

Uso de Material Carbonoso Derivado del Pseudotallo de la Planta de Banano como
Material de Electrodo en Supercapacitores

Rubén Santiago Vargas Medina

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico.

Directora

Elcy María Córdoba Tuta

Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirector

Juvencio Vázquez Samperio

Doctor en Tecnología Avanzada

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mi madre, padre, hermana y hermano, así como a los familiares, amigos, compañeros de universidad, docentes y cada persona que de una u otra manera me ayudo, apoyo y motivo para profesionalizarme como ingeniero metalúrgico.

Finalmente, dedico este título a la esencia misma de mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander. No me refiero a quienes la administran, sino a su espíritu, lo que ella representa y encarna, le llevo conmigo como una de las más bellas musas que encontré en mi caminar, y procuraré hacer brillar su memoria en cada uno de mis actos como ingeniero, transformador del mundo y creador de soluciones para el avance de la humanidad.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre, quien me dio la vida, el amor por el aprendizaje y la autonomía para buscar conocimiento —llave para solucionar cualquier problema—. Fue y será siempre mi escudo y armadura para avanzar en este camino. A mi padre, por enseñarme a aprender sin esperar que otros me enseñaran; y a mis hermanos, por mostrarme el amplio espectro del conocimiento y hacerme ver que allí reside una de las claves más valiosas de esta vida. Gracias por apoyarme para mantenerme en la universidad y por impulsarme a vivir de forma crítica y consciente.

A los docentes y al personal de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, quienes me mostraron no solo cómo ser ingeniero, sino también cómo ser mejor persona. A mis compañeros y compañeras, ingenieros metalúrgicos con quienes compartí el sueño de transformar la industria, Colombia y el mundo a través de la metalurgia y del maravilloso universo de los materiales.

Extiendo un agradecimiento muy especial a la profesora Elcy María Córdoba Tuta y al profesor Juvencio Vázquez Samperio, por su confianza, su guía, apoyo y el conocimiento impartido. Espero haberles entregado un trabajo digno de su mentoría.

De igual forma, expreso mi gratitud a mis compañeros y amigos de la universidad, a mis hermanos de otras madres, forjados en la lucha social y en la vida, con quienes compartí este fragmento de mi existencia en este bastión del conocimiento llamado Universidad Industrial de Santander. Con ellos, este camino fue más ameno, soñador, rebelde, rico en aprendizajes y constructor de utopías.

Tabla De Contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2 Fundamentación Teórica	13
2.1. Supercapacitores como dispositivos de almacenamiento de energía	13
2.2. Materiales carbonosos para electrodos en supercapacitores	14
2.3. Pseudotallo de banano como biomasa precursora de materiales carbonosos.....	15
2.4. Procesos de activación de carbones obtenidos a partir de biomasa	16
3. Estado Del Arte	17
4. Metodología	21
Etapa 1. obtención y preparación del pseudotallo de la planta de banano	21
Etapa 2. Pretratamiento térmico del material	21
Etapa 3. Activación química con KOH.....	21
Etapa 4. tratamiento térmico (carbonización)	22
Etapa 5. Preparación de los electrodos de trabajo.....	22
Etapa 6. caracterización fisicoquímica de los materiales carbonosos.....	23
6.1. <i>Análisis Termogravimétrico (TGA y DTG)</i>	23
6.2. <i>Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)</i>	23
6.3. <i>Espectroscopía Raman</i>	24
6.4. <i>Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X (XPS)</i>	24
Etapa 7. caracterización electroquímica	24
5. Resultados Y Discusión	26
5.1. Análisis Termogravimétrico (TGA/DTG)	26
5.2. Rendimiento y pérdidas de masa por temperatura de carbonización.....	28
5.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	31
5.4. Espectroscopia Raman	33
5.5. XPS.....	37
5.5.1. <i>Espectros generales y composición superficial</i>	38
5.5.2. <i>Análisis de la región C1s</i>	39

<i>5.5.3 Análisis de la región OIs</i>	40
5.6. Caracterización Electroquímica	42
<i>5.6.1. Respuesta electroquímica en solución 1 M de NaOH de los electrodos de carbón sin activar.</i>	43
<i>5.6.2. Respuesta electroquímica en solución 1 M de NaOH de los electrodos de carbón activado con KOH.</i>	45
Conclusiones	49
Recomendaciones	50
Referencias	51
Apéndices	57

Lista de Figuras

Figura 1. Curvas Termogravimétricas. TGA (Negro) / DTG (Rojo) pseudotallo de banano secado a: a) 200°C, b) 500°C.....	26
Figura 2. Espectro FT-IR, (Azul 200°C), (Rojo 500°C).....	31
Figura 3. Evolución del carbón sin activación: a) 500°C, b) 600°C, c) 800°C, d) 1000°C.	33
Figura 4. Efecto de la activación con KOH.....	35
Figura 5. Cambio de la relación a) ID/IG, b) FWHM D/G, respecto al aumento de T°	36
Figura 6. C1s	39
Figura 7. O1s	41
Figura 8. CV a todas las velocidades de estudio aplicadas en carbones sin activar a a) 600 b) 800 c) 1000 °C en NaOH. GCD a todas las corrientes aplicadas en carbones sin activar a e) 600 f) 800 g) 1000 °C, en NaOH 1M.....	43
Figura 9. Curvas de voltamperometría cíclica a $5 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ de los electrodos carbonizados a (a) 600 °C, (b) 800 °C y (c) 1000 °C sin activar y activados con KOH, registradas en NaOH 1 M. Curvas de carga–descarga galvanostática a $0,25 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ de los electrodos carbonizados a (d) 600 °C, (e) 800 °C y (f) 1000 °C en NaOH 1 M, comparando el estado sin activar (líneas azules) y activado con KOH (líneas rojas).	45
Figura 10. a) CV (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en Na ₂ SO ₄ , b) Capacitancias específicas. c) CV (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en NaOH, d) capacitancias específicas. e) E ₉ (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en H ₂ SO ₄ f) capacitancias específicas.....	60
Figura 11. a) comparación del mejor electrodo de cada medio - 800 °C (10 mV s^{-1}), b) Aporte EDCL y Difusivo EN Na ₂ SO ₄ , c) Aporte EDCL y Difusivo en NaOH d) Aporte EDCL y Difusivo en H ₂ SO ₄	63
Figura 12. (a) CV en NaOH 1 M, (b) CV en NaOH 3M	66

Lista de Apéndices

Apéndices A. Proceso De Producción Del Electrodo De carbón Activado.....	57
Apéndices B. Evolución de la masa en el proceso térmico en la obtención de los carbones.....	58
Apéndices C. Efecto de la temperatura y activación con KOH en distintos medios (10 mV s ⁻¹)	60
Apéndices D. Comparación de los mejores electrodos en cada medio.....	63
Apéndices E. Evaluación de la concentración de NaOH.....	66
Apéndices F. Comparación de la capacitancia específica de electrodos carbonosos obtenidos a partir de biomasa reportados en la literatura y del electrodo desarrollado en este trabajo ...	67
Apéndices G. Parámetros Electroquímicos	68
Apéndices H . Espectroscopia Raman	70

Resumen

Título: Uso de Material Carbonoso Derivado del Pseudotallo de la Planta de Banano como Material de Electrodo en Supercapacitores*

Autor: Rubén Santiago Vargas Medina**

Palabras claves: Almacenamiento De Energía, Capacitancia, Carbones Activados, Electrodo.

Descripción:

En este trabajo se estudió la síntesis y evaluación de carbones derivados del pseudotallo de banano como materiales de electrodo para supercapacitores electroquímicos, con el propósito de valorizar un residuo lignocelulósico abundante mediante su transformación en un material funcional para el almacenamiento de energía. El precursor fue sometido a carbonización a 600, 800 y 1000 °C, con y sin activación química mediante KOH, con el fin de evaluar la influencia de las condiciones de síntesis sobre la estructura, la química superficial y el desempeño electroquímico. Las muestras obtenidas se caracterizaron mediante las técnicas de TGA/DTG, FTIR, Raman y XPS, lo que permitió establecer la evolución térmica, química superficial y estructural del carbono.

Los resultados estructurales evidenciaron que la carbonización a 800 °C combinada con activación con KOH genera un equilibrio óptimo entre microporosidad, desorden estructural y eliminación de grupos oxigenados. Las pruebas electroquímicas realizadas en (Na₂SO₄, H₂SO₄ y NaOH: 1M) mostraron que el electrolito NaOH 1 M ofrece la mejor respuesta capacitiva. En estas condiciones, el electrodo carbonizado a 800 °C y activado con KOH alcanzó una capacitancia específica de 333 F g⁻¹ a 0,25 A g⁻¹, tiempos de descarga prolongados y una resistencia interna reducida. El análisis cinético indicó un mecanismo mixto de almacenamiento de carga, con contribuciones capacitiva (49,35 %) y dependiente de difusión (50,65 %), coherente con la estructura porosa y la química superficial del material. En conjunto, los resultados demuestran que el pseudotallo de banano es un precursor viable y sostenible para la producción de carbones activados de alto rendimiento, destacándose la condición de carbonización a 800 °C con activación mediante KOH, evaluada en NaOH 1 M, como la más favorable para aplicaciones en supercapacitores electroquímicos

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
Director: Elsy María Córdoba. Codirector: PhD.Juvencio Vázquez Samperio.

Abstract

Title: Use of Carbonaceous Material Derived from the Pseudostem of the Banana Plant as Electrode Material in Supercapacitors *

Autor: Ruben Santiago Vargas Medina **

Keywords: Energy Storage, Capacitance, Activated Carbon, Electrode.

Description:

This study investigated the synthesis and evaluation of carbons derived from banana pseudostems as electrode materials for electrochemical supercapacitors, with the aim of recovering an abundant lignocellulosic waste product by transforming it into a functional material for energy storage. The precursor was subjected to carbonization at 600, 800, and 1000 °C, with and without chemical activation using KOH, in order to evaluate the influence of synthesis conditions on structure, surface chemistry, and electrochemical performance. The samples obtained were characterized by TGA/DTG, FTIR, Raman, and XPS, which allowed the thermal, functional, and turbostratic evolution of carbon to be established. The structural results showed that carbonization at 800 °C combined with KOH activation generates an optimal balance between microporosity, structural disorder, and elimination of oxygenated groups. Electrochemical tests performed in (Na₂SO₄, H₂SO₄, and NaOH: 1M) showed that the 1 M NaOH electrolyte offers the best capacitive response. Under these conditions, the electrode carbonized at 800 °C and activated with KOH achieved a specific capacitance of 333 F g⁻¹ at 0.25 A g⁻¹, along with larger voltammetric areas, prolonged discharge times, and reduced internal resistance. Kinetic analysis indicated a mixed charge storage mechanism, with capacitive (49.35%) and diffusion-dependent (50.65%) contributions, consistent with the porous structure and surface chemistry of the material. Overall, the results demonstrate that banana pseudostems are a viable and sustainable precursor for the production of high-performance activated carbons, with carbonization at 800 °C with KOH activation, evaluated in 1 M NaOH, being the most favorable condition for applications in electrochemical supercapacitors.

* Bachelor's Thesis

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. .
Director: Elsy María Córdoba. Associate CoDirector:PhD Juvencio Vázquez Samperio.

Introducción

El desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía se ha convertido en un pilar estratégico dentro de la transición energética global. En este escenario, los supercapacitores electroquímicos emergen como dispositivos de alto interés debido a su elevada densidad de potencia, eficiencia energética cercana al 95–98 % y sobresaliente estabilidad cíclica asociada a la retención de capacitancia, la cual puede mantenerse durante más de un millón de ciclos de carga–descarga (Yu et al, 2013). Estas características los posicionan como elementos clave en sistemas de respaldo, electrónica portátil, vehículos híbridos y aplicaciones que requieren respuestas rápidas en la gestión energética (Yu et al, 2013). El desempeño de un supercapacitor depende estrechamente de las propiedades del material del electrodo, este determina la accesibilidad iónica, la capacitancia específica, la densidad de energía y la estabilidad del dispositivo (Páez-Sánchez et al., 2024). Los carbones porosos han demostrado ser excelentes candidatos gracias a su alta área superficial, estabilidad química, conductividad y versatilidad estructural (Páez-Sánchez et al., 2024).

En particular, los carbones derivados de biomasa han cobrado especial relevancia por su bajo costo, su origen renovable y la posibilidad de transformar residuos agroindustriales en materiales funcionales de alto valor agregado (Taer et al., 2018). Diversos estudios han reportado que, mediante procesos controlados de carbonización y activación, la biomasa puede convertirse en carbones altamente microporosos con notable desempeño electroquímico en medios acuosos (Taer et al., 2018). El cultivo de banano genera una gran cantidad de desechos, es así que se estima que el 90% de la planta de banano es residuo que no se utiliza ampliamente (Taer et al., 2018). El pseudotallo constituye un precursor abundante, económico y renovable para la síntesis de carbones porosos, su composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina favorece la

formación de estructuras carbonosas aromáticas tras la carbonización, mientras que su disponibilidad lo convierte en un candidato ideal para impulsar estrategias de economía circular en el sector agrícola (Taer et al., 2018).

No obstante, persisten brechas científicas significativas relacionadas con la correlación entre las condiciones de síntesis (temperatura de carbonización y activación química), la evolución estructural del carbono y son escasos los trabajos que analizan de manera integrada cómo la microestructura, la microporosidad y la química superficial influyen simultáneamente en los mecanismos de almacenamiento de carga en un mismo precursor, lo que dificulta la identificación de las condiciones óptimas de síntesis para aplicaciones reales (Páez-Sánchez et al., 2024). La presente investigación se centró en la obtención y evaluación de carbones a partir del pseudotallo de banano como materiales de electrodo para supercapacitores. Se estudió el efecto de la temperatura de carbonización (600, 800 y 1000 °C) sobre la estructura, composición y desempeño electroquímico de los carbones, utilizando activación química con hidróxido de potasio (KOH) y empleando electrolitos acuosos de diferente naturaleza (Na_2SO_4 , H_2SO_4 y NaOH, en concentración 1M) (Taer et al., 2018) (Páez-Sánchez et al., 2024). Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante técnicas electroquímicas como la voltamperometría cíclica y la carga–descarga galvanostática, con el fin de determinar su capacitancia específica, su eficiencia y su estabilidad cíclica.

De esta forma, el trabajo busca aportar al desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético sostenibles, explorando un recurso agroindustrial abundante en el país y evaluando sus posibilidades de integración en aplicaciones electroquímicas avanzadas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Obtener materiales carbonosos a partir del pseudotallo de la planta de banano, para su aplicación como electrodo en supercapacitores.

1.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la temperatura de carbonización en la obtención de materiales carbonosos a partir del pseudotallo de la planta de banano.

Caracterizar fisicoquímicamente los materiales carbonosos obtenidos a partir del pseudotallo de la planta de banano.

Evaluar mediante técnicas electroquímicas la capacidad de los materiales carbonosos obtenidos para almacenar iones alcalinos en medio acuoso.

2. Fundamentación Teórica

2.1. Supercapacitores como dispositivos de almacenamiento de energía

Los supercapacitores electroquímicos han adquirido un papel relevante en los sistemas modernos de almacenamiento de energía debido a su capacidad para suministrar y almacenar energía de manera rápida, eficiente y altamente reversible, características especialmente valiosas en aplicaciones asociadas a la integración de fuentes renovables intermitentes y a la gestión dinámica de energía. Estos dispositivos se posicionan como una tecnología complementaria a las baterías recargables, al ofrecer una elevada densidad de potencia, alta eficiencia energética y una notable estabilidad cíclica (Yu et al, 2013).

El almacenamiento de carga en los supercapacitores ocurre principalmente mediante fenómenos que tienen lugar en la superficie del electrodo, lo que permite tiempos de carga y descarga significativamente menores que los observados en sistemas basados en reacciones volumétricas. En función del mecanismo dominante, el comportamiento electroquímico de estos dispositivos se clasifica en dos contribuciones principales: la capacitancia de doble capa eléctrica (EDLC), asociada a la adsorción electrostática de iones del electrolito sobre la superficie accesible del electrodo, y la pseudocapacitancia, relacionada con procesos faradaicos rápidos y reversibles que tienen lugar en la superficie o región subsuperficial del material activo (Yu et al., 2013; Saikia et al., 2020). De tal manera que, gracias a estos mecanismos, los supercapacitores pueden alcanzar eficiencias energéticas superiores al 95 % y una vida útil que puede superar el millón de ciclos de carga–descarga con una mínima pérdida de capacitancia. No obstante, su principal limitación es la menor densidad de energía (5–10 Wh/kg) en electrolitos acuosos en comparación con las baterías de ion-litio (100–200 Wh/kg), especialmente cuando se emplean electrolitos acuosos (Fasakin et al., 2018) (Chen et al., 2022). En consecuencia, gran parte de la

investigación actual se orienta al desarrollo de materiales que permitan incrementar la capacitancia y la densidad energética sin comprometer la estabilidad y la potencia características de estos dispositivos (Yu et al., 2013; Thomas et al., 2019). En este contexto, el diseño y la optimización de materiales carbonosos porosos han sido identificados como un factor determinante para mejorar el desempeño de los supercapacitores, debido a su alta área superficial, estabilidad química y versatilidad estructural

2.2. Materiales carbonosos para electrodos en supercapacitores

El desempeño de un supercapacitor depende en gran medida de las propiedades del material utilizado como electrodo, ya que este determina la capacidad de almacenamiento de carga, la velocidad de transporte electrónico y la estabilidad a largo plazo del dispositivo.

Los materiales carbonosos constituyen la base de los electrodos empleados en la mayoría de los supercapacitores comerciales debido a su elevada estabilidad química, bajo costo, amplia disponibilidad y excelente reversibilidad electroquímica. En estos materiales, el almacenamiento de carga ocurre predominantemente mediante la formación de la doble capa eléctrica (EDLC), asociada a la adsorción electrostática de iones del electrolito sobre la superficie accesible del carbono (Yu et al., 2013; Saikia et al., 2020).

El desempeño electroquímico de los electrodos carbonosos está estrechamente relacionado con su estructura porosa, su conductividad eléctrica, su química superficial y su grado de orden estructural. Una alta microporosidad favorece el incremento de la capacitancia específica al maximizar el área superficial disponible; sin embargo, una distribución de poros excesivamente microporosa puede limitar la difusión iónica a altas velocidades de carga–descarga, afectando negativamente el desempeño a altas corrientes. Por esta razón, la presencia de mesoporos interconectados resulta clave para facilitar el transporte iónico y mejorar la

respuesta cinética del electrodo (Thomas et al., 2019). La conductividad eléctrica del carbono depende en gran medida del grado de orden estructural y del contenido de dominios sp^2 . Materiales con mayor desorden estructural suelen presentar elevadas capacitancias iniciales debido a su alta área superficial, pero pueden exhibir mayores resistencias internas cuando la conectividad electrónica es limitada. En contraste, un mayor orden estructural mejora el transporte electrónico, aunque puede reducir la superficie accesible si no se controla adecuadamente la porosidad (Yu et al., 2013). Adicionalmente, la química superficial del carbono, en particular la presencia de grupos funcionales oxigenados, puede contribuir a procesos pseudocapacitivos que incrementan la capacitancia total del electrodo. No obstante, un contenido excesivo de estos grupos puede comprometer la estabilidad electroquímica y favorecer reacciones parasitarias en electrolitos acuosos, lo que resalta la importancia de controlar tanto la cantidad como la naturaleza de las funcionalidades superficiales (Saikia et al., 2020; Thomas et al., 2019). En este contexto, uno de los principales retos en el diseño de materiales carbonosos para supercapacitores consiste en lograr un equilibrio adecuado entre microporosidad, conectividad electrónica y química superficial.

2.3. Pseudotallo de banano como biomasa precursora de materiales carbonosos

La biomasa lignocelulósica constituye una fuente renovable y abundante para la obtención de materiales carbonosos con propiedades adecuadas para su uso en supercapacitores. La estructura de la biomasa está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, polímeros naturales que, al ser sometidos a tratamientos térmicos, se descomponen y reorganizan para formar estructuras carbonosas.

El pseudotallo de banano es un residuo lignocelulósico constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, en proporciones que favorecen su transformación en materiales

carbonosos. La elevada fracción de celulosa y hemicelulosa promueve la generación de compuestos volátiles durante la carbonización, mientras que la lignina contribuye a la formación de estructuras aromáticas más estables, lo que resulta favorable para el desarrollo de una matriz carbonosa porosa (Karthikeyan et al., 2016; Thomas et al., 2019). Desde el punto de vista morfológico, el pseudotallo presenta una estructura fibrosa y vascular, caracterizada por canales longitudinales y una disposición jerárquica natural. Esta morfología facilita la difusión de agentes activantes y favorece la formación de microporos y mesoporos tras los tratamientos térmicos y químicos, lo que ha sido reportado como una ventaja significativa frente a otros residuos agrícolas menos estructurados (Taer et al., 2018; Taer et al., 2021). Adicionalmente, la amplia disponibilidad del pseudotallo de banano y su subutilización actual lo convierten en un precursor atractivo desde una perspectiva de sostenibilidad y economía circular. Diversos estudios han demostrado que este residuo puede transformarse en carbones porosos con propiedades estructurales adecuadas para aplicaciones electroquímicas, lo que refuerza su potencial como materia prima para el desarrollo de electrodos en supercapacitores (Taer et al., 2018).

2.4. Procesos de activación de carbones obtenidos a partir de biomasa

La activación química es un proceso clave para la producción de carbones porosos con propiedades mejoradas para aplicaciones en supercapacitores. Este proceso se realiza mediante el tratamiento del carbón con agentes activantes como KOH o $ZnCl_2$, entre otros, que promueven la deshidratación, apertura de poros y la reorganización interna de la matriz carbonosa, mejorando significativamente la porosidad favoreciendo la formación de microporos y mesoporos y la accesibilidad superficial, factores determinantes para el desempeño electroquímico del material. Este tratamiento mejora la conductividad eléctrica del material y aumenta su capacitancia.

Diversos estudios han demostrado que la activación con KOH puede generar carbones con áreas superficiales superiores a 2000 m²/g, lo que favorece la difusión iónica y resulta en un mejor desempeño electroquímico en comparación con carbones no activados (Karthikeyan et al., 2016; Saikia et al., 2020). Sin embargo, la activación con KOH también presenta algunas limitaciones, como la necesidad de etapas de lavado intensivas para eliminar los residuos de KOH y evitar reacciones parasitarias.

En general, la activación química mejora considerablemente las propiedades electroquímicas de los materiales carbonosos, pero también plantea algunos retos. La elección del agente activante y las condiciones de tratamiento deben ser cuidadosamente controlado para optimizar la distribución de poros y maximizar la capacitancia específica sin comprometer la estabilidad cíclica. Además, los residuos químicos generados durante la activación pueden afectar la durabilidad del material si no se eliminan adecuadamente (Thomas et al., 2019).

3. Estado Del Arte

La búsqueda de materiales avanzados para dispositivos de almacenamiento de energía ha impulsado el desarrollo de carbones porosos derivados de biomasa, debido a su bajo costo, disponibilidad, sostenibilidad y capacidad para generar arquitecturas micro- y mesoporosas con propiedades electroquímicas competitivas. La biomasa lignocelulósica —compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina— se ha consolidado como un precursor estratégico para la síntesis de carbones activados, pues su estructura polimérica favorece la formación de dominios aromáticos y redes porosas tras la carbonización térmica (Saikia et al.) (2020), en su revisión sobre tecnologías de almacenamiento destacan que la biomasa puede

transformarse en carbones de alta calidad para supercapacitores cuando se optimizan los parámetros de síntesis y activación.

Diversos estudios han demostrado que la temperatura de carbonización ejerce un papel determinante en la evolución estructural de los carbones derivados de biomasa. La carbonización controlada favorece procesos de aromatización, desoxigenación y consolidación de dominios Sp_2 , lo cual incrementa la conductividad eléctrica y la estabilidad mecánica. Trabajos sobre carbones derivados de precursores orgánicos y naturales muestran que el ajuste térmico afecta directamente la microporosidad y la distribución de tamaños de poro, parámetros esenciales para la movilidad iónica en supercapacitores. En este sentido, Chen et al. (2022) demostraron que la temperatura de tratamiento controla la hibridación microcristalina y la formación de dominios gráfiticos en carbones derivados de recursos naturales, mientras que estudios en espumas carbonosas basadas en sacarosa evidencian que la pirólisis incrementa la conectividad interna y favorece el desarrollo de poros accesibles (Vazquez-Samperio et al., 2020).

La activación química constituye otro factor determinante en el desempeño de los carbones aplicados a supercapacitores. Entre los métodos disponibles, la activación con hidróxido de potasio (KOH) es una de las estrategias más eficientes para generar microporosidad y defectos estructurales. El mecanismo general involucra la formación de especies como K_2CO_3 , K_2O y potasio metálico, las cuales interaccionan con las capas desordenadas del carbono, expandiéndolas y promoviendo la apertura de poros. Estudios sobre la activación de materiales carbonosos han descrito con detalle estas transformaciones: (Shi et al., 2025) evidenciaron la participación activa de carbonatos potásicos como intermediarios; (Indujalekshmi J et al., 2024) mostraron que la intercalación de potasio induce una expansión de las capas gráficas y un

incremento del desorden; (Tom. F. et al.,2024) confirmaron que la eliminación posterior de potasio produce redes microporosas estables con alta accesibilidad iónica.

Entre los precursores lignocelulósicos de mayor interés, el banano y sus derivados han sido ampliamente evaluados como fuentes de carbono. Investigaciones sobre cáscara de banano activada con KOH han mostrado que es posible obtener materiales microporosos con buen comportamiento capacitivo en electrolitos acuosos, gracias a la estructura fibrosa y al elevado contenido de biopolímeros de este residuo (Taer, et al., 2017). De manera similar, (Subramanian et al., 2007) reportaron capacitancias de hasta 74 F/g y notable estabilidad ciclística en carbones derivados de fibras de banano, aproximadamente del 88% tras 500 ciclos a una densidad de corriente de 500 mA/g, lo que confirma el potencial de la planta como precursor carbonoso. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han concentrado en partes específicas de la planta, como la cáscara o las fibras, dejando de lado el pseudotallo completo, que constituye el residuo de mayor volumen generado en la producción agrícola del banano. Los trabajos existentes sobre el pseudotallo son escasos y presentan limitaciones metodológicas importantes. Por ejemplo, Taer et al. (2018) evaluaron el pseudotallo de banano empleando una ruta de síntesis con temperatura fija, basada en una carbonización a 600 °C y una activación física posterior con CO₂ a 850 °C durante 2 h, por lo que no analizaron el efecto de variaciones amplias de temperatura. Sin embargo, el estudio sí incluyó una comparación entre muestras con y sin activación química con KOH (0.0–0.7 M), alcanzando 103 F/g en la muestra sin activación química y 170 F/g en la condición óptima de 0.5 M KOH. De forma complementaria, (Fasakin et al., 2018) mostraron el potencial de estructuras porosas en materiales derivados de banano, pero sin integrar caracterizaciones multitécnicas (FTIR, Raman, XPS) que permitan correlacionar la evolución estructural con el desempeño electroquímico. En general, los estudios disponibles no abordan

simultáneamente la influencia de la temperatura de carbonización, la activación química con KOH, la estructura interna del carbono y la respuesta electroquímica en electrolitos de distinta naturaleza.

En conjunto, la literatura demuestra que los carbones derivados de biomasa pueden alcanzar capacitancias específicas competitivas —frecuentemente entre 200 y 350 F·g⁻¹— y que los residuos de la planta del banano constituyen precursores atractivos para aplicaciones electroquímicas. Sin embargo, persiste un vacío científico significativo: no existen estudios sistemáticos sobre el pseudotallo completo que comparen diferentes temperaturas de carbonización, condiciones de activación con KOH y caracterizaciones multitécnicas integradas, ni evaluaciones electroquímicas en múltiples electrolitos (Taer et al., 2018) (Subramanian et al., 2007). Por ello, el presente trabajo busca abordar este vacío mediante la obtención, caracterización completa y evaluación electroquímica de carbones derivados directamente del pseudotallo de banano bajo distintas condiciones de síntesis.

4. Metodología

Un esquema general del proceso realizado para la obtención de los electrodos puede ser visto en el apéndice A.

A continuación, se describen las etapas metodológicas que se llevaron a cabo para el desarrollo del proyecto.

Etapas 1. obtención y preparación del pseudotallo de la planta de banano

El pseudotallo de banano utilizado fue un desecho agroindustrial proveniente de la finca “La Floresta”, ubicada en la vereda Cuzamán del municipio de Lebrija (Santander). Luego de la cosecha del fruto (banano), se recolectó el pseudotallo y se limpió con agua para eliminar las impurezas de la tierra. Se secó inicialmente al aire libre durante 48 horas para reducir su contenido de humedad, posteriormente fue cortado en fragmentos rectangulares uniformes de área superficial 1,5 cm x 3 cm. Luego, se sometió a un secado en estufa (*VULCAN 3-550*) a 200°C durante 1 hora, con una rampa de calentamiento de 1°C/min.

Etapas 2. Pretratamiento térmico del material

Buscando mejorar la porosidad del material cortado, se realizó un pretratamiento térmico a 500°C en horno tubular (Carbolite Gero 30-3000 – TF1-1200), bajo atmósfera de nitrógeno, flujo de 0,48 L/min, con una rampa de calentamiento de 5°C/min y un tiempo de sostenimiento de 1 hora. Los materiales obtenidos en esta actividad, posteriormente, se trituraron empleando un mortero de ágata.

Etapas 3. Activación química con KOH

Algunos de los carbones obtenidos en el pretratamiento de 500°C fueron impregnados con una solución de hidróxido de potasio KOH (40g/L), manteniendo una relación másica KOH:Carbón 2:1 (Karthikeyan et al., 2016; Taer et al., 2021; Thomas et al., 2019). La

impregnación del material en la solución se llevó a cabo durante 10 minutos bajo agitación magnética, seguido de un transvase a una autoclave de acero inoxidable revestido internamente con teflón. La autoclave se llevó a una estufa durante 24h a una temperatura de 100°C. Posterior a su enfriamiento, la suspensión se expuso a una temperatura de 80°C durante 12 horas para eliminar la humedad.

Etapa 4. tratamiento térmico (carbonización)

Para facilitar la carbonización del material molido, impregnado y no impregnado, este fue depositado en una barquilla refractaria de dimensiones (h 1cm x L 5cm x e 1cm).

Con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura de carbonización en las propiedades físico-químicas de los carbones, se realizó la carbonización en un horno tubular (Carbolite Gero 30-3000 – TF1-1200) bajo una atmósfera inerte de nitrógeno N₂, flujo de 0,48L/min. Se emplearon tres temperaturas de tratamiento: 600°C, 800°C y 1000°C, con una rampa de calentamiento de 5°C/min y un tiempo de sostenimiento de 1 hora.

Tras la carbonización, el material fue lavado con una disolución de HCl 0.5M y posteriormente con agua desionizada hasta alcanzar un pH neutro (pH=7), asegurando la eliminación de residuos químicos de la activación. Finalmente, el material fue secado en una estufa a 80°C.

Etapa 5. Preparación de los electrodos de trabajo

Como soporte de los electrodos se utilizó una malla de acero inoxidable 316L, con abertura 250 µm y diámetro de alambre de 160 µm, las mallas fueron lavadas ultrasónicamente para eliminar impurezas, en acetona durante 30 minutos, en etanol durante 15 minutos y en agua durante 5 minutos. Las pastas de electrodo se prepararon con una proporción de 70% carbón activado obtenido del pseudotallo, 20% Carbon Super P, 10% Aglomerante de Teflón

(politetrafluoroetileno, PTFE, al 60% de pureza) diluido en etanol, estos componentes fueron colocados en un vaso de precipitado y llevados a agitación magnética durante 30 minutos. Finalmente se colocó la mezcla en una estufa a 100°C para eliminar el etanol residual en las pastas. Alrededor de 3-5 mg de la pasta obtenida se comprimieron (10 Ton) sobre la malla de acero inoxidable 316 L, para lo cual se utilizó una prensa hidráulica CARVER modelo 3851-0.

Etapa 6. caracterización fisicoquímica de los materiales carbonosos

Para cumplir el Objetivo Específico 2, se realizó la caracterización fisicoquímica del pseudotallo pretratado y de los materiales carbonosos obtenidos mediante distintas temperaturas de carbonización y activación química. Esta etapa permitió analizar la composición química, estructura, morfología, porosidad y grado de grafitización, parámetros esenciales para comprender el efecto del tratamiento térmico y la activación sobre la estructura final del carbono.

6.1. Análisis Termogravimétrico (TGA y DTG)

Se realizaron análisis termogravimétricos (TGA) a las muestras tratadas a 200°C y 500°C, identificando las etapas de pérdida de masa asociadas a humedad, hemicelulosa, celulosa y lignina. La derivada DTG se utilizó para determinar las temperaturas características de degradación. Se calcularon las pérdidas de masa por etapa y se compararon entre los diferentes pretratamientos térmicos. Complementariamente, se cuantificó el rendimiento y las pérdidas de masa por carbonización a las diferentes temperaturas.

6.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía FTIR se empleó para identificar los grupos funcionales presentes en el pseudotallo seco (200°C), pretratado (500°C) y en los materiales carbonizados. Los análisis se realizaron en modo ATR, sin preparación de pastillas, en un rango de 4000–400 cm⁻¹, resolución de 4 cm⁻¹ y 32 barridos por muestra. Se evaluaron cambios en los grupos hidroxilo, carbonilo,

aromáticos y polisacáridos para estudiar la eliminación de componentes lignocelulósicos y la formación de estructuras más aromáticas con el incremento de la temperatura.

6.3. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman se utilizó para determinar el grado de orden/desorden estructural de los materiales carbonosos. Los espectros se adquirieron con un láser de longitud de onda 532 nm y potencia ajustada para evitar degradación térmica de las muestras. La ventana espectral analizada fue 800–2000 cm^{-1} , destacando las bandas características D ($\approx 1350 \text{ cm}^{-1}$) y G ($\approx 1580 \text{ cm}^{-1}$). Los espectros fueron deconvolucionados mediante funciones Gaussianas para determinar: Intensidad de bandas ID/IG (relacionada con defectos estructurales), ancho a media altura (FWHM) de las bandas D y G y evolución del orden grafítico con el incremento de la temperatura de carbonización.

6.4. Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X (XPS)

La composición superficial y los estados químicos de los elementos presentes en los carbones se analizaron mediante XPS. Los espectros se adquirieron en los modos Survey (0–1200 eV) para identificar elementos presentes utilizando las regiones de alta resolución (C 1s, O 1s y N 1s) para identificar tipos de enlace. La calibración se realizó ajustando el pico C 1s sp^2 a 284.8 eV. Se aplicó corrección de línea base y ajuste con funciones mixtas para determinar los porcentajes atómicos de carbono grafítico (sp^2), carbono alifático (sp^3), carbonilos, carboxilos, lactonas (defectos oxigenados), heteroátomos residuales (N, Si, Ca). Este análisis permitió correlacionar la química superficial con el rendimiento electroquímico posterior.

Etapa 7. caracterización electroquímica

Con el fin de cumplir el Objetivo Específico 3, se evaluó el desempeño electroquímico de los materiales carbonosos obtenidos mediante técnicas de voltamperometría cíclica (CV), carga-

descarga galvanostática (GCD), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y pruebas de estabilidad cíclica.

Las mediciones electroquímicas se llevaron a cabo en un potenciostato galvanostato (Autolab IMP) con una configuración de celda de tres electrodos, utilizando un electrodo de trabajo: malla de acero inoxidable 316L con las pastas de carbono soportadas en ella (Ver numeral 6.1). Un Electrodo de referencia: Ag/AgCl (para medios neutros o ácidos) o Hg/HgO (para medios alcalinos). Un contraelectrodo: electrodo de grafito. Las mediciones se realizaron en los electrolitos acuosos: 1 M H₂SO₄, 1 M Na₂SO₄, 1 M NaOH, según la ventana de estabilidad y el comportamiento del electrodo. Antes de cada ensayo, la celda se purgó con N₂ durante 10 minutos para eliminar oxígeno disuelto y minimizar interferencias en el registro electroquímico.

voltamperometría cíclica se empleó para determinar la ventana de operación segura del electrodo y para evaluar el mecanismo de almacenamiento de carga. Los ensayos se realizaron en un potenciostato-galvanostato, aplicando barridos de potencial entre los límites determinados para cada electrolito.

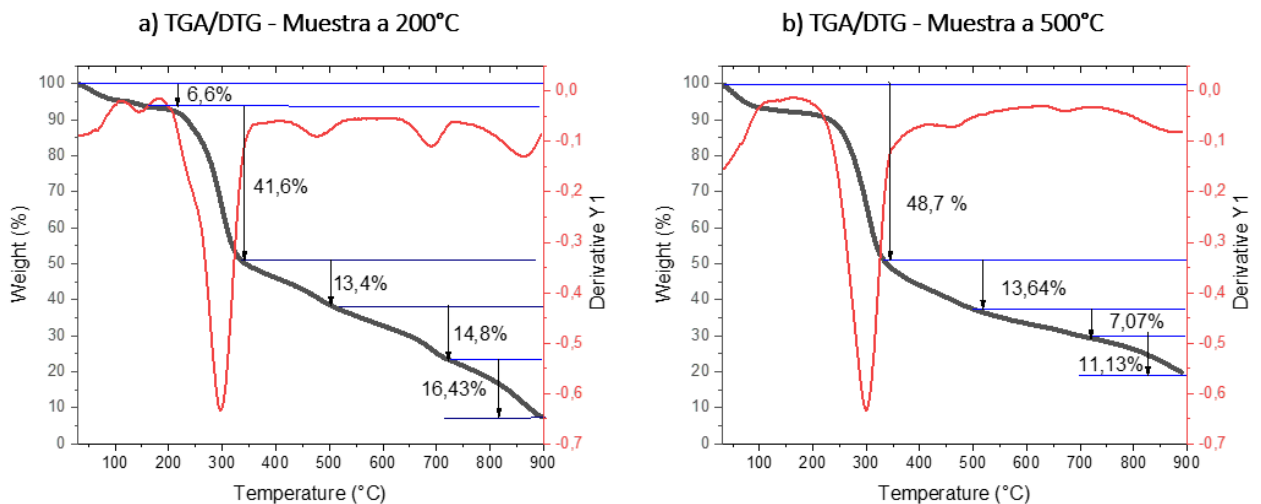
Las curvas de GCD se obtuvieron para evaluar la capacitancia real del electrodo, la eficiencia coulombica y la estabilidad durante la operación. Las mediciones se realizaron aplicando densidades de corriente de 0,25, 0.5, 1, 2, 4, 6 y 8 A/g.

5. Resultados Y Discusión

5.1. Análisis Termogravimétrico (TGA/DTG)

Con el fin de evaluar la estabilidad térmica del precursor y el efecto del tratamiento térmico inicial sobre su comportamiento termogravimétrico, se realizó un análisis TGA/DTG en atmósfera inerte de nitrógeno hasta 900 °C para la biomasa secada a 200 °C y para la muestra posteriormente tratada en horno tubular a 500 °C. La figura 1(a-b) muestra las curvas comparativas de pérdida de masa para ambas condiciones.

Figura 1. Curvas Termogravimétricas. TGA (Negro) / Derivada TG (Rojo) pseudotallo de banana secado a: a) 200°C, b) 500°C



En el caso de la biomasa secada a 200 °C, se observó una pérdida total de masa del 92,3 %, dejando un residuo final de 7,7 % a 900 °C. El perfil DTG evidenció cinco eventos térmicos (inflexiones) alrededor de 150, 300, 500, 700 y 850 °C. El primer evento, de baja intensidad, puede asociarse a la eliminación de humedad residual y especies volátiles ligeras retenidas en la estructura (Guizani et al., 2017). El evento dominante, localizado aproximadamente en 300 °C y responsable de una fracción significativa de la pérdida total (41,6 %), corresponde a la etapa principal de pirólisis del material orgánico, caracterizada por la ruptura masiva de enlaces y liberación de compuestos volátiles, dado que predominan fracciones polisacáridicas

(hemicelulosa/celulosa) en biomasa cruda (Guizani et al., 2017). Los eventos posteriores, observados entre 350 y 900 °C, donde hay contribución amplia de lignina y reacciones de condensación/aromatización, reflejan eliminación de grupos funcionales más estables, pérdida de grupos O remanentes y reordenamientos estructurales progresivos asociados a la evolución de la matriz carbonosa hacia la consolidación del sólido rico en carbono (Guizani et al., 2017). La presencia de pérdidas en los rangos 500–700 °C (14,8 %) y 700–900 °C (16,43 %) indican que el material secado conserva una fracción importante de especies susceptibles a transformación térmica a altas temperaturas, evidenciando que su estructura aún mantiene características predominantemente orgánicas (Dittmann et al., 2022).

Por su parte, la muestra tratada a 500 °C presentó una pérdida total de masa del 80,0 %, con un residuo final de 20,0 % a 900 °C, este incremento del residuo termoestable, aproximadamente 2,6 veces mayor que el de la muestra secada, evidencia que el tratamiento térmico previo induce una transformación significativa del precursor, favoreciendo la formación de una matriz carbonosa parcialmente estabilizada (Guizani et al., 2017). El análisis DTG mostró únicamente cuatro eventos alrededor de 150 (Posible agua adsorbida), 300, 500 y 700 °C, con una reducción notable en la intensidad de los eventos de mayor temperatura en comparación con la muestra a 200°C, el pico dominante cercano a 300 °C indica que aún persisten fracciones termolábiles y grupos funcionales residuales dentro del material pre-carbonizado; sin embargo, la disminución de las pérdidas en los intervalos 500–700 °C (7,07 %) y 700–900 °C (11,13 %) demuestra que una parte considerable de las especies reactivas fue eliminada durante el tratamiento a 500 °C (Guizani et al., 2017). Asimismo, la presencia de una cola descendente en la región de alta temperatura sugiere una pérdida de masa distribuida, característica de matrices

carbonosas en proceso de reorganización estructural, donde la evolución térmica ocurre de forma gradual y no mediante eventos definidos y pronunciados (Dittmann et al., 2022).

La comparación entre ambas curvas permite concluir que el tratamiento térmico a 500 °C reduce la complejidad térmica del material y aumenta de manera significativa la fracción de material con mayor estabilidad térmica, confirmando que la biomasa tratada a 500 °C corresponde a un estado intermedio de carbonización, en el cual el precursor orgánico ha perdido gran parte de su identidad polimérica inicial y ha evolucionado hacia una estructura carbonosa, aunque aún susceptible a transformaciones adicionales a temperaturas superiores.

5.2. Rendimiento y pérdidas de masa por temperatura de carbonización

El balance de masa permite cuantificar la evolución de la biomasa a lo largo de las etapas térmicas empleadas para obtener los materiales carbonosos. Este análisis complementa el TGA, al traducir los eventos de degradación térmica en pérdidas de masa reales del proceso y en el rendimiento final de carbono para cada condición de carbonización (temperatura final y presencia/ausencia de impregnación con KOH). La Tabla 1 resume los porcentajes de pérdidas de masa asociadas a secado a 200 °C, pretratamiento a 500 °C y carbonización final a 600, 800 y 1000 °C, sin impregnación e impregnados con KOH. La pérdida a 200 °C se mantuvo alrededor de 11,7%, atribuida principalmente a la eliminación de humedad y volátiles ligeros; posteriormente, el pretratamiento a 500 °C produjo la mayor pérdida alrededor de 58,7%, consistente con la descomposición de la fracción lignocelulósica observada en TGA/DTG (Páez-Sánchez et al., 2024). La etapa de carbonización final introduce una pérdida adicional que depende de la temperatura y, de forma marcada, de la impregnación con KOH, es así que sin ella la pérdida de masa se mantiene moderada (16,8–19,9%), mientras que con KOH aumenta significativamente (22,5–59,9%), evidenciando la acción del agente activante y su efecto

gasificante sobre la matriz carbonosa a temperaturas elevadas (Lobato-Peralta et al., 2020). Los valores de rendimiento y pérdida total presentados en la Tabla 1 se calcularon mediante un balance de masa secuencial, normalizado respecto a la masa inicial de la biomasa seca (m_i). Bajo este enfoque, la pérdida total estimada no se obtiene mediante la suma aritmética de los porcentajes de cada etapa, sino mediante la acumulación sucesiva de pérdidas aplicadas sobre la masa remanente de la fase anterior. Este método permite reflejar con precisión la evolución del material desde el precursor original: tras perder humedad y volátiles en el secado (m_2) y degradarse la fracción lignocelulósica en el pretratamiento (m_3), la pérdida final de carbonización se aplica únicamente sobre el sólido residual remanente. Este procedimiento explica por qué los rendimientos finales, normalizados a la masa inicial, se sitúan entre el 29,22–30,35 % para muestras sin activar y disminuyen hasta un 14,63 % en las muestras activadas con KOH a 1000 °C debido a la gasificación de la matriz. El detalle matemático de esta simulación, partiendo de una base de 100 mg, se describe en el Apéndice B.

Tabla 1 Pérdidas de masa por etapa en un proceso térmico secuencial (200 °C → 500 °C → T_{final}) y rendimiento de carbono.

Temperatura de Carbonización (°C)	% Pérdida a Secado (200°C)	% Pérdida Pretratamiento (500 °C)	Relación de Impregnación (KOH:Carbón)	% Pérdida Carbonización (T°)	% Pérdida Total Estimada desde m_i	% Rendimiento
600	11,7 %	58,7 %	0:1	16,8 %	69,65	30,35
800	11,7 %	58,7 %	0:1	17,3 %	69,84	30,16
1000	11,7 %	58,7 %	0:1	19,9 %	70,78	29,22
600 + KOH	11,7 %	58,7 %	2:1	22,5 %	71,73 %	28,27
800 +KOH	11,7 %	58,7 %	2:1	36,6 %	76,87 %	23,13
1000 + KOH	11,7 %	58,7 %	2:1	59,9 %	85,37 %	14,63

El rendimiento final de carbono muestra dos comportamientos claros. En ausencia de KOH, el rendimiento se mantiene relativamente estable, disminuyendo levemente con el aumento de la temperatura de carbonización: 30,35% (600 °C), 30,16% (800 °C) y 29,22%

(1000 °C), esto sugiere que, después del pretratamiento a 500 °C, gran parte de la desvolatilización ya ocurrió y el aumento de temperatura favorece principalmente reordenamiento estructural y eliminación secundaria de heteroátomos, con un impacto limitado en la masa remanente (Taer et al., 2018). En contraste, la impregnación con KOH reduce el rendimiento de forma progresiva con el aumento de la temperatura: 28,27% (600 °C), 23,13% (800 °C) y 14,63% (1000 °C), es importante notar que, tras el pretratamiento a 500 °C, el carbón obtenido fue impregnado con una solución de KOH en una relación másica 2:1 (KOH:Carbón). Esta etapa incrementa temporalmente la masa de la muestra antes de la carbonización final. Sin embargo, los valores de pérdida en la etapa de carbonización (T final) reflejan tanto la gasificación del carbono inducida por el KOH como la eliminación de los subproductos de la activación y el exceso de agente químico tras el proceso de lavado con HCl y agua desionizada. El rendimiento final reportado se calculó considerando la masa de carbono puro recuperado frente a la masa inicial de biomasa seca. Esta tendencia es consistente con una activación química más intensa a mayores temperaturas, donde el KOH promueve reacciones que consumen carbono (gasificación parcial) y favorecen el desarrollo de porosidad (Taer et al., 2018), Específicamente, ocurren reacciones de grabado redox donde el óxido de potasio (K_2O) y el carbonato de potasio (K_2CO_3) reaccionan con la matriz sólida para formar potasio metálico y monóxido de carbono ($K_2O + C \rightarrow 2K + CO$ y $K_2CO_3 + 2C \rightarrow 2K + 3CO$). Este consumo físico de átomos de carbono, sumado a la liberación de gases y la posterior intercalación del potasio metálico entre las capas de carbono, es lo que expande la estructura y genera la red de poros.

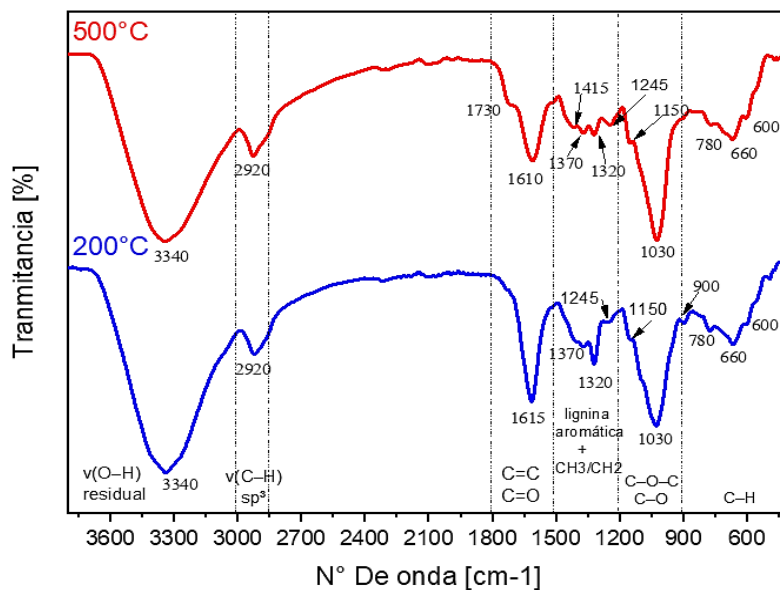
El balance de masa confirma cuantitativamente lo observado en TGA/DTG: la mayor fracción de pérdida ocurre antes de la carbonización final (etapas 200–500 °C), mientras que la etapa final define el contraste entre carbonización “convencional” (sin KOH) y activación

química (con KOH). La diferencia creciente en pérdida total entre muestras impregnadas y no impregnadas al aumentar la temperatura final sustenta la interpretación de que el KOH incrementa la severidad del tratamiento, reduciendo el rendimiento, pero potencialmente aumentando el área superficial accesible y, por ende, el desempeño electroquímico

5.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar los grupos funcionales presentes en la biomasa y evaluar su transformación durante el tratamiento térmico. En materiales lignocelulósicos, las bandas asociadas a grupos hidroxilo, enlaces glucosídicos y estructuras aromáticas reflejan el estado químico de celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya degradación progresiva produce cambios característicos al aumentar la temperatura. La Figura 2 presenta la comparación de los espectros FT-IR correspondientes a la biomasa secada a 200 °C y posteriormente tratada térmicamente a 500 °C. El análisis comparativo evidencia una transformación química progresiva asociada a la deshidratación, degradación de polisacáridos y formación de una matriz carbonosa aromática funcionalizada.

Figura 2. Espectro FT-IR, (Azul 200°C), (Rojo 500°C)



En la región $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, ambas muestras presentan una banda ancha centrada en 3340 cm^{-1} atribuida al estiramiento O–H (Dittmann et al., 2022). La presencia de esta señal en ambas muestras se asocia a grupos hidroxilo estructurales; en la muestra tratada a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ también sugiere la presencia de grupos fenólicos y carboxílicos superficiales característicos de carbones parcialmente carbonizados (Dittmann et al., 2022; Subramanian et al., 2007). En la región $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ se identifica el pico en 2920 cm^{-1} correspondiente al estiramiento C–H alifático, lo que indica la presencia de cadenas alifáticas en ambas muestras. A $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, estas estructuras se asocian a remanentes o a configuraciones más condensadas producto del tratamiento térmico (Ali et al., 2019). En la región $1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, la muestra a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ presenta una banda en 1615 cm^{-1} atribuida a vibraciones C=C aromáticas asociadas a la lignina (Guizani et al., 2017). En la muestra tratada a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ aparece una banda en 1730 cm^{-1} , asociada a grupos carbonilo (C=O), lo que evidencia reestructuración química y formación de funcionalidad superficial durante la carbonización (Subramanian et al., 2007). En la región $1500\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ se observan bandas en 1370 , 1320 y 1245 cm^{-1} asociadas a deformaciones C–H y enlaces C–O de polisacáridos (Guizani et al., 2017). En la muestra a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ se identifica además una señal en 1415 cm^{-1} , atribuida a vibraciones simétricas de grupos carboxilato (COO^-), coherente con la generación de funcionalidad superficial durante la carbonización parcial (Subramanian et al., 2007). En la región $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, la presencia de bandas en 1150 y 1030 cm^{-1} se asocia a enlaces C–O y C–O–C característicos de estructuras lignocelulósicas (Guizani et al., 2017). La banda en 900 cm^{-1} , observada en la muestra a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, se atribuye a enlaces β -glicosídicos de la celulosa; su ausencia en la muestra a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ indica la ruptura de esta estructura polisacárida (Guizani et al., 2017). Finalmente, la región $900\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ presenta

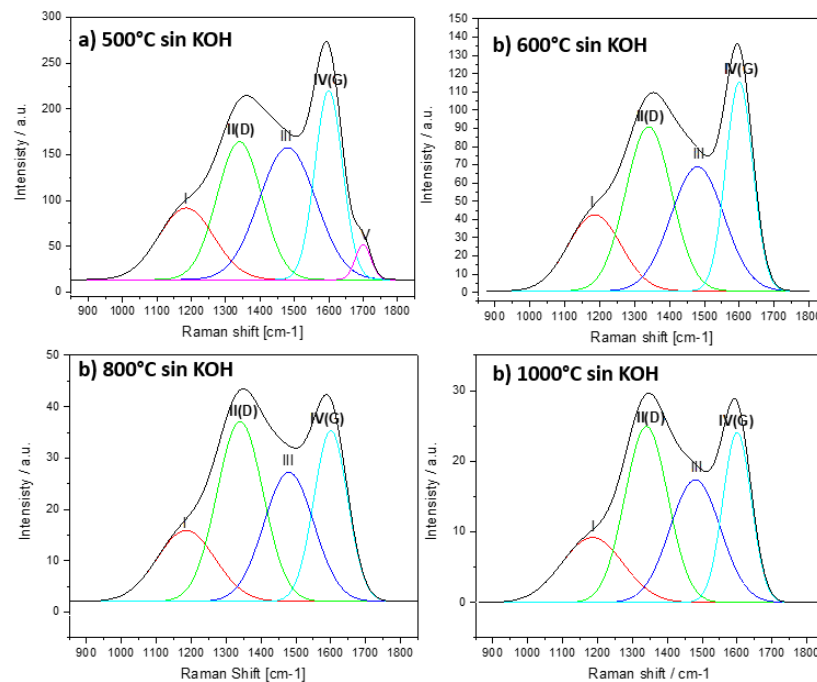
bandas en 780, 660 y 600 cm^{-1} asociadas a vibraciones fuera del plano de estructuras aromáticas, presentes en ambas muestras (Ali et al., 2019).

En conjunto, el espectro FT-IR evidencia la transición de una biomasa lignocelulósica deshidratada (200 $^{\circ}\text{C}$) hacia un material carbonoso parcialmente aromatizado con funcionalidad superficial oxigenada (500 $^{\circ}\text{C}$), coherente con los mecanismos de degradación térmica reportados en la literatura.

5.4. Espectroscopia Raman

La espectroscopía Raman permite evaluar el grado de orden/desorden estructural de los carbones obtenidos a diferentes temperaturas y condiciones de activación. En la Figura 3 se muestra la evolución de los espectros Raman de los carbones obtenidos sin activación química a temperaturas de 500, 600, 800 y 1000 $^{\circ}\text{C}$.

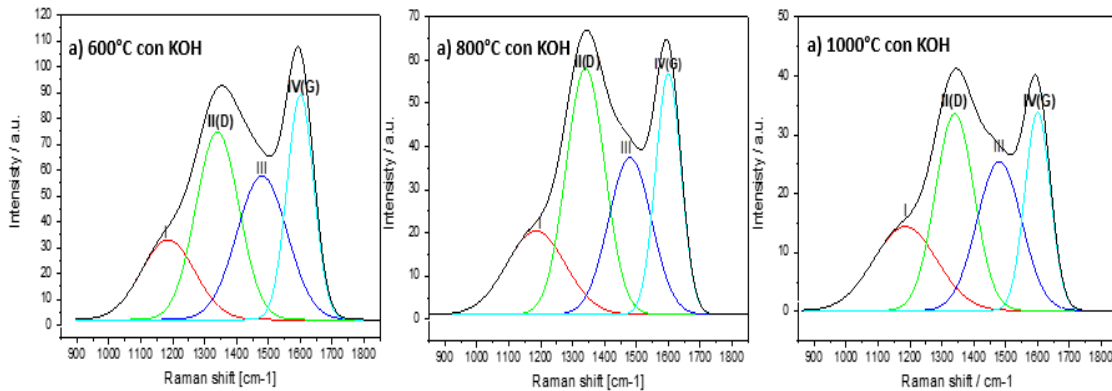
Figura 3. Espectros raman de muestras sin activación.



El conjunto de espectros sin KOH evidencia una evolución térmica desde un sólido carbonoso funcionalizado (500 $^{\circ}\text{C}$) hacia un carbono aromático dominado por las bandas D y G a

temperaturas ≥ 600 °C. Inicialmente a 500 °C se requiere un modelo de cinco contribuciones, se observan la banda D (1340 cm^{-1}) y G (1600 cm^{-1}), I (1185 cm^{-1} , C–H en anillos aromáticos) y III (1480 cm^{-1} , flexión C–H/respiración aromática), junto a V (1700 cm^{-1} , C=O), confirmando una fracción amorfa considerable y funcionalidad oxigenada remanente (Lobato-Peralta et al., 2020). A partir de 600 °C, el espectro se describe con cuatro bandas (I, D, III y G), y la contribución V deja de ser relevante, mientras que I y III disminuyen progresivamente frente al par D–G (Taer et al., 2018). Esta tendencia es consistente con la desfuncionalización y la condensación aromática inducidas por la temperatura: la reducción de I y la desaparición de V reflejan la pérdida de C–H y C=O asociados a estructuras menos estables, mientras que el dominio de D y G a 800–1000 °C indica una microestructura aromática desordenada (carbono no grafitizado con dominios sp^2 de tamaño finito con alta densidad de bordes/defectos (D) y orden local aromático (G), la persistencia de D aun a 1000 °C no implica grafitización, sino un carbono aromático defectuoso y altamente fragmentado (Taer et al., 2018).

La Figura 4 presenta los espectros Raman de los carbones activados con KOH a 600, 800 y 1000 °C. La activación química con KOH suele promover la generación de microporosidad y el aumento de bordes/defectos en los dominios sp^2 , manifestando un reforzamiento de la banda D y, en mayor heterogeneidad estructural (bandas más anchas o contribuciones secundarias más persistentes), así el comportamiento Raman es resultado de una competencia entre el ataque químico (creación de defectos, poros y bordes) y el reordenamiento térmico (condensación aromática y estabilización local de sp^2) (Subramanian et al., 2007).

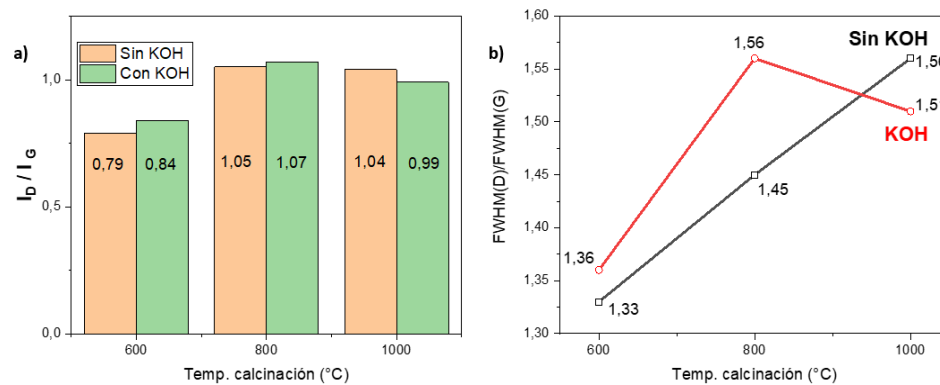
Figura 4. Espectros raman de muestras activadas con KOH

Los espectros de los carbones activados con KOH muestran el efecto del activante sobre la microestructura carbonosa en 600–1000 °C. En todas las temperaturas, se mantiene el esquema de cuatro bandas (I, D, III y G), con una contribución D notable y un G definido, lo que indica que la activación no destruye la red aromática sp^2 , sino que la modifica aumentando bordes y defectos (Lobato-Peralta et al., 2020). A 600 °C + KOH se observa una respuesta con G dominante, pero con D intensa y contribuciones I/III aún apreciables, reflejando un material aromático con mayor densidad de sitios tipo borde/terminación (activadores de D). A 800 °C + KOH la contribución D se intensifica y el espectro adquiere el carácter típico de carbón activado con alto grado de desorden microestructural / mayor densidad de bordes expuestos (Fasakin et al., 2018). A 1000 °C + KOH, D y G tienden a equilibrarse, manteniéndose I y III como contribuciones secundarias. Este comportamiento se interpreta como el resultado de dos efectos simultáneos: (i) el ataque químico del KOH genera microporosidad, bordes y truncamiento de dominios sp^2 (reforzando D y sosteniendo I/III como firmas de heterogeneidad), y (ii) el aumento de temperatura favorece cierta reorganización local del sp^2 , especialmente a 1000 °C, donde se observa una estabilización del balance D–G (Fasakin et al., 2018) (Lobato-Peralta et al., 2020). En conjunto, la figura 4 confirma que la activación con KOH conduce a un carbono no grafitizable con dominios sp^2 de tamaño finito (desalineados) y más heterogéneo que el material

sin activar, sin evidencias de grafitización cristalina, lo cual es consistente con carbones activados reportados para aplicaciones electroquímicas.

En la Figura 5a se muestra la variación de la razón ID/IG (Indicador del nivel de desorden o amorfocidad) y en la figura 5b se presenta la evolución del cociente FWHM(D)/FWHM(G) (Indicador de homogeneidad y grado de consolidación estructural), para las muestras sin activación y activadas con KOH en el intervalo 600–1000 °C.

Figura 5. Cambio de la relación a) ID/IG, b)FWHD D/G, respecto al aumento de T°



La Figura 5a muestra que la razón ID/IG presenta un comportamiento tipo campana con máximo a 800 °C. En los carbones sin activar, ID/IG aumenta de 0,79 (600 °C) a 1,05 (800 °C) y se mantiene prácticamente constante en 1,04 (1000 °C), indicando que el incremento térmico favorece la transición desde un carbono parcialmente funcionalizado hacia un régimen aromático donde D y G tienen contribución comparable (Fasakin et al., 2018). En los carbones activados con KOH, ID/IG aumenta de 0,84 (600 °C + KOH) a 1,07 (800 °C + KOH) y disminuye a 0,99 (1000 °C + KOH), lo que evidencia un máximo desorden relativo a 800 °C y una ligera estabilización a 1000 °C (Fasakin et al., 2018). En términos estructurales, el incremento 600→800 °C refleja la formación de dominios sp^2 finitos con alta densidad de bordes y defectos (aumento de D relativa), mientras que el tramo 800→1000 °C sugiere que la reorganización térmica local compensa parcialmente el desorden adicional (Fasakin et al., 2018). La

comparación entre series confirma el efecto del activante: KOH eleva ID/IG a 600–800 °C (mayor densidad de defectos/bordes), consistente con activación por desarrollo de microporosidad; a 1000 °C la convergencia hacia valores cercanos a 1 indica un equilibrio D–G característico de carbones turbostráticos altamente defectuosos.

En la Figura 5b, para la serie sin activar, el parámetro $FWHM(D)/FWHM(G)$ aumenta con la temperatura (1,33 a 600 °C; 1,45 a 800 °C; 1,56 a 1000 °C), lo que indica una ampliación progresiva en la dispersión de entornos asociados a la banda D respecto a los dominios sp^2 responsables de la banda G (Lobato-Peralta et al., 2020). En la serie activada con KOH, el cociente aumenta de 1,36 (600 °C + KOH) a 1,56 (800 °C + KOH) y disminuye a 1,51 (1000 °C + KOH), mostrando que la activación genera un máximo de heterogeneidad microestructural alrededor de 800 °C, seguido de una estabilización parcial a 1000 °C (Lobato-Peralta et al., 2020; Fasakin et al., 2018). Este resultado complementa el análisis de ID/IG: además de aumentar la contribución relativa de D, se incrementa su ensanchamiento relativo respecto a G, lo cual es consistente con una distribución más amplia de sitios tipo borde/terminación y variación en tamaños locales de dominios sp^2 cuando la activación es más intensa (Lobato-Peralta et al., 2020). La disminución leve a 1000 °C + KOH sugiere que, aunque se mantiene un alto contenido de bordes/terminaciones, la alta temperatura reduce parcialmente la dispersión de entornos asociados a D, estabilizando el balance estructural a escala local (Fasakin et al., 2018).). Así, la Figura 4 respalda que el punto de mayor efecto de activación ocurre a 800 °C, mientras que a 1000 °C se alcanza un equilibrio entre generación de defectos y reorganización térmica.

5.5. XPS

La espectroscopía XPS se emplea para evaluar la composición química superficial y el estado de enlace de los elementos presentes en los carbones sintetizados. Esta técnica

complementa los resultados de TGA, FTIR y Raman al proporcionar información directa sobre la evolución de los grupos funcionales asociados al carbono y al oxígeno, así como sobre los efectos estructurales inducidos por el tratamiento térmico y la activación con KOH.

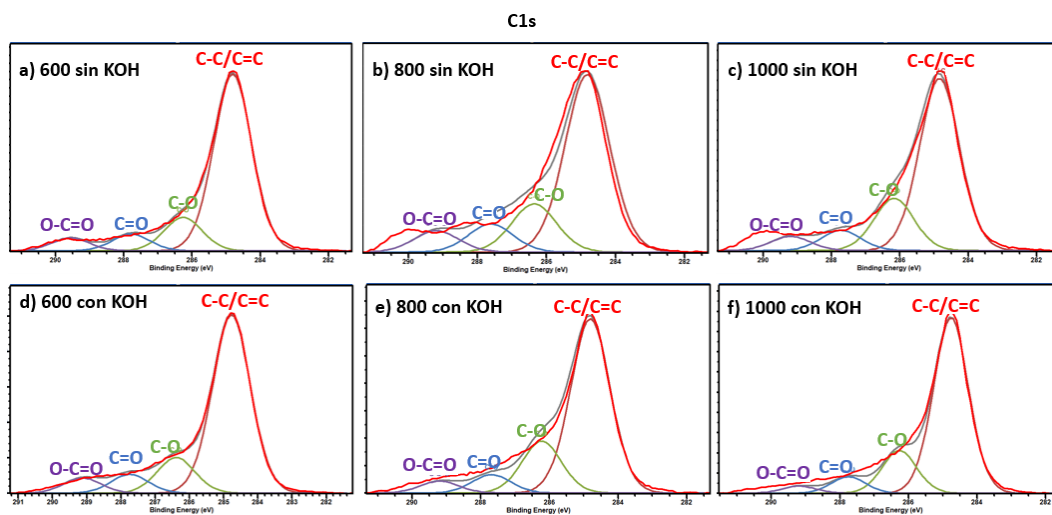
5.5.1. Espectros generales y composición superficial

En los espectros generales (anexo 3) se identifica la presencia de carbono y oxígeno como elementos dominantes en la superficie, coherente con la naturaleza lignocelulósica del precursor de banano. Las muestras sin activar presentan proporciones relativamente mayores de oxígeno superficial, en contraste, las muestras activadas muestran una reducción del oxígeno superficial total a medida que la temperatura aumenta hasta los 1000 °C, fenómeno atribuido a la desoxigenación y a los procesos de gasificación de carbono promovidos por el KOH ($C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$), que eliminan átomos de carbono y oxígeno para desarrollar la porosidad, este agente activador promueve la creación de poros mediante el ataque químico a la matriz de carbono y la posterior intercalación de potasio metálico entre las láminas del material, lo que expande la estructura interna y genera una red interconectada de microporos una vez que las sales residuales son removidas mediante el lavado (Subramanian et al., 2007). Durante el calentamiento, el KOH reacciona y se transforma en especies como K_2CO_3 y K_2O , reduciéndose finalmente a potasio metálico que se intercala entre las láminas de carbono a temperaturas superiores a 600°C (Subramanian et al., 2007). Al ser estas especies potásicas altamente solubles, el proceso de lavado con HCl y agua destilada logra su remoción completa de la superficie, resultando en un material de alta pureza donde el potasio ya no es detectable (Chaitra K et al., 2016).

5.5.2. Análisis de la región C1s

La Figura 6 presenta la evolución de la química superficial del carbono a partir de la deconvolución de la región C1s, donde se identifican las contribuciones de C–C/C=C (284.8eV), C–O (286.3 eV), C=O (287.7 eV) y O–C=O (289.1 eV). En todos los casos, el componente dominante corresponde a C–C/C=C, lo que confirma el carácter aromático de la matriz carbonosa, cuya proporción aumenta con la temperatura.

Figura 6 Espectros XPS de alta resolución de C1s



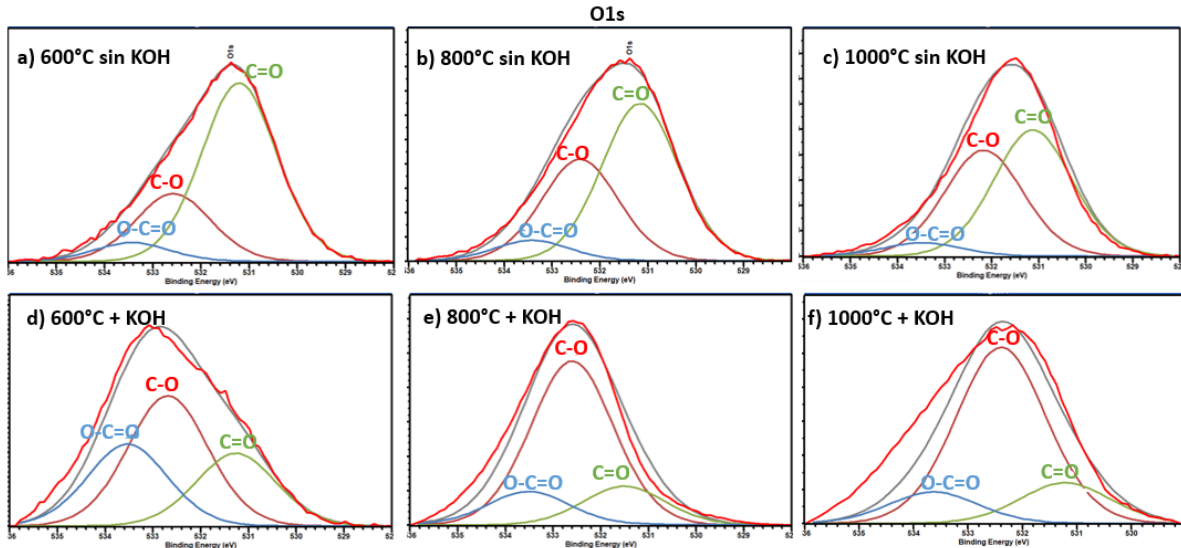
En las muestras sin activar, a 600 °C se observa una superficie aún funcionalizada, con presencia apreciable de C–O (14%), C=O (11.26), O–C=O (9,7%) y dominancia de C–C/C=C (65%). Al incrementar la temperatura a 800 y 1000 °C, se evidencia un aumento progresivo del componente C–C/C=C (66-70 %) y una disminución de C=O (8.2-7%) y O–C=O (7.7-5%), lo que indica la eliminación de los grupos oxigenados más inestables. En contraste, C–O (15-18%) muestra una ligera persistencia e incluso incremento relativo, sugiriendo que estos grupos funcionales son más estables térmicamente (Ayiania et al., 2020). En conjunto, este comportamiento refleja una aromatización progresiva acompañada de desoxigenación selectiva (Páez-Sánchez et al., 2024). En las muestras activadas con KOH, se mantiene el predominio de

C–C/C=C, aunque con una distribución distinta de los grupos oxigenados. A 600 °C, la fracción aromática C–C/C=C (67,8%) es ligeramente mayor que en las muestras sin activar, mientras que los grupos oxigenados aún están presentes (Subramanian et al., 2007). A 800 °C, se observa un aumento simultáneo de C–C/C=C (70%) y C–O (de 14.2 a 17%), junto con una disminución de O–C=O (de 8% a 7%), lo que indica una reorganización selectiva de la química superficial más que una eliminación uniforme del oxígeno (Páez-Sánchez et al., 2024). A 1000 °C, esta tendencia se consolida, con una superficie dominada por carbono aromático (71,16%) y una fracción estable de C–O (17.739%, mientras que C=O (6%) y O–C=O (4%) continúan disminuyendo (Páez-Sánchez et al., 2024).

En conjunto, la Figura 6 evidencia que el aumento de la temperatura favorece la aromatización del material en ambas series. Sin embargo, la activación con KOH modifica la distribución de los grupos funcionales, promoviendo la eliminación de especies más oxidadas y la persistencia selectiva de C–O, lo que sugiere la formación de una superficie más defectuosa y estructuralmente reorganizada (Páez-Sánchez et al., 2024) (Subramanian et al., 2007).

5.5.3 Análisis de la región O1s

La Figura 7 muestra la evolución de la química superficial del oxígeno a partir de la deconvolución de la región O1s, donde se identifican las contribuciones asociadas a C=O (531.2eV), C–O (532.4 eV) y O–C=O (533.4eV). A diferencia de la región C1s, en este caso la evolución de las áreas relativas permite seguir con mayor claridad la redistribución de los grupos oxigenados con la temperatura y con la activación química.

Figura 7. Espectros XPS de alta resolución del O1s

En las muestras sin activar, a 600 °C domina el componente C=O (67.26 %), seguido por C–O (25.62 %) y una fracción menor de O–C=O (7.13 %), lo que indica una superficie todavía rica en grupos oxigenados asociados a una carbonización incompleta (Ayiania et al., 2020). Al aumentar la temperatura a 800 °C, la contribución de C=O disminuye hasta 56.25 %, mientras que C–O aumenta hasta 36.38 %, en tanto que O–C=O se mantiene prácticamente constante. Finalmente, a 1000 °C, C=O continúa disminuyendo hasta 51.3 %, C–O alcanza 43.15 % y O–C=O desciende a 5.46 %. En conjunto, esta evolución indica que el incremento de la temperatura favorece la eliminación de los grupos más oxidados e inestables, especialmente los carboxílicos, mientras que las funciones tipo C–O persisten como las especies oxigenadas más estables en la superficie carbonosa (Páez-Sánchez et al., 2024). En las muestras activadas con KOH, la distribución de los grupos oxigenados cambia de forma importante respecto a la serie sin activar. A 600 °C, el componente dominante pasa a ser C–O (45.74 %), seguido de O–C=O (28.75 %) y C=O (25.51 %), lo que evidencia una superficie más funcionalizada y rica en defectos generados por la activación química (Subramanian et al., 2007). Al aumentar la temperatura a 800 °C, C–O

se incrementa de manera marcada hasta 68.64 %, mientras que C=O y O–C=O disminuyen a 16.33 % y 15.03 %, respectivamente. A 1000 °C, esta tendencia se consolida, con C–O como componente claramente dominante (70.9 %), mientras que C=O se mantiene prácticamente constante (16.41 %) y O–C=O continúa disminuyendo hasta 12.68 %. Este comportamiento sugiere que la activación con KOH no solo modifica la cantidad total de oxígeno superficial, sino que favorece la persistencia selectiva de funciones C–O, asociadas a estructuras más estables en bordes y defectos del carbono activado (Subramanian et al., 2007).

En conjunto, la Figura 7 evidencia que el aumento de la temperatura produce una desoxigenación progresiva en ambas series, pero con diferencias claras en la naturaleza de los grupos remanentes. Mientras que en las muestras sin activar la superficie está inicialmente dominada por C=O y evoluciona hacia una mayor proporción de C–O, en las muestras activadas el componente C–O domina desde 600 °C y se intensifica con la temperatura, lo que indica una reorganización química distinta inducida por KOH. Así, la activación química no solo altera la cantidad de oxígeno superficial, sino también la distribución de sus entornos químicos, favoreciendo una superficie más defectuosa y funcionalizada (Subramanian et al., 2007).

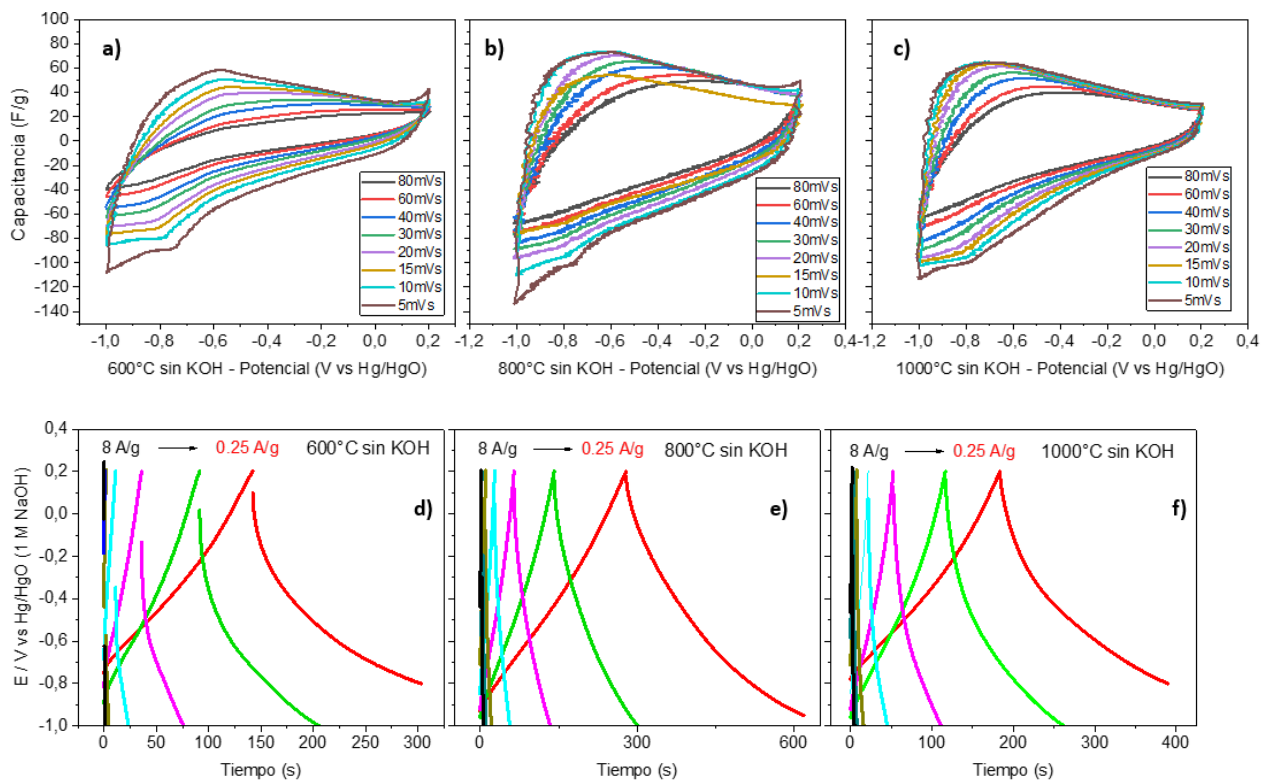
5.6. Caracterización Electroquímica

La voltamperometría cíclica (CV) se empleó como técnica principal para evaluar la respuesta electroquímica de los electrodos carbonosos preparados a distintas temperaturas de carbonización (600, 800 y 1000 °C), tanto en su forma no activada como activados químicamente con KOH. También se empleó la técnica de carga–descarga galvanostática (GCD) de manera complementaria a la voltamperometría cíclica para cuantificar la capacidad de almacenamiento de carga de los electrodos y evaluar su comportamiento bajo diferentes demandas de corriente.

5.6.1. Respuesta electroquímica en solución 1 M de NaOH de los electrodos de carbón sin activar.

La figura 8 muestra las respuestas electroquímicas de los electrodos carbonizados a 600, 800 y 1000 °C sin activación química, evaluados mediante voltamperometría cíclica (CV) y carga–descarga galvanostática (GCD) en NaOH 1 M.

Figura 8. CV a todas las velocidades de estudio aplicadas en carbones sin activar a a) 600 b) 800 c) 1000 °C en NaOH. GCD a todas las corrientes aplicadas en carbones sin activar a e) 600 f) 800 g) 1000 °C, en NaOH 1M



En las figuras 9 a), b) y c) se muestra un pico de oxidación que disminuye gradualmente con el aumento de la temperatura en potenciales entre -0,9 y -0,7 lo que plantea reacciones de difusión en la superficie de los electrodos (Fasakin et al., 2018).

Los voltamperogramas presentan formas cuasirectangulares, características del comportamiento EDLC, aunque con diferencias significativas según la temperatura de síntesis. El electrodo carbonizado a 600 °C muestra la menor área de voltamograma, así como una caída

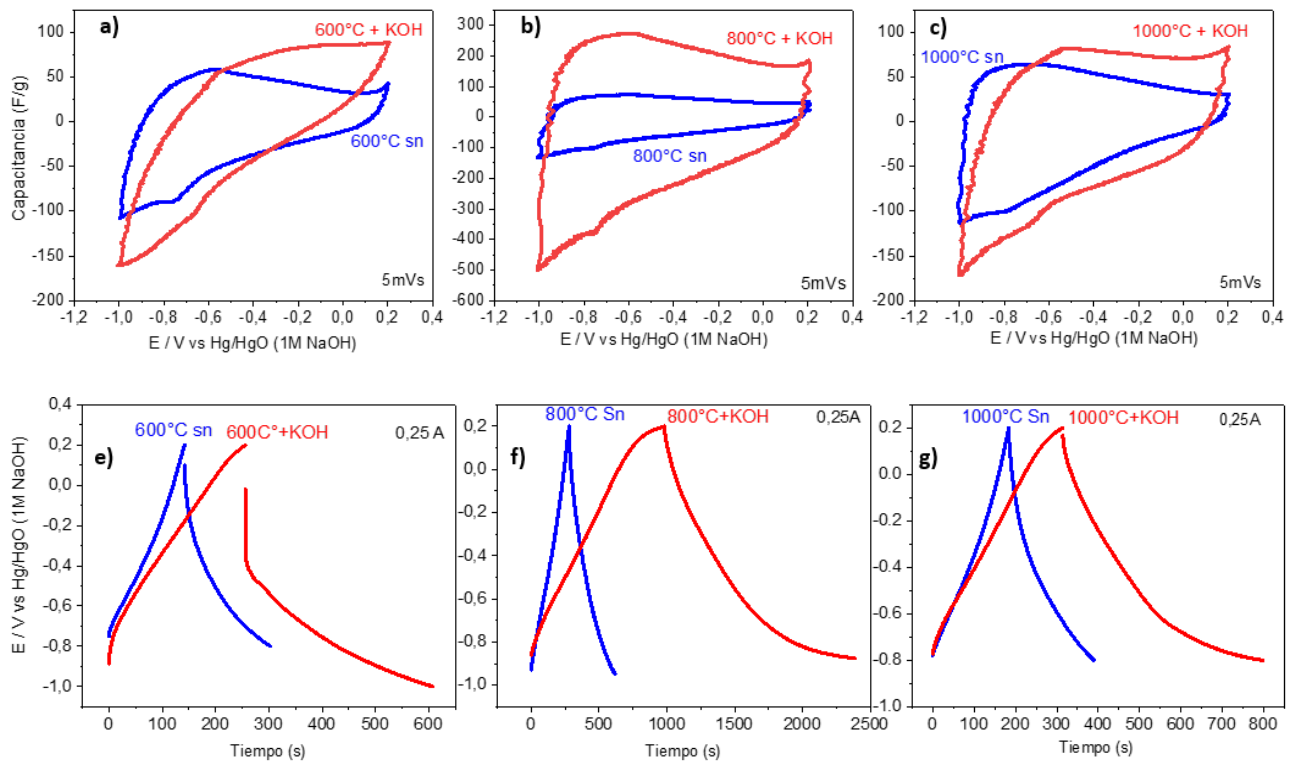
más rápida y prolongada de su capacitancia, mostrando una baja estabilidad con el aumento de la velocidad de barrido, coherente con la limitada porosidad y el incompleto desarrollo estructural observados previamente en espectroscopia Raman (Páez-Sánchez et al., 2024). A 800 °C, las curvas exhiben una expansión considerable del área, así como una mayor retención de forma y carga a todas las velocidades de barrido, lo que refleja un incremento sustancial de la accesibilidad iónica y un equilibrio adecuado entre orden estructural, contenido funcional superficial y distribución de defectos (Páez-Sánchez et al., 2024). Por el contrario, el material carbonizado a 1000 °C presenta una respuesta más restringida, asociada a la pérdida de microporos y al aumento de la densificación estructural, procesos consistentes con la reorganización aromática observada en Raman y XPS (Fasakin et al., 2018).

Estos resultados se corroboran en la Figura 8d) donde el electrodo 600 °C exhibe el tiempo de descarga de 150s a 0,25A y que produce una capacitancia específica de 31,25F/g aplicando la fórmula A.1 Capacitancia por descarga galvanostática (Véase anexo 2) mientras que a 800°C, figura 8e) los perfiles de GCD muestran una mayor linealidad y mayores tiempos de descarga para el electrodo de 800 °C, siendo esta de 300s a 0,25 A, indicando una capacitancia superior de 62,5F/g y una menor resistencia interna y finalmente la figura 8f) a 1000 °C muestra una disminución con un tiempo de 200 s a 0,25A debido a la reducción de la porosidad útil, dando una capacitancia media de 41F/g. En conjunto, estos resultados confirman que 800 °C es la temperatura óptima de carbonización para maximizar el desempeño electroquímico en ausencia de activación química, lo cual coincide con la transición estructural hacia un carbono turbostrático bien desarrollado observada en Raman (Taer et al. 2017).

5.6.2. Respuesta electroquímica en solución 1 M de NaOH de los electrodos de carbón activado con KOH.

Como se evidencia en la figura 9 la activación química modifica profundamente la estructura de los carbones, genera microporosidad adicional y defectos estructurales asociados a la intercalación y eliminación posterior de especies potásicas (K^+ , K_2CO_3 , K_2O), procesos confirmados en la literatura para materiales carbonosos activados químicamente y coherentes con el aumento de ID/IG detectado en Raman (Wang et al., 2019).

Figura 9. Curvas de voltamperometría cíclica a $5\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ de los electrodos carbonizados a (a) $600\text{ }^\circ\text{C}$, (b) $800\text{ }^\circ\text{C}$ y (c) $1000\text{ }^\circ\text{C}$ sin activar y activados con KOH, registradas en NaOH 1 M. Curvas de carga–descarga galvanostática a $0,25\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ de los electrodos carbonizados a (d) $600\text{ }^\circ\text{C}$, (e) $800\text{ }^\circ\text{C}$ y (f) $1000\text{ }^\circ\text{C}$ en NaOH 1 M, comparando el estado sin activar (líneas azules) y activado con KOH (líneas rojas).



En las Figuras 9 a), b) y c), el aumento del área voltamperométrica en todas las muestras activadas demuestra un incremento significativo de la capacitancia específica, la muestra activada a $600\text{ }^\circ\text{C}$ experimenta una mejora moderada, limitada por la estructura aun parcialmente

carbonizada, dado que modifica poco la forma del voltamograma inicial (Rahmah et al., 2017). Este efecto es especialmente notorio en el electrodo activado a 800 °C, donde al área inicial se amplía varias veces el valor inicial y presenta la mayor expansión de la curva, además conserva la forma inicial lo que es un buen indicativo de estabilidad (Wang et al., 2019). Por su parte, a 1000 °C también se observan mejoras, una expansión del área inicial capacitiva y una retención de forma con el aumento de esta, aunque menos pronunciadas, debido al exceso de aromatización y la homogeneización de la red lo que restringe la formación de poros accesibles (Fasakin et al., 2018).

En las Figuras 9 e), f) y g) los perfiles de GCD evidencian incrementos claros en los tiempos de descarga para los electrodos activados, confirmando la mejora en la capacidad de almacenamiento de carga, donde para el electrodo a 600°C se pasa de un tiempo de descarga de 150s a 350s a 0,25A, traducido en un aumento de más del doble de la capacidad, dado que inicialmente tenía una capacitancia de 31.2 F/g y después de la activación al aplicar la Ecuación A.1 (ver Anexo 2), se obtiene una capacitancia de 73F/g, aunque la curva presenta una caída abrupta en la zona inicial de descarga, lo que habla de una alta resistencia interna (Rahmah et al., 2017). Nuevamente, el electrodo activado a 800 °C presenta el mejor desempeño, con curvas más simétricas y con menor caída ohmica, pasando de un tiempo de descarga inicial de 300s a 1400s, iniciando en una capacitancia de 62.5 F/g y pasando a alcanzar un valor de capacitancia de 285.2 F/g, lo que indica una resistencia interna reducida y una estructura más favorable para el transporte iónico. Finalmente, a 1000°C, también se observa una mejora pasando de 200s en el tiempo de descarga a 480s, lo que aumenta significativamente la capacitancia inicial de 41F/g hasta los 100F/g, y corrobora que al aumentar la temperatura a 1000°C hay una fuerte disminución de la capacidad de almacenamiento de carga del electrodo (Fasakin et al., 2018).

Estos resultados confirman que el proceso de activación optimiza la porosidad fina, la accesibilidad iónica y la conductividad superficial, siendo 800 °C la condición en que estos factores se equilibran de manera más eficiente (Páez-Sánchez et al., 2024).

Complementariamente, el desempeño de los materiales activados fue evaluado en diversos medios electrolíticos (Apéndice C), confirmando que la condición de 800 °C mantiene la mayor respuesta capacitiva independientemente de la naturaleza del ion Na_2SO_4 , H_2SO_4 o NaOH . Una comparación detallada entre los mejores electrodos (Apéndice D) reafirma que el NaOH 1 M es el medio que maximiza la capacitancia mediante un mecanismo equilibrado de almacenamiento, con un 49,45 % de contribución capacitiva y un 50,55 % dependiente de difusión. Asimismo, el estudio de la molaridad del electrolito (Apéndice E) validó que la concentración 1 M de NaOH ofrece la mejor accesibilidad iónica hacia la microporosidad generada. Estos resultados, al ser contrastados con electrodos de la literatura (Apéndice F), demuestran que el pseudotallo de banano procesado bajo estas condiciones alcanza métricas de rendimiento superiores a las reportadas para otros precursores de la misma planta.

En síntesis, el material obtenido mediante carbonización a 800 °C con activación química de KOH presenta el desempeño electroquímico más destacado, logrando una capacitancia específica máxima de 333 F/g (CV a 5 mV/s^{-1}) y 291,6 F/g (GCD a 0,25 A/g) en electrolito de NaOH 1 M. Este rendimiento excepcional es resultado de una sinergia entre abundancia de bordes de plano basal, asentamiento de hibridaciones sp^2 (máximo relación ID/IG de 1,07) y una química superficial optimizada, donde la alta persistencia de grupos C-O (68,64 %) favorece la estabilidad y la transferencia de carga mediante mecanismos mixtos de almacenamiento. Al contrastar estos valores con estudios previos (Apéndice F), los carbones desarrollados en este trabajo superan ampliamente a otros derivados del banano, como la cáscara (68-73 F/g) o las

fibras (74-113 F/g), y resultan competitivos con precursores de alto rendimiento como el salvado de arroz (265 F/g) o el agar (226 F/g). Estos hallazgos demuestran la elevada potencialidad del pseudotallo de banano como una materia prima abundante, sostenible y de bajo costo para la fabricación de supercapacitores de alta eficiencia.

Conclusiones

Se evidencia que la temperatura de carbonización es el factor determinante en la arquitectura del carbono, identificándose los 800 °C como la condición óptima de síntesis. A esta temperatura se alcanza un equilibrio entre el desorden estructural ($ID/IG = 1,07$) y la fragmentación de dominios aromáticos, favoreciendo la generación de microporos funcionales. Aunque no se realizó análisis BET, la mayor pérdida de masa durante la activación con KOH (76,8 % frente a 69,8 % sin activar) constituye evidencia de gasificación parcial de la matriz, asociada a la formación de microporos, lo cual se valida con la superior accesibilidad iónica y desempeño electroquímico del material a 800 °C.

La activación con KOH incrementa significativamente la capacidad de almacenamiento, alcanzando valores de 333 F g⁻¹ (CV, 5 mV s⁻¹) y 291,6 F g⁻¹ (GCD, 0,25 A g⁻¹). Este comportamiento se atribuye a la presencia dominante de grupos funcionales C–O (68,64 %), que actúan como sitios redox activos. El análisis cinético confirma un mecanismo de almacenamiento equilibrado, con contribuciones capacitiva (49,45 %) y difusiva (50,55 %), lo que permite una respuesta eficiente en términos de energía y potencia.

El desempeño electroquímico depende críticamente del electrolito, siendo el NaOH 1 M el medio óptimo, superando al Na₂SO₄ (97 F g⁻¹) y H₂SO₄ (143 F g⁻¹), debido a la mayor movilidad de los iones OH⁻ y su interacción favorable con la superficie funcionalizada, lo que mejora el acceso a la microporosidad.

Finalmente, el pseudotallo de banano se valida como un precursor competitivo para almacenamiento de energía, superando otros residuos de la misma biomasa (68–115 F g⁻¹ en cáscara y 74–112,8 F g⁻¹ en fibras). En conjunto, la ruta de síntesis desarrollada representa una

alternativa sostenible y de bajo costo para la valorización de residuos agroindustriales en dispositivos de alta eficiencia.

Recomendaciones

Para fortalecer la correlación entre la estructura y el desempeño electroquímico, se recomienda realizar análisis SEM y BET–BJH con el objetivo de observar la estructura final del carbono y cuantificar el área superficial específica, así como el volumen de microporos, mesoporos, y la distribución de tamaños de poro. Estos parámetros aportarían una comprensión más profunda de la contribución estructural al comportamiento capacitivo.

Se sugiere ampliar el estudio electroquímico utilizando electrolitos alternativos como KOH, NaClO₄ o geles poliméricos (PVA–H₂SO₄, PVA–KOH), ampliamente empleados en dispositivos flexibles o de estado sólido. Esto permitiría explorar nuevas configuraciones y ampliar el rango de aplicaciones potenciales del material.

Finalmente, es recomendable estudiar diferentes relaciones pseudotallo de banano impregnado con KOH para lograr identificar la cantidad mínima necesaria para generar microporosidad efectiva, reduciendo así el consumo de reactivo, los costos de producción y la carga ambiental asociada al proceso de lavado posterior.

Referencias

- Ali, R., Aslam, Z., Shawabkeh, R. A., Asghar, A., & Hussein, I. A. (2019). BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from wasteoil fly ash. *TURKISH JOURNAL OF CHEMISTRY*, 44(2), 279–295. <https://doi.org/10.3906/kim-1909-20>
- Ayiania, M., Smith, M., Hensley, A. J., Scudiero, L., McEwen, J., & Garcia-Perez, M. (2020). Deconvoluting the XPS spectra for nitrogen-doped chars: An analysis from first principles. *Carbon*, 162, 528–544. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.065>
- Bokobza, L., Bruneel, J., & Couzi, M. (2015). Raman Spectra of Carbon-Based Materials (from Graphite to Carbon Black) and of Some Silicone Composites. *C – Journal of Carbon Research*, 1(1), 77–94. <https://doi.org/10.3390/c1010077>
- Bryś, A., Bryś, J., Ostrowska-Ligeza, E., Kaleta, A., Górnicki, K., Głowacki, S., & Koczoń, P. (2016). Wood biomass characterization by DSC or FT-IR spectroscopy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126(1), 27–35. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5713-2>
- Chen, H., Sun, N., Zhu, Q., Soomro, R. A., & Xu, B. (2022). Microcrystalline hybridization enhanced coal-based carbon anode for advanced sodium-ion batteries. *Advanced Science*, 9(20), 2200023. <http://doi.org/10.1002/advs.202200023>
- Dittmann, D., Saal, L., Zietzschmann, F. et al. Characterization of activated carbons for water treatment using TGA-FTIR for analysis of oxygen-containing functional groups. *Appl Water Sci* 12, 203 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01723-2>
- Fasakin, O., Dangbegnon, J., Momodu, D., Madito, M., Oyedotun, K., Eleruja, M., & Manyala, N. (2018). Synthesis and characterization of porous carbon derived from activated banana

- peels with hierarchical porosity for improved electrochemical performance. *Electrochimica Acta*, 262, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.028>
- Guizani, C., Jeguirim, M., Valin, S., Limousy, L., & Salvador, S. (2017). Biomass chars: The effects of pyrolysis conditions on their morphology, structure, chemical properties and reactivity. *Energies*, 10(6), 796. <https://doi.org/10.3390/en10060796>
- Hassid, A., Klinger, M., Krzack, S., & Cohen, H. (2022). TGA–DSC combined coal analysis as a tool for QC (Quality control) and reactivity patterns of coals. *ACS Omega*, 7(2), 1893–1907. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05296>
- Hou, J., Cao, C., Ma, X. et al. From Rice Bran to High Energy Density Supercapacitors: A New Route to Control Porous Structure of 3D Carbon. *Sci Rep* 4, 7260 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep07260>
- Indujalekshmi J., Arsha M S., Biju V (2024). KOH-mediated structural modification of activated charcoal by heat treatment for the efficient adsorption of organic dyes. *Applied Surface Science Advances*, 19, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100566>
- Chaitra K., Vinny R T., Sivaraman P., Narendra Reddy., Chunyan Hu, Krishna., Venkatesh, Vivek C S., Nagaraju N., Kathyayini. (2016). KOH activated carbon derived from biomass-banana fibers as an efficient negative electrode in high performance asymmetric supercapacitor. *Journal of Energy Chemistry*, 26(1), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2016.07.003>
- Kouchachvili, L., Yaïci, W., & Entchev, E. (2017). Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>

- Lafoz-Pastor, M., Navarro-Soriano, G.. (2020). Super Capacitors: State Of The Art, Applications And Challenges For The Future. *DYNA*, 95(6). 567-569. DOI: <https://doi.org/10.6036/9706>
- Lakra, R., Kumar, R., Sahoo, P. K., Thatoi, D., & Soam, A. (2021). A mini-review: Graphene based composites for supercapacitor application. *Inorganic Chemistry Communications*, 133, 108929. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108929>
- Lobato-Peralta, D. R., Vazquez-Samperio, J., Pérez, O., Acevedo-Peña, P., Reguera, E., & Cuentas-Gallegos, A. K. (2020). Potassium-ion aqueous supercapattery composed by solar carbon and nickel-zinc prussian blue analogue. *Journal of Energy Storage*, 31, 101667. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101667>
- Lu, C., Xu, S., & Liu, C. (2010). The role of K₂CO₃ during the chemical activation of petroleum coke with KOH. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87(2), 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.02.001>
- Morgan, D. J. (2015). Comments on the XPS analysis of carbon materials. *Surface and Interface Analysis*, 47(11), 1072–1079. <https://doi.org/10.1002/sia.5852>
- O.S.I. Fayomi, K.O. Babaremu, I.G. Akande, O. Agboola, B.U. Anyanwu. (2021). Potencial de los biorresiduos en el desarrollo de compuestos para aplicaciones manufactureras. *Materiales de hoy: Actas. Editorial Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.539>
- Páez-Sánchez, N.P., Córdoba-Tuta, E., Vazquez-Samperio, J. et al. (2024). 3D carbonaceous substrates synthesized from melamine sponges for energy storage: Influence of pyrolysis temperature in physicochemical and electrochemical properties. *J Solid State Electrochem* 28, 4155–4167. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05971-x>

- Pérez, J., & Gómez, M. (2022). Innovaciones en la nanotecnología. *Revista Avances Tecnológicos*, 15(3), 123-130. <https://doi.org/10.1002/advs.202200023>
- Querejeta, N., García, S., Álvarez-Gutiérrez, N., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Measuring heat capacity of activated carbons for CO₂ capture. *Journal of CO₂ Utilization*, 33, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.018>
- Rahmah, A., Zainollah, A., Fitriani, N. A., Ramadhan, D. S., Cahayo, M., & Masruroh, M. (2017). EDLC type supercapacitor electrode based on banana peels activated carbon. *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 7(1), 45. <https://doi.org/10.13057/ijap.v7i1.1414>
- Rayón López, N. (2018). Supercapacitores electroquímicos ensamblados con electrodos de carbón activado y nanocompuestos de WO₃ obtenido con energía solar. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <https://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/523>
- Tom. F. Ansgar, K. Victor, S. Sven, J. Hans, K. Hermann, T. Rudiguer, E. Post-treatment strategies for pyrophoric KOH-activated carbon nanofibres. (2024). ScienceDirect. <https://doi.org/10.1039/d3ra07096d>
- Saha, S., Samanta, P., Murmu, N. C., & Kuila, T. (2018). A review on the heterostructure nanomaterials for supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 17, 181–202. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.006>
- Saikia, B. K., Benoy, S. M., Bora, M., Tamuly, J., Pandey, M., & Bhattacharya, D. (2020). A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Fuel*, 282, 118796. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118796>

- Shi, Y., Wang, J., Li, Y., Sui, Z., & Xu, X. (2025). Unveiling the ambient CO₂-mediated K₂CO₃ activation pathway in KOH post-treated activated carbon for exceptional SF₆ adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 520, 166100. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166100>
- Subramanian, V., Luo, C., Stephan, A. M., Nahm, K. S., Thomas, S., & Wei, B. (2007). Supercapacitors from Activated Carbon Derived from Banana Fibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(20), 7527–7531. <https://doi.org/10.1021/jp067009t>
- Taer, E., Taslim, R., Aini, Z., Hartati, S. D., & Mustika, W. S. (2017, January). Activated carbon electrode from banana-peel waste for supercapacitor applications. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1801, No. 1, p. 040004). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4973093>
- Taer, E., Taslim, R., Mustika, W., Kurniasih, B., Agustino, Afrianda, A., & Apriwandi. (2018). Production of an Activated Carbon from a Banana Stem and its application as electrode materials for Supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(9), 8428–8439. <https://doi.org/10.20964/2018.09.55>
- Taer, E., Yusra, D. A., Amri, A., Awitdrus, A., Taslim, R., Apriwandi, N., Agustino, N., & Putri, A. (2021). The synthesis of activated carbon made from banana stem fibers as the supercapacitor electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3346–3349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.645>
- Thomas P, Lai CW, Johan MRB. Recent developments in biomass-derived carbon as a potential sustainable material for supercapacitor-based energy storage and environmental applications. *J Anal Appl Pyrolysis* 2019;140:54–85. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.021>.

- Vazquez-Samperio, J., Acevedo-Peña, P., Guzmán-Vargas, A., Reguera, E., & Córdoba-Tuta, E. (2020). Sucrose-based reticulated vitreous carbon foams and their modification with nickel hexacyanoferrate for energy storage applications. *Diamond and Related Materials*, *109*, 108084. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108084>
- Wang, W., Xu, S., Wang, K., Liang, J., & Zhang, W. (2019). De-intercalation of the intercalated potassium in the preparation of activated carbons by KOH activation. *Fuel Processing Technology*, *189*, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.03.001>
- Yang, L., Hu, M., Lv, Q., Zhang, H., Yang, W., & Lv, R. (2020). Salt and sugar derived high power carbon microspheres anode with excellent low-potential capacity. *Carbon*, *163*, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.03.021>
- Yorgun, S., & Yıldız, D. (2015). KOH-mediated structural modification of activated charcoal by heat treatment for the efficient adsorption of organic dyes. *Microporous and Mesoporous Materials*, *202*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100566>
- Yu, A., Chabot, V., & Zhang, J. (2013). *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications (1st ed.)*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b14671>
- Zhang L, Gu H, Sun H, Cao F, Chen Y, Chen GZ. Molecular level one-step activation of agar to activated carbon for high performance supercapacitors. *Carbon* 2018;*132*:573–9.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.02.100>
- Zhu, Y., Chen, M., Li, Q., Yuan, C., & Wang, C. (2017). High-yield humic acid- based hard carbons as promising anode materials for sodium-ion batteries. *Carbon*, *123*, 727–734.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.08.030>

Apéndices

Apéndices A Proceso De Producción Del Electrodo De carbón Activado

Process to Produce Activated Carbon from Banana Pseudostem & Electrode Fabrication



Apéndices B Evolución de la masa en el proceso térmico en la obtención de los carbones.

Con el fin de visualizar la evolución real de la masa durante el proceso, se realizó una simulación partiendo de una masa inicial arbitraria de 100 mg. La Tabla muestra la evolución de masa remanente después de cada etapa térmica.

Temperatura de Carbonización (°C)	M _i (mg)	M ₂ (mg) 200°C (Perdida de 11,7% desde M _i)	M ₃ (mg) 500°C (Perdida de 58,7% de M ₂)	% Pérdida Carbonización (T°) (Sin y con KOH)	M _f (mg) Carbonización (600, 800,1000)°C (Perdida desde M ₃)	Pérdida total estimada (mg)	M ₄ =M _f (mg) (Rendimiento)
600	100	88,3	36,4679	16,8 %	30,3412	69,658	30,35
800	100	88,3	36,4679	17,3 %	30,1589	69,841	30,16
1000	100	88,3	36,4679	19,9 %	29,2107	70,789	29,22
600 + KOH	100	88,3	36,4679	22,5 %	28,2626	71,737	28,27
800 + KOH	100	88,3	36,4679	36,6 %	23,1206	76,879	23,13
1000 + KOH	100	88,3	36,4679	59,9 %	14,6236	85,376	14,63

Los resultados indican que después del secado, la masa inicial (M_i) de 100 mg pierde un 11,7% permaneciendo 88,3 mg (M₂), tras el pretratamiento a 500 °C, la masa (M₂) de 88,3mg se reduce a 36,47 mg (M₃) dado que pierde un 58,7% de esta, y luego de la carbonización final sin KOH, la masa resultante (M₃) permanecen entre 29,21–30,34 mg, dado que pierde entre 16.8-19.9% de masa. Con KOH, la masa residual disminuye hasta 14,62 mg a 1000 °C dado que M₃ pierde un 59,9% de su masa. Esto evidencia que aproximadamente el 63,5 % de la masa original se pierde antes de la carbonización final, la activación química incrementa significativamente la destrucción de la matriz carbonosa a altas temperaturas y a 1000 °C con KOH, solo permanece ~14,6 % de la masa inicial, lo que indica un proceso de activación severo. El balance de masa confirma cuantitativamente lo observado en TGA/DTG. La principal degradación ocurre en el intervalo 200–500 °C, asociado a la descomposición de los componentes lignocelulósicos. El aumento de temperatura sin KOH produce cambios estructurales con impacto limitado en la

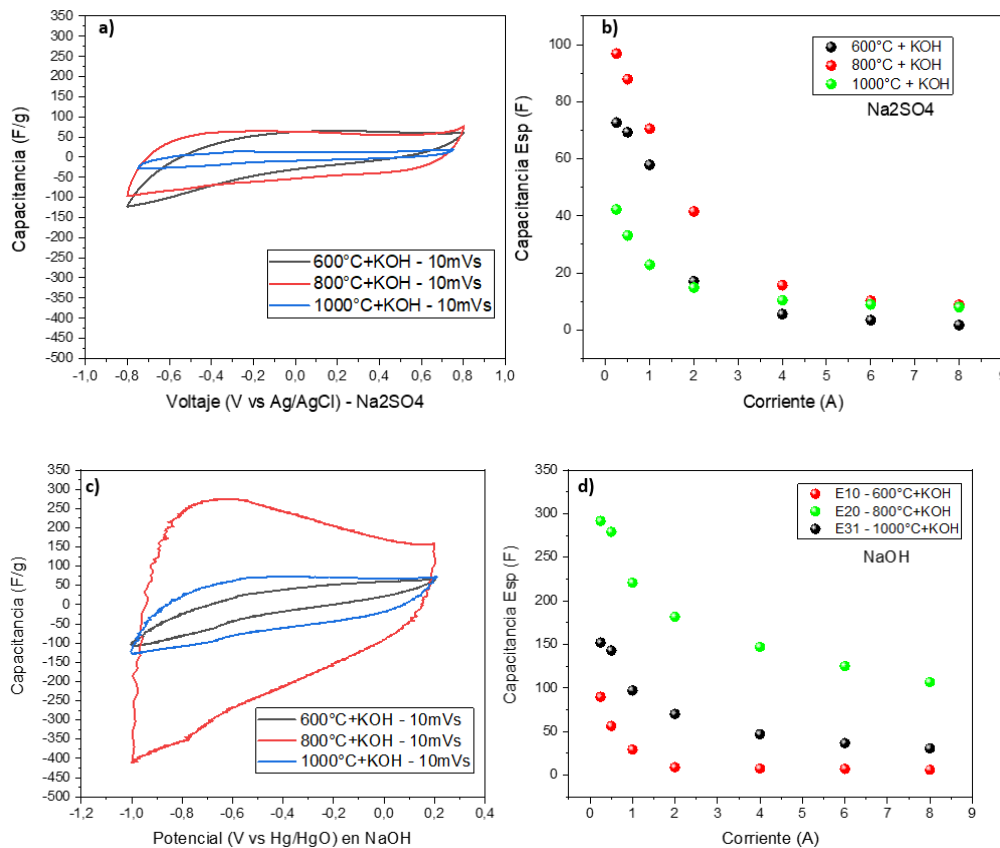
masa remanente. En contraste, la impregnación con KOH intensifica las reacciones de gasificación a temperaturas elevadas, reduciendo el rendimiento final y favoreciendo el desarrollo de porosidad.

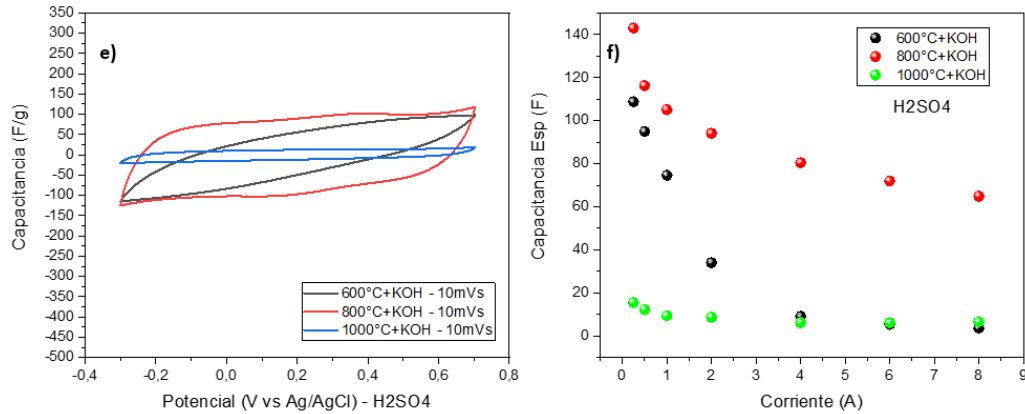
Es importante precisar que entre las etapas M_3 y M_f , el material fue impregnado con KOH en una relación másica 2:1. Aunque esto incrementa la masa momentáneamente, los valores de M_f reportados en la tabla representan la masa de carbono final tras la carbonización y el posterior proceso de lavado con HCl y agua desionizada, el cual elimina por completo el agente activante y los subproductos de la reacción

Apéndices C Efecto de la temperatura y activación con KOH en distintos medios (10 mV s⁻¹)

El desempeño electroquímico depende de la naturaleza del electrolito, con el fin de comparar de forma directa el efecto de la temperatura de carbonización sobre los materiales activados, se seleccionaron para cada electrolito los voltamogramas obtenidos a 10 mV s⁻¹ de los electrodos activados con KOH a 600, 800 y 1000 °C como se muestra en la Figura 10. Esta comparación elimina la variación asociada a la velocidad de barrido y permite observar con mayor claridad la influencia combinada de la microestructura y del medio electrolítico.

Figura 10. a) CV (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en Na₂SO₄, b) Capacitancias específicas. c) CV (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en NaOH, d) capacitancias específicas, e) (600 °C) – (800 °C) – (1000 °C) en H₂SO₄, f) capacitancias específicas.





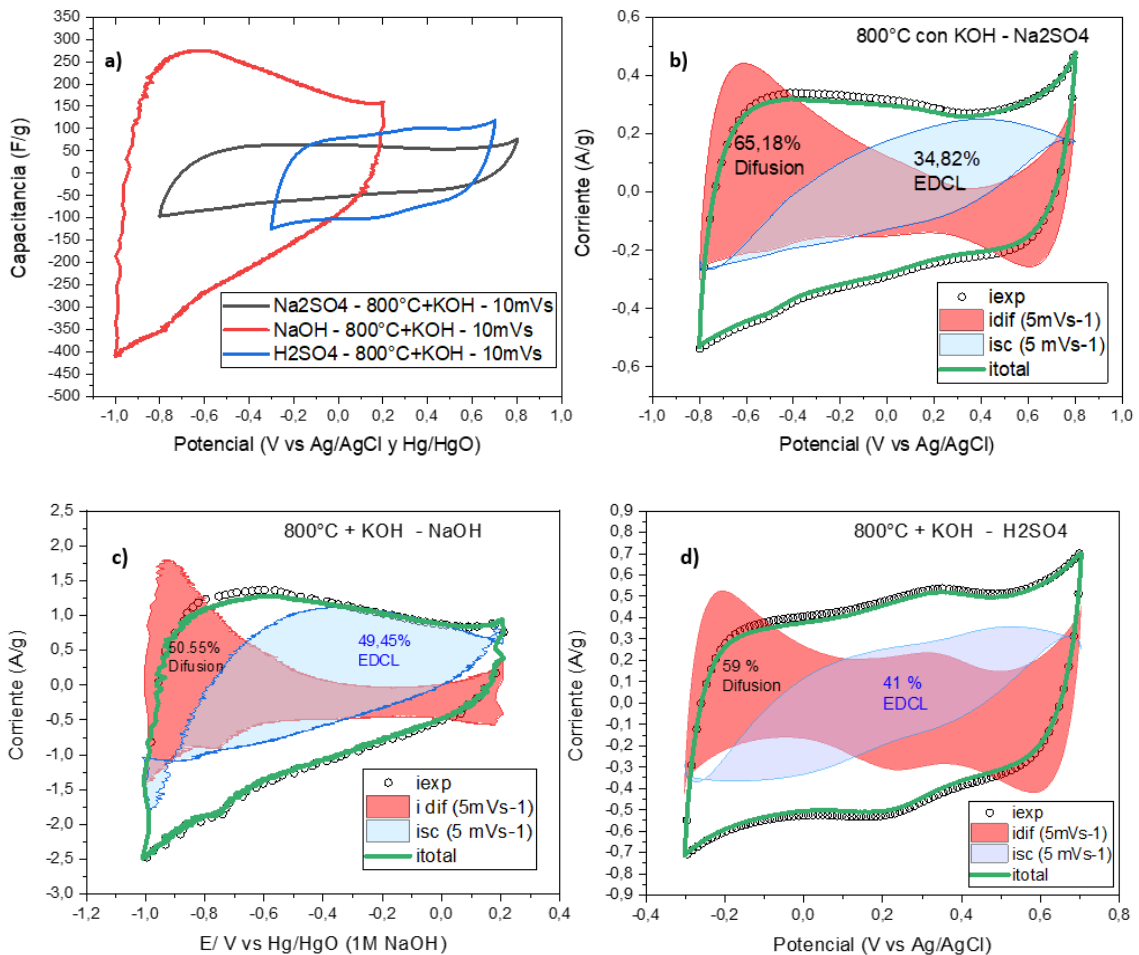
En Na₂SO₄, figura 10 a) las curvas son típicamente capacitivas y presentan áreas moderadas debido a la naturaleza neutra del electrolito, cuya interacción con la superficie carbonosa ocurre predominantemente mediante mecanismos EDLC. Los valores de capacitancia siguen la tendencia observada estructuralmente en la figura 10 b) 800 °C > 600 °C > 1000 °C, donde a 600°C se tienen 72F/g de capacitancia a 0,25A, a 1000°C se tienen una gran caída llegando 43F/g y a 800°C se obtiene el valor más alto 97F/g.

Como muestran la figura 10 c) d) en NaOH el desempeño mejora notablemente. El medio alcalino favorece la movilidad de los iones OH⁻ dentro de microporos y facilita reacciones superficiales redox asociadas a grupos oxigenados residuales, lo cual incrementa la contribución pseudocapacitiva, donde se obtienen valores de capacitancia a 0.25A para 600°C de 90F/g y de 160F/g a 1000°C donde es notable que la capacitancia a 1000°C es mayor que a 600°C, a diferencia de lo ocurrido en Na₂SO₄, donde sucede lo contrario (Páez-Sánchez et al., 2024). Nuevamente, el electrodo a 800 °C presenta el mejor comportamiento, tanto por área de CV como por capacitancia específica donde se obtiene un valor de 291.6F/g a 0,25 A, así como por retención de la carga con el aumento de la velocidad de trabajo o el amperaje, resaltando la combinación adecuada de porosidad fina y sitios activos. En el H₂SO₄ de la Figura 10 e) f), las curvas exhiben una forma EDCL más definida, atribuida a interacciones de protonación

superficial. Se observa que el aumento de la temperatura entre 600 y 800 °C otorga un efecto positivo en el aumento de la capacitancia, donde se obtienen capacitancias 118 y 143 F/g a 0,25A respectivamente, mientras que, al llegar a 1000°C, hay una fuerte caída de capacitancia, incluso menor que la registrada a 600°C, obteniendo 15,4 F/g a 0,25A. En conclusión, el desempeño global es menor que en NaOH, probablemente debido a la menor estabilidad de algunos grupos funcionales en medio ácido y a la menor movilidad iónica en condiciones confinadas, tal como se reporta en estudios de carbones activados derivados de biomasa (Subramanian et al., 2007). Finalmente se puede concluir que NaOH 1 M es el electrolito que maximiza la respuesta electroquímica, especialmente para el electrodo activado a 800 °C, debido a la combinación favorable de transporte iónico, interacción superficial y estabilidad electroquímica.

Apéndices D Comparación de los mejores electrodos en cada medio

Figura 11. a) comparación del mejor electrodo de cada medio - 800 °C (10 mV s^{-1}), b) Aporte EDCL y Difusivo EN Na_2SO_4 , c) Aporte EDCL y Difusivo en NaOH d) Aporte EDCL y Difusivo en H_2SO_4



La figura 11 a) compara directamente el comportamiento electroquímico del mejor electrodo en cada electrolito a una velocidad de barrido de $10 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$, confirmando las tendencias descritas en secciones previas. En los electrolitos Na_2SO_4 y H_2SO_4 se observa una respuesta voltamperométrica con una forma cercana al rectángulo ideal, característica de un comportamiento predominantemente capacitivo. En el caso de Na_2SO_4 se obtiene la menor

capacitancia específica, con un valor de $87 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, a pesar de presentar una ventana de trabajo relativamente amplia. Por su parte, H_2SO_4 , aunque opera en una ventana de potencial más estrecha, muestra una mayor capacitancia, alcanzando $116 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$.

En contraste, la curva obtenida en NaOH presenta el área voltamperométrica más amplia, lo que se traduce en un incremento significativo de la capacitancia específica, alcanzando un valor de $285 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, incluso cuando la ventana de trabajo se desplaza hacia potenciales más negativos. Este comportamiento confirma que el electrolito alcalino proporciona una interacción más eficiente entre los iones y la superficie del electrodo. En conjunto, estos resultados reafirman que NaOH es el electrolito más adecuado para los carbones derivados del pseudotallo de banano activados a $800 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que maximiza la accesibilidad iónica hacia los microporos generados durante la activación con KOH (Páez-Sánchez et al., 2024).

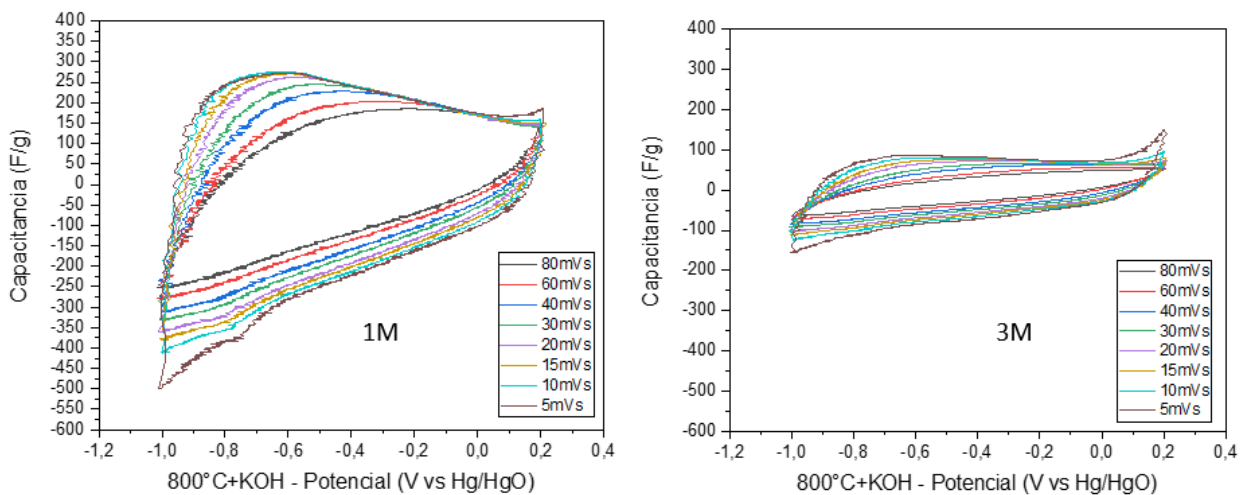
La respuesta de la corriente a un potencial fijo en la técnica de voltamperometría cíclica puede describirse como la superposición de dos contribuciones, de acuerdo con el método propuesto por Dunn: una asociada a efectos capacitivos superficiales (i_{CAP}) y otra vinculada a procesos controlados por difusión iónica (i_{DIF}), según la relación $i(v) = k_1v + k_2v^{1/2}$, donde v corresponde a la velocidad de barrido. En este contexto, la contribución i_{CAP} está relacionada con el mecanismo de almacenamiento de carga electrostático, asociado a la adsorción y desorción reversible de los iones Na^+ , OH^- y SO_4^{2-} en la interfaz electrodo/electrolito (Chen et al. 2022). Para el medio neutro, se determinó que a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ la contribución al almacenamiento de carga se distribuye en un 65,18 % de procesos controlados por difusión y un 34,82 % de procesos de tipo EDLC. En el electrolito ácido, se obtuvo una contribución del 59 % asociada a procesos difusionales o pseudocapacitivos y del 41 % atribuida a procesos capacitivos, observándose además una tendencia general en estos medios a que, con el incremento de la

temperatura, el mecanismo de almacenamiento evoluciona desde un régimen dominado por difusión hacia uno con mayor carácter capacitivo. En el caso del medio alcalino, se identificó una configuración más equilibrada, donde aproximadamente el 50,55 % de la contribución corresponde a procesos controlados por difusión y el 49,45 % a procesos de tipo EDLC. Cabe destacar que esta contribución incluye la pseudocapacitancia asociada a la transferencia de carga en o cerca de la superficie del electrodo, originada por reacciones rápidas de oxidación y reducción que involucran la inserción y extracción reversible de iones OH^- . Este balance entre mecanismos capacitivos y difusionales explica el desempeño electroquímico superior observado en NaOH para el electrodo activado a 800 °C.

Apéndices E Evaluación de la concentración de NaOH.

Inicialmente se evaluó la influencia de la concentración del electrolito sobre el comportamiento electroquímico del electrodo activado a 800 °C. A continuación, la Figura 12 compara el CV en NaOH 1 M y 3 M, mostrando una disminución del área del voltamograma al incrementar la molaridad del medio, lo que se traduce en una pérdida o disminución de la capacitancia.

Figura 12. (a) CV en NaOH 1 M, (b) CV en NaOH 3M



Este comportamiento se asocia a una mayor disponibilidad de iones OH^- y a un aumento de la resistencia iónica en la solución, lo que dificulta el acceso y la difusión dentro de los microporos. Sin embargo, posee una forma capacitiva más estable, lo cual indica que la estructura del electrodo conserva su integridad en condiciones más concentradas (K et al., 2016).

Apéndices F. Comparación de la capacitancia específica de electrodos carbonosos obtenidos a partir de biomasa reportados en la literatura y del electrodo desarrollado en este trabajo

Artículo / Autor (Año)	Biomasa precursora	Agente de activación	Capacitancia específica por CV	Capacitancia específica por GCD	Electrolito / concentración
Este trabajo	Pseudotallo de banano	KOH	333 F/g a 5 mV s⁻¹	291,6 F/g a 0,25 A g⁻¹	NaOH (1 M)
Taer et al. (2017)	Cáscara de banano	KOH	68 F/g a 1 mV s ⁻¹	No reportado numéricamente	H ₂ SO ₄ (1 M)
Rahmah et al. (2017)	Cáscara de banano	KOH (25%)	No reportado	72,93 F/g a 500 mA g ⁻¹	KOH (35%)
Taer et al. (2018)	Tallo de banano	KOH (0,5 M)	170 F/g a 1 mV s ⁻¹	No reportado numéricamente	H ₂ SO ₄ (1 M)
Subramanian et al. (2007)	Fibras de banano	ZnCl ₂ (10%)	86 F/g a 5 mV s ⁻¹	74 F/g a 0,5 A g ⁻¹	Na ₂ SO ₄ (1 M)
Fasakin et al.	Cáscara de banano	KOH	Reportado en gráfica	115 F/g a 0,5 A g ⁻¹	NaNO ₃ (1 M)
Chaitra et al. (2016)	Fibras de banano	KOH	324 F/g a 10 mV s ⁻¹	112,8 F/g a 5 A g ⁻¹	KOH (1 M)
Taer et al. (2021)	Fibras de tallo de banano	ZnCl ₂	179 F/g a 1 mV s ⁻¹	Reportado en gráfica	H ₂ SO ₄ (1 M)
Hou et al. (2014)	Salvado de arroz	KOH	Reportado en gráfica	265 F/g a 10 A g ⁻¹	KOH (6 M)
Zhang et al. (2018)	Agar	KOH	~240 F/g a 10 mV s ⁻¹	226 F/g a 1 A g ⁻¹	KOH (6 M)
Bello et al.	Cono de pino	KOH	No reportado	137 F/g a GCD	Na ₂ SO ₄ (1 M)
Lobato-Peralta et al. (2020)	Hojas de Agave	K ₂ CO ₃	>150 F/g (CV/EIS)	150 F/g a 0,05 A g ⁻¹	H ₂ SO ₄ (1 M)

Apéndices G Parámetros Electroquímicos

La evaluación del desempeño de un supercapacitor se fundamenta en parámetros electroquímicos que permiten cuantificar su capacidad de almacenamiento de carga, su eficiencia y su estabilidad en el tiempo. Estos parámetros se determinan experimentalmente a partir de técnicas como la voltamperometría cíclica (CV), la carga–descarga galvanostática (GCD) y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

Ecuación A1. Capacitancia específica

La capacitancia específica (C_s) expresa la capacidad de almacenamiento de carga por unidad de masa del material activo (F/g). Se calcula a partir de:

- *Voltamperometría cíclica (CV):*

$$C_s = \frac{1}{2m \Delta V v} \int |I(V)| dV$$

donde m es la masa del electrodo activo, ΔV el rango de potencial, v la velocidad de barrido y $I(V)$ la corriente.

- *Carga–descarga galvanostática (GCD):*

$$C_s = \frac{I \Delta t}{m \Delta V}$$

donde I es la corriente aplicada, Δt el tiempo de descarga y ΔV el intervalo de potencial corregido por el IR drop.

Ecuación A2. Densidad de energía y densidad de potencia

A partir de la capacitancia y el voltaje operativo, se determinan dos parámetros fundamentales:

- *Energía específica (E):*

$$E = \frac{1}{2} C_s (\Delta V)^2$$

Expresada en Wh/kg, cuantifica la energía almacenada.

- **Potencia específica (P):**

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

expresada en W/kg, describe la rapidez con la que el sistema entrega la energía.

La relación entre **E** y **P** suele representarse en un **diagrama de Ragone**, que permite comparar supercapacitores con baterías y otros sistemas de almacenamiento.

Ecuación A3. Eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica (η) se define como la relación entre la carga descargada y la carga almacenada en un ciclo:

$$\eta = \frac{Q_{descarga}}{Q_{carga}} \times 100$$

En sistemas ideales, su valor se aproxima al 100 %, reflejando reversibilidad en el proceso.

Apéndices H Espectroscopia Raman

Tabla De Resultados De Áreas E Intensidad Obtenidos En Cada Espectro

Carbon	Area Band D	Area band G	<i>FWHM(D)</i> <i>/ FWHM(G)</i>	ID	IG	<i>ID/IG</i>	<i>IG/ID</i>
<i>500°C</i>	24646,80439	18006,4517	<i>1,37</i>	164,9235	220,9748	<i>0,75</i>	<i>1,34</i>
<i>600°C sin KOH</i>	14861,97284	11145,64449	<i>1,33</i>	91,035	114,9066	<i>0,79</i>	<i>1,26</i>
<i>600°C con KOH</i>	12268,42285	9028,74591	<i>1,36</i>	74,202	88,3695	<i>0,84</i>	<i>1,19</i>
<i>800°C sin KOH</i>	5789,232605	4000,525191	<i>1,45</i>	37,2156	35,4136	<i>1,05</i>	<i>0,95</i>
<i>800°C con KOH</i>	8624,649026	5525,676501	<i>1,56</i>	58,2852	54,6015	<i>1,07</i>	<i>0,94</i>
<i>1000°C sin KOH</i>	3842,020111	2458,065145	<i>1,56</i>	24,9872	24,0449	<i>1,04</i>	<i>0,96</i>
<i>1000°C con KOH</i>	5086,426911	3368,944557	<i>1,51</i>	33,5314	33,7358	<i>0,99</i>	<i>1,01</i>

Apéndice H. Espectros XPS generales

Surveey de muestras sin activar y muestras activadas

