, N., & Antonietti, M. (2021). Carbonaceous materials: The beauty of simplicity. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 94(12), 2822-2828. Obtention of: <https://www.journal.csj.jp/doi/full/10.1246/bcsj.20210264>
- [2] Tascon, J., JC, R. L., & Oliveira, E. (2007). Carbon materials: their structures and types. *Opt. Pura Apl*, 40, 149-159. Obtention of: <https://core.ac.uk/display/36016242?source=2>
- [3] Rodríguez-Reinoso, F., & Sepúlveda-Escribano, A. (2001). Porous carbons in adsorption and catalysis. *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*, 309–355. doi:10.1016/b978-012513910-6/50066-9
- [4] Keçili, R., & Hussain, C. M. (2023). Carbonaceous Materials in Green Sample Preparation. *Green Sample Preparation Techniques: Concepts, Novel Materials and Solvents, and Applications*, 75, 105.
- [5] Sulistya, E., Hui-Hui, L., Attenborough, N. K., Pourshahrestani, S., Kadri, N. A., Zeimaran, E., Razak, N. A., Amini Horri, B., & Salamatinia, B. (2020). Hydrothermal synthesis of carbon microspheres from sucrose with citric acid as a catalyst: Physicochemical and structural properties. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1-10.
- [6] Pacuła, A., Drelinkiewicz, A., Ruggiero-Mikołajczyk, M., Pietrzyk, P., Socha, R., Krzan, M., Nattich-Rak, M., Duraczyńska, D., Bielanska, E., & Zimowska, M. (2022). N-doped carbon materials produced by CVD with the compounds derived from LDHs. *Journal of Materials Science*, 57, 1-15.
- [7] Bui Thanh Son, N. V. Long, & Nguyen Thi Nhat Hang. (2021). The development of biomass-derived carbon-based photocatalysts for the visible-light-driven photodegradation of pollutants: A comprehensive review. *RSC Advances*, 11(51), 32158-32176.
- [8] Kruczała, K. (2022). (Invited) Oxygen Reduction Reaction in Alkaline Media: The Effect of Carbon Support Crystallinity, Conductivity, and Doping. *Meeting Abstracts*, 2022(14), 2065.
- [9] Phiri, J., Ahadian, H., Sandberg, M., Granström, K., & Maloney, T. (2023). The Influence of Physical Mixing and Impregnation on the Physicochemical Properties of Pine Wood Activated Carbon Produced by One-Step ZnCl₂ Activation. *Micromachines*, 14(3), 572.
- [10] Pam, A. A., Abdullah, A. H., Tan, Y. P., & Zainal, Z. (2022). Physicochemical properties of porous activated carbon prepared from palm kernel shell through a low-cost activation protocol. *South African Journal of Science*, 118(9/10). <https://doi.org/10.17159/sajs.2022/13497>
- [11] Kyu Back, J., Ryu, J., Park, Y. H., Kim, I. J., & Yang, S. (2023). Effect of Carbon Fiber Layer on Electrochemical Properties of Activated Carbon Electrode. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 14(2), 184-193.
- [12] Mohammad, Hasanzadeh, Mofrad., Rami, Melhem., Yousuf, Ahmad., Mohammad, Hammoud. (2020). Graphite: a NUMA-aware HPC system for graph analytics based on a new MPI * X parallelism model. doi: 10.14778/3380750.3380751
- [13] Ezhumalai, Y., Kumaresan, P., & Jayapalan, T. (2023). Graphite Carbon Nitride. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.104976
- [14] Fares Ali Al-Sairafi, Chaohua Jiang, Zhihui Zhong & Bassiouny Saleh (2022) Study on purification of flake graphite by heat activation and hydrofluoric acid, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8:4, 4564-4578, DOI: 10.1080/2374068X.2022.2079172
- [15] Kurpaska, L., Frelek-Kozak, M., Wilczopolska, M., Bonicki, W., Diduszko, R., Zaborowska, A., ... & Jagielski, J. (2020). Structural and mechanical properties of different types of graphite used in nuclear applications. *Journal of Molecular Structure*, 1217, 128370.
- [16] Pustahija, L., & Kern, W. (2023). Surface Functionalization of (Pyrolytic) Carbon—An Overview. *C*, 9(2), 38.



REFERENCIAS



- [17] Kan, Y., Zheng, F., & Zhang, R. (2021). Comparative study of pyrolytic carbons prepared from printed circuit boards by magnetic and electrostatic separation. *RSC advances*, 11(53), 33490-33499.
- [18] Chen, L., Li, Y., Liu, C., Guo, F., Wu, X., Zhou, P., ... & Zhou, J. (2023). Fluorinated saccharide-derived hard carbon as a cathode material of lithium primary batteries: effect of the polymerization degree of the starting saccharide. *RSC advances*, 13(22), 14797-14807.
- [19] Paredes, G., Seine, G., Cours, R., Houdellier, F., Allouche, H., Ondarçuhu, T., ... & Monthieux, M. (2020). Synthesis and (some) applications of carbon-nanotube-supported pyrolytic carbon nanocones. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27, 1091-1094.
- [20] Andrade Guel, M. L., López López, L. I., & Sáenz Galindo, A. (2012). Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 43(3), 9-18.
- [21] Ajayan, P. M., & Zhou, O. Z. (2001). Applications of carbon nanotubes. *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications*, 391-425.
- [22] Chatterjee, A., & Deopura, B. L. (2002). Carbon nanotubes and nanofibre: an overview. *Fibers and Polymers*, 3, 134-139.
- [23] Popov, V. N. (2004). Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43(3), 61-102.
- [24] Ibrahim, K. S. (2013). Carbon nanotubes? properties and applications: A review. *Carbon letters*, 14(3), 131-144.
- [25] Popov, V. N. (2004). Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43(3), 61-102.
- [26] Medrano, M. G. M., Rosu, H. C., & González, L. T. (2012). Grafeno: el alótropo más prometedor del carbono. *Acta Universitaria*, 22(3), 20-23.
- [27] Torres-Silva, H., & López-Bonilla, J. L. (2011). Aspectos quirales del grafeno. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(1), 67-75
- Neto, A. C., Guinea, F., Peres, N. M., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), 109.
- [28] Vandenbroucke, M., Largeau, C., (2007). Kerogen origin, evolution and structure. *Organic Geochemistry* 38, 719e833
- [29] Van Zuilen, M. A. (2019). The Significance of Carbonaceous Matter to Understanding Life Processes on Early Earth. *Earth's Oldest Rocks*, 945–963. doi:10.1016/b978-0-444-63901-1.00038-1
- [30] De Gregorio, B.T., Sharp, T.G., Flynn, G.J., Wirick, S., Hervig, R.L., (2009). Biogenic origin for Earth's oldest putative microfossils. *Geology* 37, 631e634
- [31] Wang, Z., Jin, K. W. M., & Melvin, G. J. H. (2020). Carbon materials from various sources for composite materials. *Composite Materials: Applications in Engineering, Biomedicine and Food Science*, 3-33.
- [32] Sheoran, K., Thakur, V. K., & Siwal, S. S. (2022). Synthesis and overview of carbon-based materials for high performance energy storage application: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 9-17.
- [33] Kumar, P. (2021). Synthesis Methods for Carbon-Based Materials. In: Tyagi, A.K., Ningthoujam, R.S. (eds) *Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials*. Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1892-5_10



REFERENCIAS



- [34] Chen, W.-K., Zhong, Y., Fu, G., Lai, W.-C., Pan, Z., Yang, Y., Chen, F., & Yan, H. (2022). Microwave-Assisted Synthesis of Luminescent Carbonaceous Nanoparticles as Silkworm Feed for Fabricating Fluorescent Silkworm Silk. *Coatings*, 13(1), 31.
- [35] Gürünlü, B., & Bayramoğlu, M. (2020). Investigation of alternative techniques for graphene synthesis. In *Novel Nanomaterials*. IntechOpen.
- [36] Kumar, A., Srivastav, S. K., Singh, K. K., & Singh, S. P. (2021). Titanium oxide composites with graphene and laser-induced graphene for the environmental applications. *Nanomaterials and nanocomposites for environmental remediation*, 27-58.
- [37] Krishnamoorthy, H., Ramyea, R., Maruthu, A., Kandasamy, K., Michalska, M., & Kandasamy, S. (2022). Synthesis methods of carbonaceous materials from different bio-wastes as electrodes for supercapacitor and its electrochemistry - A review. *Biomass and Bioenergy*, 161, 101187.
- [38] Chen, W.-K., Zhong, Y., Fu, G., Lai, W.-C., Pan, Z., Yang, Y., Chen, F., & Yan, H. (2022). Microwave-Assisted Synthesis of Luminescent Carbonaceous Nanoparticles as Silkworm Feed for Fabricating Fluorescent Silkworm Silk. *Coatings*, 13(1), 31.
- [39] Zhang, Y., Li, B., Guan, W., Wei, Y., Yan, C., Meng, M., Pan, J., & Yan, Y. (2020). One-pot synthesis of HMF from carbohydrates over acid-base bi-functional carbonaceous catalyst supported on halloysite nanotubes.
- [40] Kibami, D., Hesieli, R., Zhimomi, N., Houzha, N., & Nyuwi, C. M. (2022). Synthesis and Characterization of a Bio Waste Material as an Effective Low-cost Adsorbent. *European Journal of Engineering Research and Science*, 7(3)
- [41] Kaushal, G., Kaur, B., Kumar, P., Dhiman, M., & Khanra, P. (2022). A Short Review: Synthesis Methods and Application of Biomolecule Derived Graphene Quantum-Dots. *ECS Transactions*, 107(1), 6297.
- [42] Reza, M. S., Afroze, S., Kuterbekov, K., Kabyshev, A., Zh. Bekmyrza, K., Haque, M. N., Islam, S. N., Hossain, M. A., Hassan, M., Roy, H., Islam, M. S., Pervez, M. N., & Azad, A. K. (2023). Advanced Applications of Carbonaceous Materials in Sustainable Water Treatment, Energy Storage, and CO2 Capture: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 15(11), 8815. <https://doi.org/10.3390/su15118815>
- [43] Faraldos, M., & Goberna, C. (2021). Técnicas de análisis y caracterización de materiales. *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*, 1-1052.
- [44] Adar, F. (2022). Use of Raman Spectroscopy to Qualify Carbon Materials. *Spectroscopy*, 37(6), 11-15.
- [45] Orlando, A., Franceschini, F., Muscas, C., Pidkova, S., Bartoli, M., Rovere, M., & Tagliaferro, A. (2021). A comprehensive review on Raman spectroscopy applications. *Chemosensors*, 9(9), 262.
- [46] Lipinski, G., Jeong, K., Moritz, K., Petermann, M., May, E. F., Stanwix, P. L., & Richter, M. (2022). Application of Raman Spectroscopy for Sorption Analysis of Functionalized Porous Materials. *Advanced Science*, 9(9), 2105477.
- [47] Pejčić, B., Heath, C., Pagès, A., & Normore, L. (2021). Analysis of carbonaceous materials in shales using mid-infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 112, 103186.
- [48] Țucureanu, V., Matei, A., & Avram, A. M. (2016). FTIR spectroscopy for carbon family study. *Critical reviews in analytical chemistry*, 46(6), 502-520.
- [49] Van der Heide, P. (2014). *Secondary ion mass spectrometry: an introduction to principles and practices*. John Wiley & Sons.
- [50] Carbonne, J. M., Kiss, A., Bouvier, A. S., Meibom, A., Baumgartner, L., Bovay, T., ... & Rubatto, D. (2022). Surface Analysis by Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS): Principles and Applications from Swiss Laboratories. *Chimia*, 76(1-2), 26-26.



REFERENCIAS



- [51] Lagator, M., Berrueta Razo, I., Royle, T., & Lockyer, N. P. (2022). Sensitivity enhancement using chemically reactive gas cluster ion beams in secondary ion mass spectrometry (SIMS). *Surface and Interface Analysis*, 54(4), 349-355.
- [52] Gao, Y. Y., Ren, T. X., Williams, I. S., Ireland, T. R., Long, T., Rienitz, O., ... & Wang, J. (2022). Molar mass measurement of a 28 Si-enriched silicon crystal with high precision secondary ion mass spectrometry (SIMS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 37(12), 2546-2555.
- [53] Edwards, C. T., Jones, C. M., Quinton, P. C., & Fike, D. A. (2022). Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) trends measured from Ordovician conodont apatite using secondary ion mass spectrometry (SIMS): Implications for paleo-thermometry studies. *GSA Bulletin*, 134(1-2), 261-274.
- [54] Wilson, B. K., & Prud'homme, R. K. (2021). Nanoparticle size distribution quantification from transmission electron microscopy (TEM) of ruthenium tetroxide-stained polymeric nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 604, 208-220.
- [55] Nurit, T. G. (2022). Minerals Observed by Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM) and High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM). In *Electron Microscopy*. IntechOpen.
- [56] Ornelas, I. M., Unwin, P. R., & Bentley, C. L. (2019). High-throughput correlative electrochemistry–microscopy at a transmission electron microscopy grid electrode. *Analytical chemistry*, 91(23), 14854-14859.
- [57] Cheek, Q., Fahrenkrug, E., Hlynchuk, S., Alsem, D. H., Salmon, N. J., & Maldonado, S. (2020). In situ transmission electron microscopy measurements of Ge nanowire synthesis with liquid metal nanodroplets in water. *ACS nano*, 14(3), 2869-2879.
- [58] Escalante, J., Chen, W. H., Tabatabaei, M., Hoang, A. T., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., & Saravanakumar, A. (2022). Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112914.
- [59] Farivar, F., Yap, P. L., Karunagaran, R. U., & Losic, D. (2021). Thermogravimetric analysis (TGA) of graphene materials: Effect of particle size of graphene, graphene oxide and graphite on thermal parameters. *C*, 7(2), 41.
- [60] Rami, J. M., Patel, C. D., Patel, C. M., & Patel, M. V. (2021). Thermogravimetric analysis (TGA) of some synthesized metal oxide nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 43, 655-659.
- [61] Farivar, F., Yap, P. L., Hassan, K., Tung, T. T., Tran, D. N., Pollard, A. J., & Losic, D. (2021). Unlocking thermogravimetric analysis (TGA) in the fight against “Fake graphene” materials. *Carbon*, 179, 505-513.
- [62] Hernández Fernández, J., Cano, H., Guerra, Y., Puello Polo, E., Ríos-Rojas, J. F., Vivas-Reyes, R., & Oviedo, J. (2022). Identification and quantification of microplastics in effluents of wastewater treatment plant by differential scanning calorimetry (DSC). *Sustainability*, 14(9), 4920.
- [63] Leyva-Porras, C., Cruz-Alcantar, P., Espinosa-Solís, V., Martínez-Guerra, E., Piñón-Balderrama, C. I., Compean Martínez, I., & Saavedra-Leos, M. Z. (2019). Application of differential scanning calorimetry (DSC) and modulated differential scanning calorimetry (MDSC) in food and drug industries. *Polymers*, 12(1), 5.
- [64] Janovszky, D., Sveda, M., Sycheva, A., Kristály, F., Zámorszky, F., Koziel, T., ... & Kaptay, G. (2022). Amorphous alloys and differential scanning calorimetry (DSC). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-17.
- [65] Bitter, H., & Lackner, S. (2021). Fast and easy quantification of semi-crystalline microplastics in exemplary environmental matrices by differential scanning calorimetry (DSC). *Chemical Engineering Journal*, 423, 129941.



REFERENCIAS



- [66] Ratan, J. K., Kaur, M., & Adiraju, B. (2018). Synthesis of activated carbon from agricultural waste using a simple method: Characterization, parametric and isotherms study. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3334–3345. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.576

- [67] Kumar, P. S., Padmalaya, G., & Elavarasan, N. (2023). Green Carbon Materials: Synthesis from Waste Biomass, Properties, and Environmental Applications. In *Green Carbon Materials for Environmental Analysis: Emerging Research and Future Opportunities* (pp. 181-193). American Chemical Society.

- [68] Canales-Flores, R. A., & Prieto-García, F. (2016). Activation methods of carbonaceous materials obtained from agricultural waste. *Chemistry & Biodiversity*, 13(3), 261-268.

- [69] Rodríguez-Suarez, Norberto, Quesada-González, Omalda, Danguillecourt-Álvarez, Edelio, & Almenares-Verdecia, Isabel. (2021). Materiales carbonosos nanoestructurados: obtención, agentes dopantes y aplicaciones electroquímicas. *Revista Cubana de Química*, 33(1), 93-116.

- [70] Aguilar, N. E. A. (2022). Estudio de la generación y manejo de los residuos de la comercialización de coco en el municipio de Xoxocotla, Morelos. Obtenido de: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/2197/NOHEAA01T.pdf?sequence=1>

- [71] FAO. (2023). Datos sobre alimentación y agricultura. FAOSTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de: <https://www.fao.org/faostat/es/#home>

- [72] Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72.

- [73] Català, F. (1998). El análisis térmico: calorimetría diferencial de barrido y análisis termogravimétrico. *Ingeniería química*, (343), 171-176.

- [74] Quintero, A., Nieto, A., Marín, N., & Canto, F. (2023). Prototipo de tubo de caracterización acústica “NQacoustics” para evaluación de materiales naturales y sintéticos. *Revista de Iniciación Científica*, 9(2), 80-90.