

Evaluación de la eficiencia de remoción de tintes contaminantes sobre materiales adsorbentes de C/TiO₂ generados a partir de residuos agroindustriales

Álvaro Andrés Cano Carrascal

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero metalúrgico

Directora

Dra. Elcy María Córdoba Tuta

Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirectora

Ing. Edith Johanna Díaz Cañas

Ing. Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis amados padres

Agradecimientos

A la profesora Elcy María Córdoba Tuta, por su valioso apoyo desde el inicio y fin del proyecto, a inspirarme en la investigación y compartir sus experiencias y conocimiento conmigo.

A la Ing. Edith Johanna Díaz Cañas, por su acompañamiento durante la etapa experimental del proyecto, su ayuda y colaboración.

Al grupo de investigación GIMAT, sus integrantes, como Oswaldo Bueno, Laura León, y demás compañeros que contribuyeron al proyecto, al grupo y a ustedes mil gracias.

A los Técnicos de laboratorio, quienes en ocasiones hicieron un esfuerzo de mas para colaborarme.

A mi amigo Carlos Tobar que de manera voluntaria y generosa me acompañó durante mi vida universitaria.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente trabajo de grado, a través del proyecto de investigación titulado APROVECHAMIENTO DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES 3D DE CARBONO/N-TiO₂ PARA LA LIMPIEZA DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE UN MECANISMO HÍBRIDO DE ADSORCIÓN-FOTOCATÁLISIS, identificado con código VIE 3730.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Fundamentación teórica	15
2.1 Naranja metilo.....	15
2.2 Adsorción y materiales adsorbentes.....	15
2.2.1 Vías de adsorción	17
2.2.2 Sitios de adsorción	17
2.2.3 Bioadsorbentes.....	18
2.3 Isotermas de adsorción.....	19
3. Metodología	21
3.1 Síntesis del compuesto C/TiO ₂	21
3.1.1 Preparación de la materia prima	22
3.1.2 Preparación del sol de TiO ₂ modificado con N	22
3.1.3 Preparación de la resina de sacarosa.....	22
3.1.4 Obtención de los sistemas C/TiO ₂	23
3.2 Caracterización morfológica y composicional de los sistemas C/TiO ₂	23
3.3 Evaluación de la capacidad de adsorción de los compuestos de C/TiO ₂	23
3.4 Evaluación de las isotermas de adsorción.....	24
4. Resultados.....	24

4.1 Caracterización morfológica y composicional de los materiales compuestos desarrollados .	25
4.1.1 Espectroscopía Raman.....	25
4.1.2 Difracción de rayos x.....	26
4.1.3 Espectroscopía infrarroja (FTIR).....	28
4.1.4 Morfología de los desechos agroindustriales utilizados y de los carbones obtenidos	30
4.2 Adsorción de naranja metilo.....	33
4.2.1 Capacidad de adsorción de NM de los bagazos de banano y de plátano.....	33
4.2.2 Capacidad de adsorción de NM de los vástagos de banano y de plátano.....	35
4.3 Isotermas de adsorción.....	37
Conclusiones.....	41
Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas	43
Apéndices.....	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros derivados de las isothermas de adsorción 40

Lista de Figuras

Figura 1. Espectros Raman para los compuestos obtenidos a partir de bagazo de banano (BB) .	25
Figura 2. Difractogramas de rayos X para algunos de los carbones obtenidos a partir de desechos de la planta de banano.....	27
Figura 3. Espectros FTIR para los compuestos obtenidos a partir de bagazo de banano (BB)	29
Figura 4. Espectros FTIR para los compuestos obtenidos a partir de vástago de banano (BB) ...	30
Figura 5. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano en verde.....	31
Figura 6. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano secos.....	31
Figura 7. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano carbonizados	31
Figura 8. Micrográficas SEM de algunos de los sistemas desarrollados	32
Figura 9. Eficiencia de remoción de NM de los compuestos BB y BP	34
Figura 10. Capacidad de adsorción de los compuestos BB y BP	35
Figura 11. Eficiencia de remoción de NM de los compuestos VB y VP.....	36
Figura 12. Capacidad de adsorción de los compuestos VB y VP.....	37
Figura 13. Curvas de adsorción de NM a diferentes concentraciones sobre BB-50TiO ₂	38
Figura 14. Ajuste de las isotermas de adsorción.....	39

Lista de Apéndices

Apéndice A. Planta musácea.....	52
Apéndice B. Bagazo y vástago	52
Apéndice C. Esquema de la metodología Sol TiO ₂	53
Apéndice D. Montaje ensayos de adsorción por lote.....	53
Apéndice E. Espectros FTIR para los compuestos BP	54
Apéndice F. Espectros FTIR para los compuestos VP	54
Apéndice G. Curva de calibración naranja metilo	55
Apéndice H. Comparación zona de bagazo del banano y plátano	55

Resumen

Título: Evaluación de la eficiencia de remoción de tintes contaminantes sobre materiales adsorbentes de C/TiO₂ generados a partir de residuos agroindustriales *

Autor: Álvaro Andrés Cano Carrascal**

Palabras Clave: Adsorción, TiO₂, Residuos agroindustriales.

Descripción: Los procesos de adsorción que consisten en la unión de un adsorbato (contaminante) sobre un adsorbente (material), conforman un enfoque amplio para la remediación de colorantes de aguas residuales contaminadas; sin embargo, fabricar ecológicamente y a un bajo costo un adsorbente altamente eficiente ha sido problemático, en altos costos y limitaciones operacionales. En este trabajo se informa sobre la preparación de un bioadsorbente a partir de residuos agroindustriales abundantes de las plantas musáceas, banano y plátano, en combinación con solución de TiO₂. El material se preparó con la impregnación de mezclas de resina sacarosa y sol de TiO₂ obteniendo un material tridimensional con gran y variable porosidad. Los materiales desarrollados fueron caracterizados por técnicas de microscopía óptica confocal, microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía por infrarrojo (FTIR) y Raman. El bioadsorbente presentó un buen comportamiento, alcanzando una capacidad de adsorción de naranja de metilo de 16.3 mg/g, a una concentración inicial de 100 ppm, para el carbón obtenido con bagazo de banano impregnado en resina de sacarosa con 50%v/v sol de TiO₂. Tal capacidad de adsorción del carbón tridimensional BB-50TiO₂ es comparable con la de muchos adsorbentes en polvo, por lo que se puede considerar como un material para la remediación de aguas residuales de la industria textil.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Directora: Elcy María Córdoba Tuta. Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales. Codirectora: Edith Johanna Díaz Cañas. Ingeniera Química.

Abstract

Title: Evaluation of the removal efficiency of pollutant dyes on C/TiO₂ adsorbent materials generated from agroindustrial waste.*

Author: Álvaro Andrés Cano Carrascal**

Key Words: Adsorption, TiO₂, Agroindustrial residues.

Description: The adsorption processes consist of the union of an adsorbate (pollutant) on an adsorbent (material), make up a broad approach for the remediation of dyes from contaminated wastewater; however, manufacturing a highly efficient adsorbent ecologically and at low cost has been problematic, with high costs and operational limitations. This paper reports on the preparation of a bioadsorbent from abundant agroindustrial residues of musáceas, banana and plantain plants, in combination with TiO₂ solution. The material was prepared with the impregnation of mixtures of sucrose resin and TiO₂ sol, which derived into a three-dimensional material with great and variable porosity. The materials developed were characterized by confocal optical microscopy techniques, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (FTIR) and Raman. The bioadsorbent behaved well, reaching a methyl orange adsorption capacity of 16.3 mg/g, at an initial concentration of 100 ppm, for the carbon obtained with banana bagasse impregnated with sucrose resin with 50% v/v sol from TiO₂. Such adsorption capacity of three-dimensional carbon BB-50TiO₂ it is comparable to that of many powdered adsorbents, Therefore, it can be considered as a material for the remediation of wastewater from the textile industry.

*Degree Work

**Faculty of Physical Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Advisers: PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Eng. Edith Johanna Díaz Cañas.

Introducción

El agua es un recurso fundamental para los seres vivos y el ecosistema del planeta, sin embargo, aproximadamente 4 mil millones de personas tienen limitaciones para obtenerla, por lo menos, un mes al año. Lo anterior, más la degradación de las fuentes hídricas por parte de contaminantes producto de actividades industriales, mineras, agrícolas, etc., desfavorece el sexto objetivo de desarrollo sostenible: agua limpia y saneamiento, el cual tiene como meta general para el 2030, lograr acceso universal y equitativo al agua potable (UNESCO, 2020).

El uso del agua en el sector industrial se estima que aumentará en un 53% para el año 2050, en comparación del 2010 (UNESCO, 2020), particularmente la industria textil es una de las mayores consumidoras de agua y generadora de aguas residuales con presencia de colorantes utilizados en el proceso de teñido (Brañez Sánchez et al., 2018), en Colombia, para el año 2020 las industrias de textiles, confección, calzado y pieles generó 9.6 millones de m³ de aguas residuales, de las cuales solo fueron tratadas el 81.1% (DANE, 2022).

Estas aguas residuales, cuando son vertidas al suelo o fuentes hídricas sin ningún tratamiento causan un desbalance de nutrientes, pérdida de fertilidad en los suelos y afectación de la flora y fauna (Cárdenas, 2019). Entre los tratamientos de aguas residuales actuales se encuentran: tratamiento físico, químico o biológico, tratamientos de oxidación química, lodos activados, floculación y precipitación. Sin embargo, estos tratamientos tienen elevados costos y limitaciones operacionales (Russell, 2012).

Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil es por el método físico de adsorción, que dependiendo como se diseñe y emplee, puede resultar una opción económica para la limpieza de aguas. La adsorción ha servido para extraer contaminantes orgánicos/inorgánicos presentes en efluentes de aguas (Yagub et al., 2014). Una ventaja de este

tratamiento con respecto a los otros procesos es la simplicidad de su operación; sin embargo, los materiales adsorbentes que se usan actualmente todavía son considerados costosos, como lo son las zeolitas y arcillas de bentonita, por lo que se ha buscado el reemplazo de estos materiales por otros que puedan ser obtenidos de fuentes abundantes y de bajo costo (Li et al., 2019). En tal sentido, los residuos agroindustriales resultan llamativos para esta aplicación.

El sector agroindustrial genera residuos en gran cantidad, los cuales rinden una elevada cantidad de materia orgánica como consecuencia de su actividad fotosintética en la tierra, no obstante, solo una pequeña porción es consumida de forma directa por los humanos y/o animales. Se estima que solamente entre el 2 y el 50 % de la biomasa producida es aprovechada (Cury R et al., 2017). Los residuos que no pueden ser consumidos como el bagazo de caña de azúcar, residuos de café, del maíz, entre otros, son usados para la producción de hongos, papel, etanol y reemplazo del carbón en hornos, todos estos con generación en mayor o menor medida de gases de efecto invernadero. Actualmente hay un sin número de investigaciones enfocadas a darle otro uso a estos residuos, como materiales bioadsorbente, pues reduciría los costos del proceso de adsorción (Singh et al., 2020).

Un tipo de residuo típico de la agroindustria son aquellos provenientes de las plantas musáceas conformados por diferentes especies, las más comunes son los llamados plátano y banano. En Colombia, entre los años 2020 y 2021, la producción anual de la combinación de tales frutos fue de aproximadamente 6 millones de toneladas (Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales, 2020; 2021). La producción de estos frutos lleva a la generación de residuos que son descartados, dejando problemas ambientales (Granda R et al., 2005), pues estos pueden causar gases de efecto invernadero si son desechados en fuentes fluviales en condiciones húmedas, además de formar metano y otros gases (Ahmad & Danish, 2018). El volumen y masa de mayor

impacto de estas plantas son de la parte del pseudotallo (ver apéndice A) esta zona es semejante a un tronco de árbol, por lo que resulta de interés encontrar formas de aprovechamiento de tales residuos.

En consecuencia, se ha investigado sobre la preparación de materiales adsorbentes a partir de desechos orgánicos de bajos costos, como los residuos de las plantas musáceas para la adsorción de tintes (Ma et al., 2015a), pesticidas (Salman et al., 2011), residuos líquidos de la industria del tofu (Budhiary & Sumantri, 2021), metales pesados (Khairiah et al., 2021), etc. A la par se realizan estudios sobre la modificación de materiales adsorbentes con arcillas, metales y óxidos metálicos (Misran et al., 2022).

Algunas investigaciones, han encontrado un efecto sinérgico en la combinación de carbono y TiO₂ que favorece la adsorción de tintes contaminantes (Simonetti et al., 2016), se ha encontrado que el TiO₂ ayuda a aumentar el área superficial, es estable en condiciones ácidas y presenta un número significativo de sitios de adsorción en la superficie (Modwi et al., 2023). Además, el TiO₂ si es soportado en un sustrato carbonoso es fácil de recuperar del agua contaminada en comparación a si estuviera como polvo fino (Lee & Park, 2013).

Por todo lo anterior, se planteó como alcance de la presente investigación desarrollar un material adsorbente carbonoso a partir de residuos agroindustriales y modificado con TiO₂, evaluando la capacidad de adsorción del compuesto sintetizado en soluciones de naranja de metilo, contaminante orgánico presente en aguas residuales de la industria textil.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Evaluar la eficiencia de compuestos C/TiO₂ sintetizados a partir de residuos agroindustriales para adsorber tintes contaminantes.

1.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar materiales carbonosos modificados con TiO₂ a partir del tallo de la planta de plátano.
- Evaluar las características morfológicas y fisicoquímicas de los materiales de C/TiO₂ desarrollados.
- Determinar la capacidad de los materiales C/TiO₂ sintetizados para adsorber tintes contaminantes.

2. Fundamentación teórica

2.1 Naranja metilo

El naranja metilo, con fórmula molecular C₁₄H₁₄N₃O₃, es un colorante sintético, del grupo azo (N=N), utilizado comúnmente como indicador de pH y como molécula modelo, en estudios de degradación fotocatalítica de contaminantes en aguas (Iwuozor et al., 2021). Tal colorante posee baja biodegradabilidad, pero aun así es muy utilizado en la industria textil por su bajo costo a comparación de tintes naturales, lo que es preocupante para la ciencia ambiental. La intoxicación con este colorante puede generar vómito y diarrea, y a altos niveles de exposición puede provocar la muerte; es así como se ha encontrado que el naranja de metilo puede tener efectos cancerígenos en el ser humano. En fuentes hídricas afecta el crecimiento de bacterias y su actividad biológica, así mismo consume oxígeno por lo que perjudica la vida acuática (Farhan Hanafi & Sapawe, 2020).

2.2 Adsorción y materiales adsorbentes

La adsorción es un fenómeno reversible basado en la unión física o química de un adsorbato sobre un adsorbente, comúnmente la atracción física domina la adsorción por fuerzas de Van der Waals, por lo que se puede dar adsorción de varias capas sobre la superficie y sitios de alta energía (Pourhakkak et al., 2021).

Los materiales adsorbentes son capaces de secuestrar contaminantes de fluidos en contacto con su superficie por medio del confinamiento fisicoquímico de los elementos potencialmente tóxicos (EPT). Existen materiales nanoestructurados como el grafeno, óxido de grafeno y nanotubos de carbonos que comúnmente muestran altas tasas de adsorción acompañada de una rápida cinética, pero sus procesos de síntesis son de alto costo (Zheng et al., 2020).

La utilización a gran escala de materiales adsorbentes requiere que puedan lograr altas tasas de remoción acompañado de un proceso de bajo costo. Los materiales que tienen potencial para cumplir estas condiciones son los fabricados a partir de biomasa, biocarbones, entendiéndose como biocarbón, el carbón derivado del proceso de pirolisis de biomasa en un entorno limitado de oxígeno, y que cumple con la condición de bajo costo por el hecho de ser obtenido a partir de recursos naturalmente abundantes (Bhatnagar & Sillanpää, 2010).

La adsorción de EPT que pueden brindar estos materiales varía ampliamente y depende en gran medida de sus características superficiales, como el área superficial y porosidad. En general estos materiales están compuestos de celulosa, lignina, quitina y sacarosa, que son materiales sostenibles, biodegradables y no tóxicos (Chi et al., 2020).

Una de las principales líneas de investigación en la temática de los materiales adsorbentes es la modificación de estos mediante la activación con ácidos, bases, compuestos orgánicos y agentes oxidantes. Se ha encontrado que la modificación con bases aumenta la carga negativa de la superficie del adsorbente, lo que provoca un aumento en la atracción electrostática con los cationes de los EPT. En general los tratamientos químicos estimulan la apertura de sitios de adsorción, eliminan elementos minerales y mejoran la naturaleza hidrófila de la superficie (Han et al., 2022).

Una de las alternativas más prometedoras es la modificación del material adsorbente con una densidad óptima de grupos funcionales. La lignina, el quitosano la celulosa y la sacarosa contienen cuantiosos grupos funcionales como el amino (-NH₂), el tiol (-SH) y el hidroxilo (-OH) que actúan como sitios efectivos de adsorción (Han et al., 2022).

2.2.1 Vías de adsorción

Se tienen varias vías de adsorción, entre ellas, la quimisorción que comprende los procesos de intercambio iónico, complejación superficial, precipitación, enlace de hidrógeno, coordinación e interacción catión- π . Otra vía de adsorción es la fisisorción, que comprende los procesos de interacción electrostática y fuerzas de van der Waals. Esta vía de adsorción es débilmente específica y reversible, por su parte, la quimisorción es selectiva y no fácilmente reversible (Han et al., 2022).

Estas vías de adsorción se ven afectadas por varios factores, por ejemplo, la atracción electrostática disminuye con el aumento de la fuerza iónica afectando la fisisorción, mientras el intercambio iónico aumenta con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los materiales adsorbentes, favoreciendo la quimisorción. La atracción electrostática y la capacidad de intercambio iónico están correlacionados con el pH de las aguas residuales, cuando se tiene un pH bajo y la superficie del adsorbente está cargada positivamente habrá atracción electrostática a los colorantes aniónicos, en cambio, al aumentar el pH, se tendrá una disminución en la eficiencia de adsorción hacia los aniones del colorante, por el aumento de los grupos hidroxilos en la superficie. (Yegane Badi et al., 2018).

Para los sitios de intercambio iónico, estos se protonan en pHs bajos por lo que bajo tal condición se favorece la adsorción de colorantes catiónicos por intercambio catiónico (Han et al., 2022).

2.2.2 Sitios de adsorción

Los materiales adsorbentes pueden tener diferentes sitios de adsorción, los cuales pueden ser macroporosos, con un tamaño de diámetro mayor a 50 nm, mesoporosos, con un rango de diámetro entre 2 y 50 nm, y microporosos, con un diámetro menor a 2 nm (Uribe et al., 2013). La microporosidad en los materiales aumenta el área superficial, lo que mejora la adsorción física,

mientras que la mesoporosidad favorece la difusión, acelerando la cinética de adsorción (Han et al., 2022).

Se busca que estos sitios tengan mayor preferencia hacia los EPT respecto a otras moléculas, se ha encontrado que las superficies con propiedades donadoras de electrones actúan como base de Lewis, efectivas para mejorar la capacidad de adsorción (Han et al., 2022).

Las propiedades eléctricas de la interfase del material adsorbente se ven influenciadas por la carga y valencia de los EPT, los iones cargados positivamente van a tener tendencia a unirse electrostáticamente con grupos funcionales cargados negativamente y viceversa (Han et al., 2022).

2.2.3 Bioadsorbentes

Se llaman bioadsorbentes a aquellos materiales que provengan de biomasa, sometidos a carbonización, la cual es la descomposición térmica de biomasa en un entorno con oxígeno limitado para producir biocarbón, el cual es un material rico en carbono y adsorbente. Las propiedades de estos materiales son fuertemente afectadas por los parámetros de síntesis, como la temperatura de carbonización, el tiempo de sostenimiento de la carbonización y el tipo de residuo vegetal. En ciertos casos se le adicionan grupos funcionales en la superficie del bioadsorbente y esto mejora sus capacidades de adsorción. Comúnmente estos materiales cuentan con celulosa como la lignina y hemicelulosa, que refleja la aparición de múltiples grupos funcionales, como los -OH, -C=O y -COOH, lo que permite que estos materiales sean candidatos potencialmente adsorbentes de iones de metales pesados, inorgánicos y moléculas de colorantes (Tee et al., 2022).

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se pudo constatar el uso de carbón a partir de residuos de banano y plátano con TiO₂ para la adsorción y fotodegradación de tintes contaminantes. Uno de los trabajos es el de (Anita et al., 2021), en este, los autores usaron la

cascara de plátano con TiO₂ para la adsorción de tintes azul de metileno y naranja metilo, el residuo se preparó como carbón activado molido usando NaOH y se impregno con TiO₂, el ensayo de adsorción para cada muestra fue de una hora, se concluyó que para el azul de metileno el material compuesto tuvo una capacidad de adsorción de 24.9 mg/g. Los análisis por FT-IR mostraron la presencia de grupos funcionales como Ti-O-C, Ti-O-Ti, O-H, C=C y el C-O.

Otro trabajo realizado es el de (Teoh et al., 2021), en donde usaron cascara de plátano como carbón activado usando KOH mezclado con TiO₂ por el método sol-gel, se usaron 3 relaciones de % peso del carbón activado respecto al TiO₂, 20, 50 y 70%, para la eliminación del naranja metilo mediante ensayos fotocatalíticos, cada ensayo se mantuvo por 5 horas donde los primeros 90 minutos se mantuvo en oscuridad para garantizar el equilibrio de adsorción en el compuesto, se observó que el material compuesto por 50% en peso de carbón tuvo el mayor % de degradación alcanzando 72.5% de remoción finalizado el ensayo, por lo que concluyen que el compuesto sirve para la remediación de aguas residuales especialmente las contaminadas por colorantes. Los análisis de difracción de rayos x mostraron picos asociados a planos cristalinos de anatasa y en pequeño porcentaje rutilo, los análisis de espectroscopia de energía dispersa (EDS) registraron carbono, oxígeno, titanio y trazas de magnesio, fósforo, potasio y silicio.

2.3 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se usan para determinar el mecanismo del proceso de adsorción y el área superficial efectiva, mediante la descripción y evaluación de la capacidad de adsorción, indicando la relación entre el adsorbente y el adsorbato. De las diferentes ecuaciones empíricas investigadas, las ecuaciones de Langmuir y de Freundlich son las más utilizadas para relacionar el proceso de adsorción (Gan et al., 2019). El modelo de Langmuir supone la formación de una

monocapa de adsorbato homogénea sobre el adsorbente, lo que hace indicación que el adsorbente utilizado exhibe un número finito de sitios activos similares para la interacción con el adsorbato, la ecuación de Langmuir se expresa como (Ray et al., 2020):

$$Q_e = \frac{Q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (1)$$

Donde:

C_e (mg/g): cantidad de adsorbato que queda en la solución en equilibrio.

Q_e (mg/g): cantidad de adsorbato (mg) adsorbido por unidad de adsorbente (g).

Q_m (mg/g): capacidad máxima de adsorción.

K_L (L/mg): constante de Langmuir.

La ecuación de Langmuir se puede expresar en alguna de las siguientes dos ecuaciones lineales:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} \cdot C_e + \frac{1}{Q_m \cdot K_L} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{K_L \cdot Q_m} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m} \quad (3)$$

De (3) se puede calcular Q_m y K_L , utilizando los valores de intersección y pendiente del gráfico $\frac{1}{Q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$ y con K_L y la concentración inicial (C_o) se calcula el factor de separación R_L , ecuación (4), el cual indica si el método de adsorción es favorable, esto cuando $0 < R_L < 1$, o desfavorable, cuando $R_L > 1$.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_o} \quad (4)$$

Para la isoterma de Freundlich, esta supone sistemas de adsorción heterogéneas, en donde el adsorbente exhibe sitios de superficie activos, con distribución no uniforme de energía. Esta isoterma sigue la tendencia a formar una multicapa de adsorbato sobre el adsorbente. Se expresa como (Azizian & Eris, 2021):

$$Q_e = K_f \cdot (C_e)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Y se puede modificar a una ecuación lineal como sigue:

$$\ln Q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \cdot \ln C_e \quad (6)$$

Donde:

K_f : capacidad de adsorción (mg/g) del adsorbente.

n : intensidad de adsorción.

La gráfica de adsorción se traza entre $\ln Q_e$ y $\ln C_e$ para calcular “ K_f ” y “ n ” a partir de la intersección y la pendiente respectivamente. Un valor mayor a $\frac{1}{n}$ hace indicación de que el adsorbente funciona bien para soluciones de alta concentración, mientras un valor menor a $\frac{1}{n}$ muestra potencial de la capacidad de adsorción del adsorbente para soluciones de baja concentración.

La constante de regresión lineal R^2 ayuda a constatar qué isoterma de adsorción es apropiada para explicar el comportamiento de adsorción (Ray et al., 2020).

3. Metodología

Con el fin de realizar la evaluación de adsorción del material sintetizado y los respectivos análisis de caracterización, se ejecutaron las siguientes etapas y actividades experimentales.

3.1 Síntesis del compuesto C/TiO₂

Se evaluaron los residuos de dos variedades de plantas musáceas, conocidas comúnmente como plantas de plátano y banano. La mayor cantidad de residuos de estas plantas proviene del pseudotallo (ver Apéndice A), motivo por el cual los residuos evaluados son de esta zona, la cual

tiene dos áreas características bagazo y vástago (ver Apéndice B), la primera ubicada en las zonas intermedias y externas, la segunda ubicada en la zona central del pseudotallo. Por lo tanto, como materia prima para los compuestos se usó las dos variedades de planta musácea, plátano, banano y las dos zonas características del pseudotallo, bagazo y vástago.

3.1.1 Preparación de la materia prima

Las muestras extraídas de las zonas de bagazo fueron cortadas a un tamaño de 2 cm de largo, 3 cm de ancho y un espesor de 0.55 cm de espesor mientras que aquellas tomada de las zonas del vástago tuvieron dimensiones de 2 cm x 2 cm x 2 cm. Para ambas se realizó el proceso de secado en estufa a 80 °C durante 5 horas, con rampa de calentamiento de 1 °C/min.

3.1.2 Preparación del sol de TiO₂

En el Apéndice C se muestra un esquema del procedimiento utilizado para la preparación de los soles, replicando la metodología previamente desarrollada (Castellanos et al., 2019). El sol de TiO₂ se preparó a partir de una solución con 5 mL del precursor, tetraisopropóxido de titanio (Aldrich, 97%) y 5 mL del solvente isopropanol (J.T. Baker, 99,6%), esta solución fue agregada gota a gota en una segunda solución de 30 mL de ácido nítrico (Merck, 65%) a 0,2 M, utilizado como catalizador, y 4 mL del agente acomplejante, acetilacetona (Sigma-Aldrich, 99%). Esta solución se colocó en agitación vigorosa por un periodo de 12 horas y se agregaron 5 mL de trietilamina (Merck, 99%), dejándolo de nuevo en agitación por un periodo de 12 horas, obteniendo el sol traslúcido de TiO₂.

3.1.3 Preparación de la resina de sacarosa

La metodología para la preparación de la resina fue tomada de una anterior investigación desarrollada en el grupo GIMAT (Terán, 2018), esta se preparó a partir de una mezcla con 50 mL

de una solución 2×10^{-3} N de ácido nítrico (Merck, 65%) y 0.4 g/mL de sacarosa (azúcar comercial), calentada a 70 °C durante 48 h y posteriormente diluida con 3 mL de agua desionizada.

3.1.4 Obtención de los sistemas C/TiO₂

El sol de TiO₂ fue mezclado con la resina de sacarosa en las siguientes relaciones (% v/v), 0, 25, 50, 75 y 100 % de sol de TiO₂, en estas mezclas fueron sumergidas las muestras secas de los residuos agroindustriales y dejadas en cámara de vacío durante 10 minutos con el fin de garantizar la impregnación total de los sustratos porosos. Posteriormente, el exceso de líquido se retiró por centrifugación en un equipo “dip-coater” y los sustratos impregnados pasaron a una etapa de curado durante 1 h a 200 °C, utilizando una rampa de calentamiento 1 °C/min, finalmente, las muestras se llevaron a carbonizar durante 1 h a 1000 °C en atmosfera de N₂ con rampa de calentamiento de 5 °C/min.

3.2 Caracterización morfológica y composicional de los sistemas C/TiO₂

Las características morfológicas fueron evaluadas a través de microscopías óptica confocal (Hirox KH-7700) y electrónica de barrido (Quanta FEG 650), su composición mediante técnicas de microanálisis EDS (EDAX Apolo X), espectroscopía Raman (láser 780 nm y potencia de 3mW), espectroscopía infrarroja (CARY 630) en el rango de longitud de onda de 400-4000 cm⁻¹ (técnica de pastillas de KBr) y difracción de rayos X (Bruker D8 Advance).

3.3 Evaluación de la capacidad de adsorción de los compuestos de C/TiO₂

El tinte contaminante utilizado fue naranja de metilo (NM), se preparó una solución madre de 100 ppm la cual se diluyó a 5 ppm para los ensayos, el pH de la solución fue ajustado a 2.4 usando HNO₃ (2 M). Los materiales desarrollados fueron puestos en contacto con 25 mL de la

solución de NM, bajo agitación magnética; durante el ensayo, el sistema se mantuvo bajo oscuridad y se hizo seguimiento de la concentración de la solución a diferentes tiempos: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 y 60 minutos, tomando alícuotas de 3 mL, las cuales se analizaron por espectrofotometría UV-VIS (Thermo Scientific Evolution 220) en un rango de longitud de onda de 200-700 nm. El montaje experimental está esquematizado en el Apéndice D.

3.4 Evaluación de las isothermas de adsorción

Terminados los ensayos de adsorción, y definido el material compuesto con mayor capacidad de adsorción, se procedió a realizar con el material elegido la evaluación de isothermas, variando las concentraciones de NM con 100, 50, y 5 ppm, ajustando la solución a pH 2.4. Los ensayos se llevaron a cabo de manera similar al procedimiento descrito en el numeral anterior, pero prolongando el tiempo de las pruebas a 90 min con el fin de alcanzar las condiciones de equilibrio.

4. Resultados

Tal como se describió en el apartado metodológico, para la presente investigación se desarrollaron diversos materiales tridimensionales en el sistema C/TiO₂, a partir del bagazo y del vástago de los tallos de plantas de banano y plátano, impregnados en resinas compuestas por solución de sacarosa y sol de TiO₂ en diferentes proporciones, tales muestras se rotularon de acuerdo con la siguiente nomenclatura: BB (bagazo de banano), BP (bagazo de plátano), VB (vástago de banano) y VP (vástago de plátano). Así mismo, en los nombres de cada muestra se especifica la composición de la resina de impregnación usada en función de la proporción (%) volumétrica de sol de TiO₂ con respecto a la solución de sacarosa, es decir: 0TiO₂, 25TiO₂, 50TiO₂,

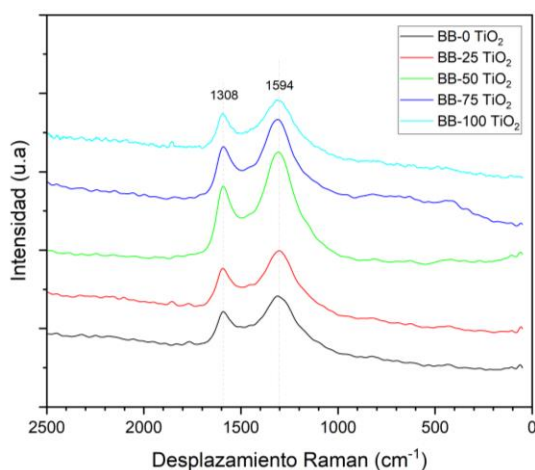
75TiO₂ y 100TiO₂, los cuales se refieren a resinas con contenidos de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% v/v de sol de TiO₂, respectivamente.

4.1 Caracterización morfológica y composicional de los materiales compuestos desarrollados

4.1.1 Espectroscopia Raman.

En la figura 1 se observan los espectros Raman de los materiales desarrollados a partir del bagazo de banano (BB) impregnados con las diferentes resinas de sacarosa-TiO₂. Todas las muestras presentaron bandas de energía a 1308 cm⁻¹ y 1594 cm⁻¹, asociados a los dos modos vibracionales del carbón gráfico. Los anteriores picos están en el rango de las conocidas bandas D y G del carbono, respectivamente (Schmidt et al., 2023). La banda G, denominada banda del grafito, corresponde a la vibración de estiramiento de enlaces de carbono tipo sp², se relaciona con la extensión en la que se repite una determinada estructura dentro de un cristal (Terán, 2018). Por su parte, la banda D está asociada a la ruptura en la repetitividad de la estructura carbonosa y su señal disminuye con el ordenamiento de los planos aromáticos durante el proceso de grafitización (Terán, 2018). En tal sentido, los espectros parecen indicar el inicio de la grafitización del carbón, dada la menor intensidad de la banda D con respecto a la G.

Figura 1. Espectros Raman para los compuestos obtenidos a partir de bagazo de banano (BB)



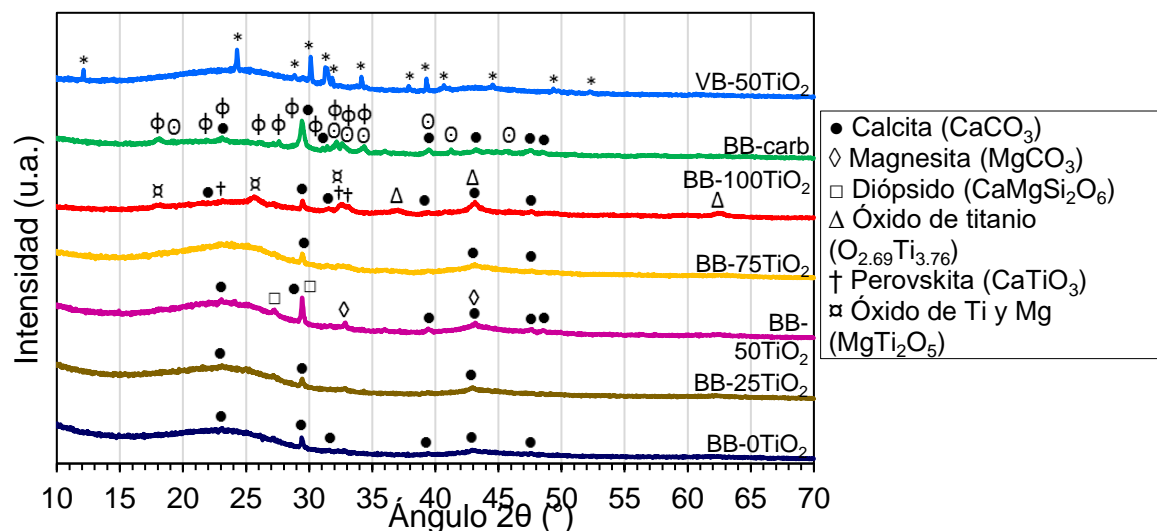
Nota. Espectros Raman de los compuestos de bagazo de banano

4.1.2 Difracción de rayos x

En la figura 2 se comparan los difractogramas correspondientes a las muestras obtenidas con bagazo de banano y las diferentes proporciones de TiO₂ en la resina. En la figura 2 también se presenta el difractograma correspondiente a la muestra de vástago de banano y 50% de TiO₂ en la resina (VB-50TiO₂), así mismo se incluye el difractograma del bagazo de banano carbonizado sin previa impregnación en la resina (BB-carb). Para todas las muestras se evidencia un carácter principalmente amorfo, lo cual era de esperarse teniendo en cuenta que se desarrollaron carbones a partir de dos materias primas orgánicas (residuos vegetales y sacarosa), además la temperatura de carbonización (1000°C) es muy baja como para promover la grafitización de los carbones, pues esta oscila alrededor de los 2500-2700 °C (Liu et al., 2022). Aun así, todos los difractogramas presentan pequeños picos que indican la cristalización, en algún grado, de diversas fases, a partir de las sustancias presentes en los residuos vegetales, la sacarosa y el sol de TiO₂. El difractograma del bagazo de banano carbonizado (BB-carb) evidencia la formación de tres compuestos ricos en calcio, calcita (CaCO₃), silicato di-cálcico (Ca₂SiO₄) y silicato tri-cálcico (Ca₃SiO₅); tanto el silicio como el calcio son elementos típicamente presentes en las plantas musáceas (Faradilla et al., 2022). Ahora bien, el difractograma del carbón obtenido con previa impregnación del bagazo de banano en la resina de sólo sacarosa (BB-0TiO₂) indica que el aporte de carbono de la resina promueve la cristalización del calcio como carbonato, en lugar de los silicatos. Por otro lado, los difractogramas de los carbones desarrollados a partir del bagazo de banano impregnado en resinas de sacarosa con adiciones del 25, 50 y 75% de sol de TiO₂, no muestran la cristalización de fases ricas en titanio, o su proporción es muy pequeña como para ser evidente en los difractogramas. En el difractograma de la muestra BB-50TiO₂ se pueden apreciar picos correspondientes a dos fases adicionales a las ya mencionadas: magnesita (MgCO₃) y diópsido (CaMgSi₂O₆), indicando la presencia de

magnesio en las muestras, dicho elemento proviene también de la materia prima vegetal utilizada (Teoh et al., 2021b) Ahora bien, al impregnar el residuo vegetal en resina compuesta sólo por sol de TiO₂, se obtiene un carbón con mayor contenido de titanio, de tal manera que en su difractograma (BB-100TiO₂) se pueden distinguir picos correspondientes a la cristalización de tres fases ricas en titanio: óxido de titanio (O_{2.69}Ti_{3.76}), perovskita (CaTiO₃) y óxido de Ti y Mg (MgTi₂O₅). No se detectó presencia de rutilo (TiO₂), la cual era la fase esperada dada la temperatura de carbonización (1000°C), fenómeno que puede estar relacionado con el bajo nivel de oxígeno en la atmósfera al interior del horno y con la presencia de carbono proveniente de la resina sacarosa, pues este elemento disminuye la cristalización TiO₂ de anatasa a rutilo (Ansón-Casaos et al., 2015). Finalmente, del difractograma del carbón obtenido a partir del vástago de banano, impregnado en resina mixta de sacarosa y sol de TiO₂ (VB-50TiO₂), se puede inferir que esta parte de la planta concentra el potasio, dado que la identificación de los picos evidencia la clara cristalización de una fase, kalicinita (KHCO₃), este compuesto es un carbonato ácido de potasio, el cual al disolverse en solución cambia la acidez de la misma (Gajda et al., 2016).

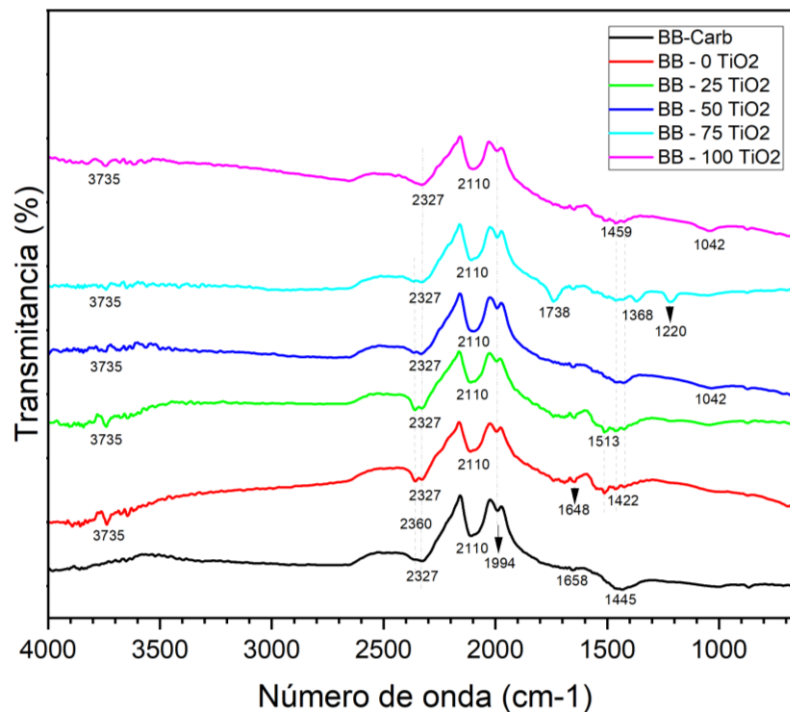
Figura 2. Difractogramas de rayos X para algunos de los carbones obtenidos a partir de desechos de la planta de banano



Nota. Difractogramas de rayos X para los materiales bagazo de banano con las diferentes relaciones del sol TiO₂, el bagazo carbonizado y el VB-50TiO₂

4.1.3 Espectroscopía infrarroja (FTIR)

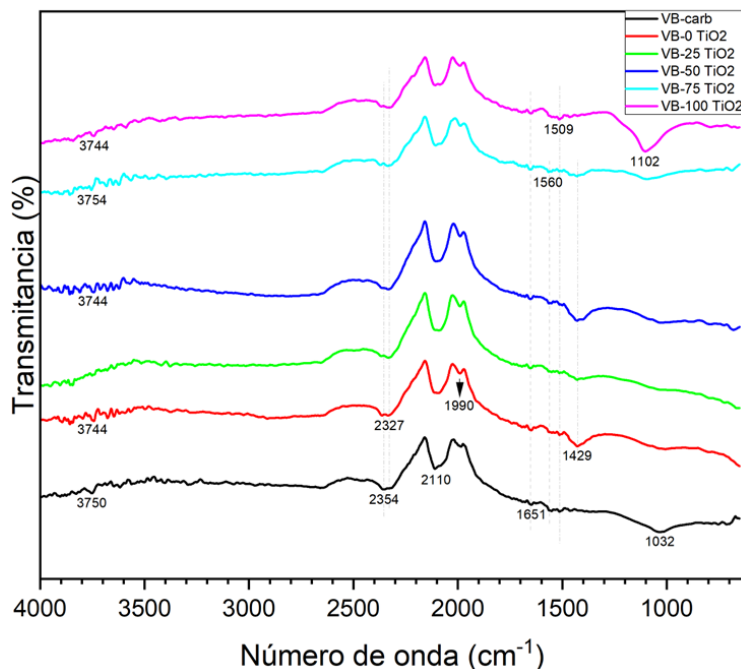
La figura 3 recoge los espectros de las muestras de bagazo de banano carbonizadas previa modificación con las diferentes relaciones de la resina de sacarosa/TiO₂, se observa un pico en común en 2327 cm⁻¹ y en 2360 cm⁻¹, característicos de enlace O=C=O (Strauss et al., 2020), este último pico, disminuye su intensidad en los compuestos con mayor % de sol TiO₂, indicando disminución de los enlaces O=C=O con la presencia del sol. Otras señales relacionadas con el material carbonoso son los picos ubicados a 2110 y 1994 cm⁻¹, los cuales se pueden asociar al grupo carbonilo C=O (Martirosyan et al., 2019), (Smirnova et al., 2022). El pico en aproximadamente 1445 cm⁻¹ corresponde al grupo C-H (Aparna et al., 2022). Otro pico en común, de baja intensidad, se presenta en el rango de 1658-1648 cm⁻¹, probablemente relacionado con el grupo amida I para el modo vibracional C=O (Al-Lafi & AL-Naser, 2022). Los picos entre 3735 y 3344 cm⁻¹, correspondientes al grupo O-H, igualmente son comunes en los diferentes materiales exceptuando al obtenido sin impregnación con resina, lo que indicaría que la presencia de este grupo se deba a las resinas de sacarosa/TiO₂. Por otra parte, se observan algunos picos comunes en los diferentes espectros del material de bagazo de banano, estos están ubicados a 1513 cm⁻¹, asociado al grupo sulfanato o sulfonamida del modo vibracional S=O, 1368 cm⁻¹ de nitrocompuesto del modo vibracional N=O (Sharma & Sharma, 2023), 1459, 1422 y 1220 cm⁻¹ de vibración flexión C-H posiblemente de los grupos CH₃ y CH₂ (Buschhaus & Kleinermanns, 2014). También se identifican picos en 1042 que corresponderían al grupo funcional C-O perteneciente a compuestos de celulosa, hemicelulosa (Naim et al., 2022). Finalmente, vale la pena mencionar que los espectros FTIR no permitieron identificar vibraciones del enlace Ti-O, lo que indicaría un bajo contenido de titanio en los carbones obtenidos con cualquier adición de sol de TiO₂.

Figura 3. Espectros FTIR para los compuestos obtenidos a partir de bagazo de banano (BB)

Nota: Espectros de FTIR para los compuestos de bagazo de banano

Los espectros FTIR para los carbonos obtenidos a partir del vástago de banano (figura 4) mostraron un patrón similar al de los carbonos de bagazo, salvo la presencia de algunas nuevas bandas, tal como la ubicada a 1560 cm⁻¹, posiblemente relacionada con una amida secundaria, grupo N-H acoplado a C-N (Buschhaus & Kleinermanns, 2014). En los espectros de las bandas ubicadas a 1102 y 1032 cm⁻¹ corresponderían al grupo funcional C-O perteneciente a compuestos de celulosa, hemicelulosa (Naim et al., 2022).

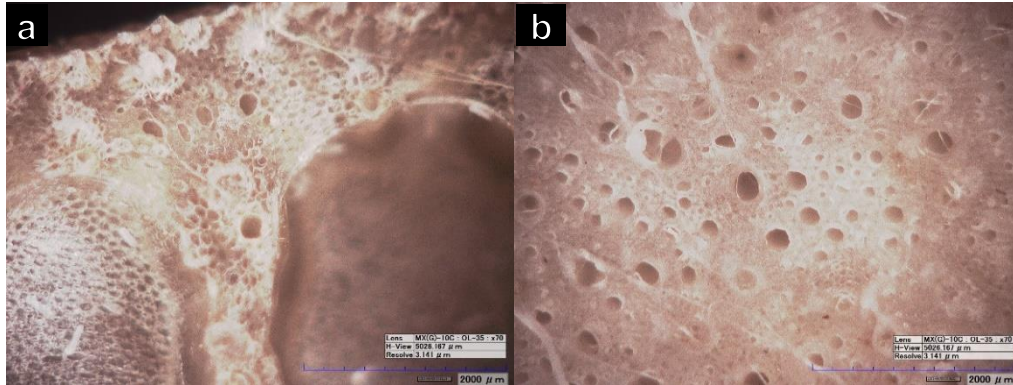
En los apéndices E y F se registran los espectros de FTIR de las muestras desarrolladas con bagazo y vástago de plátano, se evidencia similitud con los espectros de las muestras obtenidas con los desechos de la planta de banano, pero con una disminución de la intensidad de las bandas y por ende de los grupos funcionales.

Figura 4. Espectros FTIR para los compuestos obtenidos a partir de vástago de banano (BB)

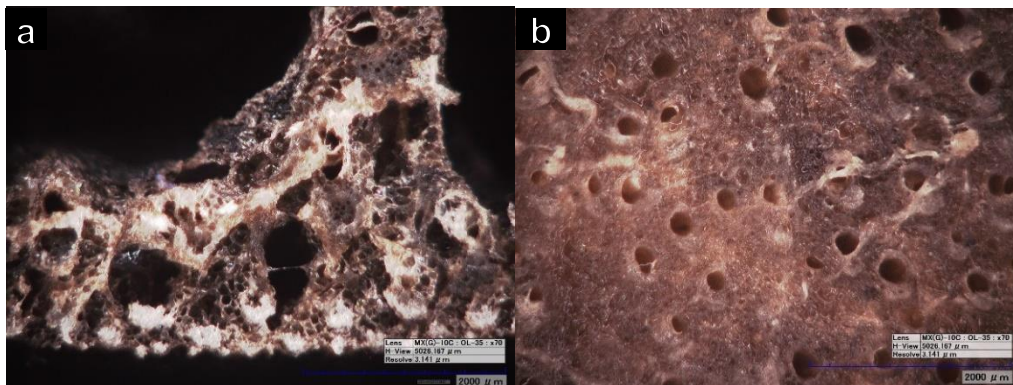
Nota: Espectros de FTIR para los compuestos de vástago de banano

4.1.4 Morfología de los desechos agroindustriales utilizados y de los carbones obtenidos

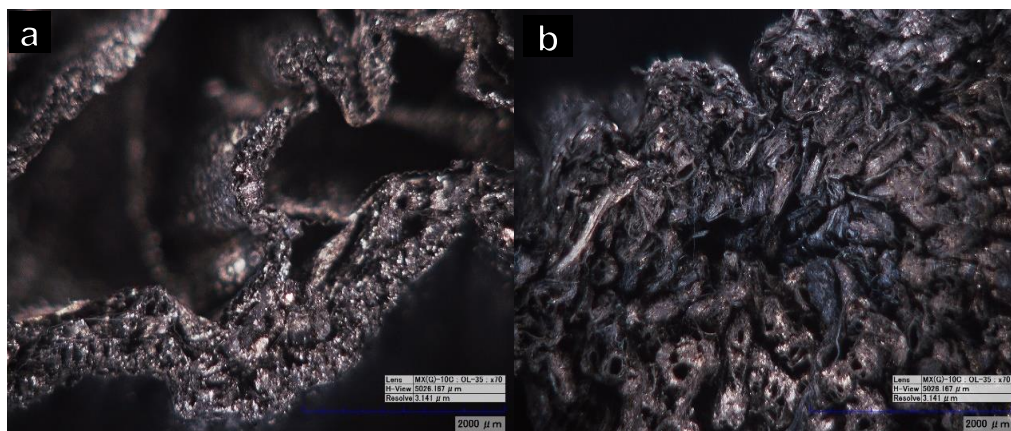
En las figuras 5, 6 y 7 se comparan las microfotografías obtenidas a 70 aumentos, por microscopía óptica confocal de las dos zonas de la planta de banano, bagazo y vástago, en condiciones húmedas, secadas a 80 °C y carbonizadas hasta 1000 °C. Las microfotografías evidencian que ambas zonas de la planta presentan gran porosidad, sin embargo, el bagazo tiene mayor grado de heterogeneidad en cuanto al tamaño de los poros, o espacios vacíos, es así que se pueden distinguir poros cuyos diámetros varían entre la escala micrométrica hasta la milimétrica. La zona del vástago en cambio muestra una estructura con porosidad más homogénea, con diámetros de poros entre 20 y 350 μm, aproximadamente, después de la carbonización el rango de diámetro varió a entre 15 y 240 μm, aproximadamente. Los materiales, bagazo y vástago, que fueron impregnados con las diferentes relaciones de resina de sacarosa y el sol de TiO₂, después de carbonizados, mostraron diámetros de poros similares al material carbonizado sin impregnación.

Figura 5. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano en verde

Nota. Vistas transversales tomadas a 70x de a) bagazo y b) vástago, de banano en verde.

Figura 6. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano secos

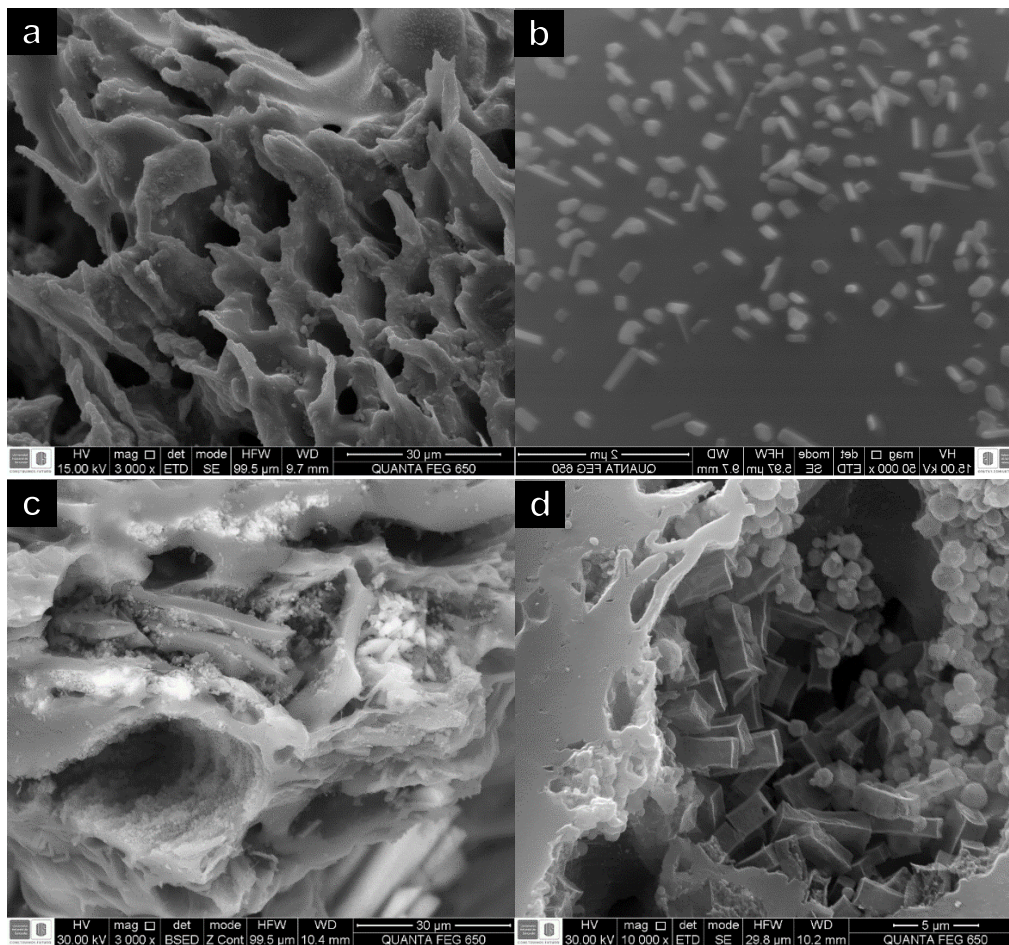
Nota. Vistas transversales, tomadas a 70x, de a) bagazo y b) vástago, de banano, secos.

Figura 7. Micrografías ópticas de bagazo y vástago de banano carbonizados

Nota. Vistas transversales, tomadas a 70x, de a) bagazo y b) vástago, de banano, carbonizados.

En la figura 8 se presentan algunas micrográficas SEM de dos de las muestras desarrolladas, carbones de bagazo de banano impregnados en resina de sacarosa (BB-0TiO₂) y en resina de sacarosa con 50% de sol de TiO₂ (BB-50TiO₂). Para el primer carbón (figura 8a) se aprecia que su superficie es de textura básicamente lisa, incluyendo el interior de los poros (figura 8b); mientras que en el segundo carbón (figuras 8c), la textura de las paredes interiores de los poros (figura 8d) es rugosa por efecto de abundante crecimiento de cristales, probablemente de las fases identificadas en los análisis DRX, es decir calcita (CaCO₃), magnesita (MgCO₃) y diópsido (CaMgSi₂O₆).

Figura 8. Micrográficas SEM de algunos de los sistemas desarrollados



Nota: Imágenes de microscopía electrónica de barrido del carbón BB-0TiO₂, tomadas a 3000x (a) y a 50000x (b), y del carbón BB-50TiO₂, tomadas a 3000x (c) y a 10000x (d).

4.2 Adsorción de naranja metilo

Tal como se describió en el apartado metodológico, estos ensayos se realizaron con 25 mL de solución de naranja de metilo con concentración de 5 ppm y pH de 2.4. La adsorción de naranja metilo (NM) se monitoreó en el espectrofotómetro UV-Vis con rango de barrido de longitud de onda de 200 a 700 nm y registrando el pico máximo inicial de absorbancia en 506 nm. Se realizó la curva de calibración del colorante (Absorbancia vs Concentración (ppm)), obteniendo una regresión lineal con $R^2 = 0.999$ (ver anexo G) la cual permitió establecer una relación directa entre la absorbancia y la concentración del NM, basada en la ley de Beer-Lambert (Ibrahim et al., 2020).

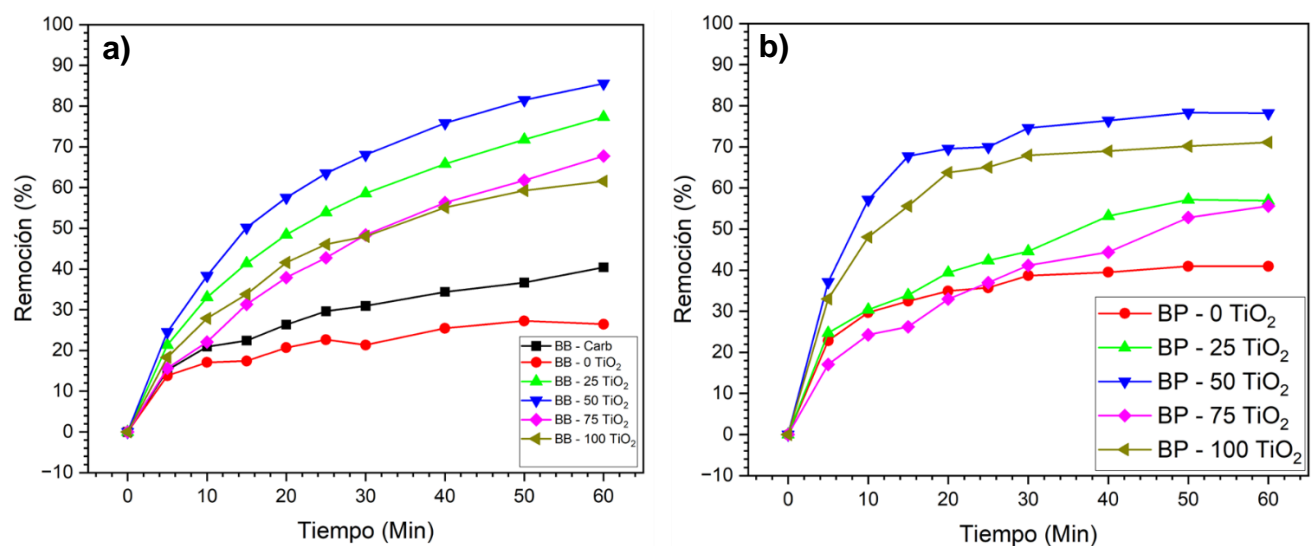
4.2.1 Capacidad de adsorción de NM de los bagazos de banano y de plátano

En las figuras 9a y 9b se presentan los resultados de % de remoción de NM para los materiales desarrollados a partir del bagazo de banano (BB) y de plátano (BP), respectivamente.

Los resultados fueron favorables para el bagazo de banano, alcanzándose hasta un 86% de remoción, mientras que con BP se llegó hasta el 78% de remoción, ambos impregnados con la resina de sacarosa modificada con 50% v/v de sol de TiO₂. En cuanto a la composición de la resina, no se observa una tendencia clara, en la adsorción, por el aumento de la proporción de TiO₂ en la resina; sin embargo, para los dos tipos de materiales, la menor capacidad de adsorción se encontró en los carbones desarrollados con resina de sacarosa al 100%, alcanzándose valores de adsorción de tan sólo 27% y 41% para BB-0TiO₂ y BP-0TiO₂, respectivamente. Tal comportamiento podría ser explicado por la morfología de estos carbones, más específicamente por la textura lisa de las paredes de los poros (ver figuras 8a y 8b), a diferencia de la alta área superficial, al interior de los poros, evidenciada para el carbón BB-50TiO₂ (ver figuras 8c y 8d).

Para el sistema de carbones de bagazo de banano, se evaluó también la capacidad de adsorción de este desecho agroindustrial carbonizado sin su modificación con resina (BB-carb). Para este carbón se alcanzó un 41% de remoción del colorante, valor ligeramente superior al alcanzado con el carbón modificado con resina de sacarosa y sin TiO₂, pero claramente los carbones de BB modificados con resinas con algún contenido de TiO₂ son mejores adsorbentes.

Figura 9. Eficiencia de remoción de NM de los compuestos BB y BP

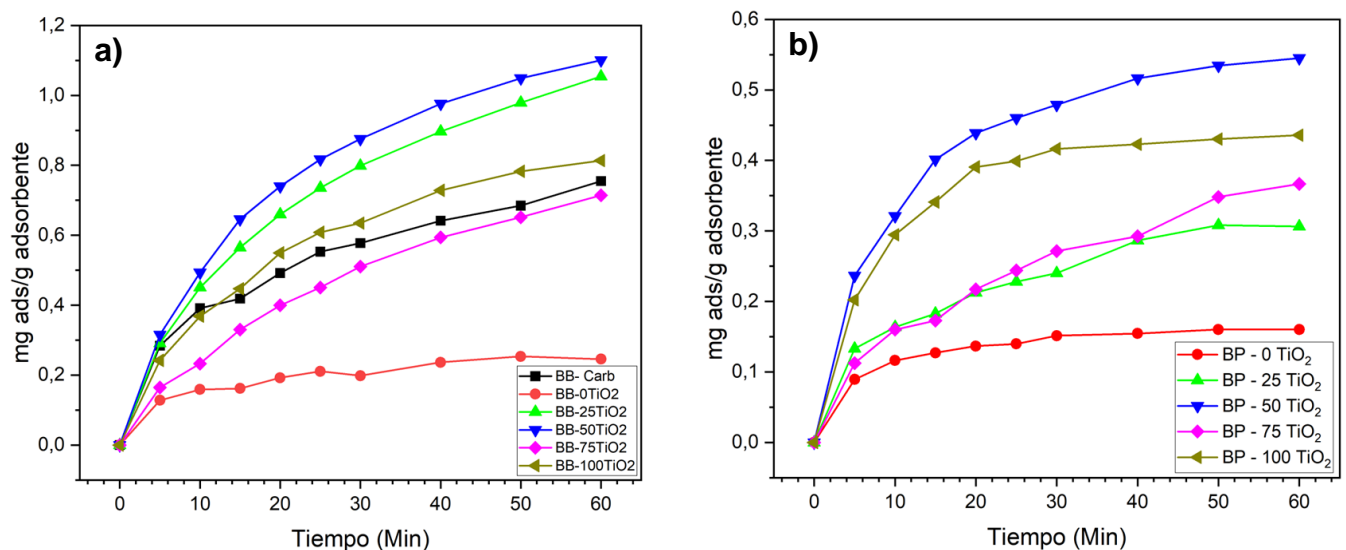


Nota: % de remoción de los compuestos a) bagazo de banano y b) bagazo de plátano

Con el fin de normalizar los resultados de los ensayos de adsorción, se calculó la relación entre la cantidad de NM adsorbido y la masa de la muestra de carbón utilizado en cada ensayo, tales resultados se presentan en las figuras 10a y 10b para los sistemas BB y BP, respectivamente. Se observa que, al normalizar los resultados, para ambos sistemas, se mantiene el resultado de que los carbones con 50% de sol de TiO₂ en la resina son los de mayor capacidad de adsorción, 1.1 y 0.54 mg de NM adsorbidos/g adsorbente para BB-50TiO₂ y BP-50TiO₂, respectivamente. Así mismo, aquellos carbones obtenidos con resinas sin TiO₂ son los de menor capacidad de adsorción, 0.2 y 0.15 mg de NM adsorbidos/g adsorbente para BB-0TiO₂ y BP-0TiO₂, respectivamente.

Llama la atención que la máxima capacidad de adsorción alcanzada con el carbón de bagazo de banano sea el doble de la del carbón de bagazo de plátano, este resultado se podría explicar por el hecho de que el BB-50TiO₂ presenta mayor porosidad en comparación con el BP-50TiO₂ (ver apéndice H). El material de banano muestra una porosidad variable pero definida en todo el compuesto, mientras el plátano presenta una porosidad con tendencia a cerrarse en mayor proporción durante el secado y la carbonización.

Figura 10. Capacidad de adsorción de los compuestos BB y BP



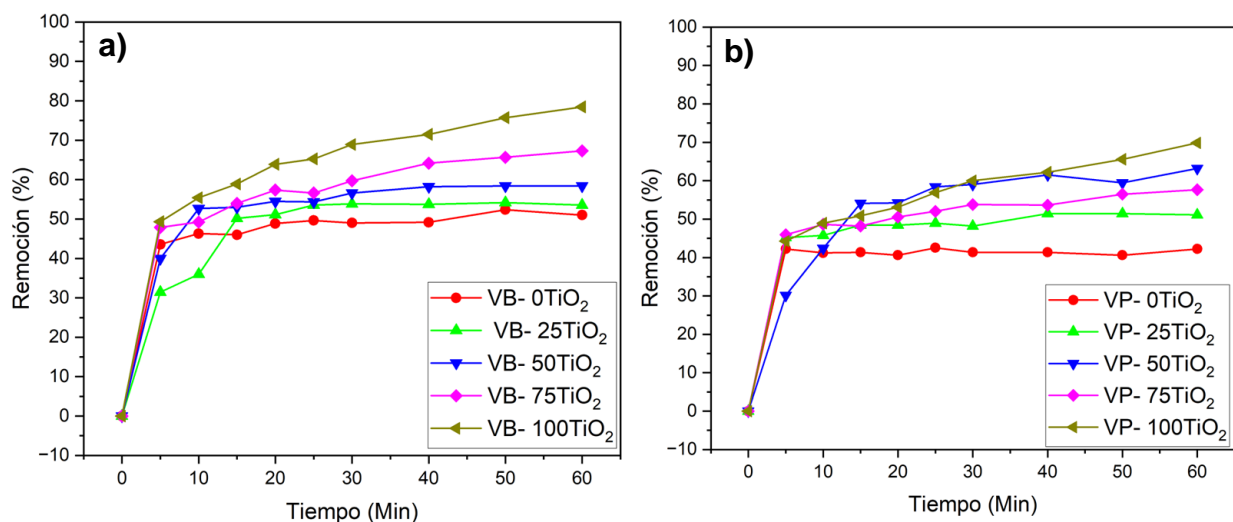
Nota: Capacidades de adsorción de naranja metilo (mg/g) de los compuestos bagazo de banano y bagazo de plátano

4.2.2 Capacidad de adsorción de NM de los vástagos de banano y de plátano

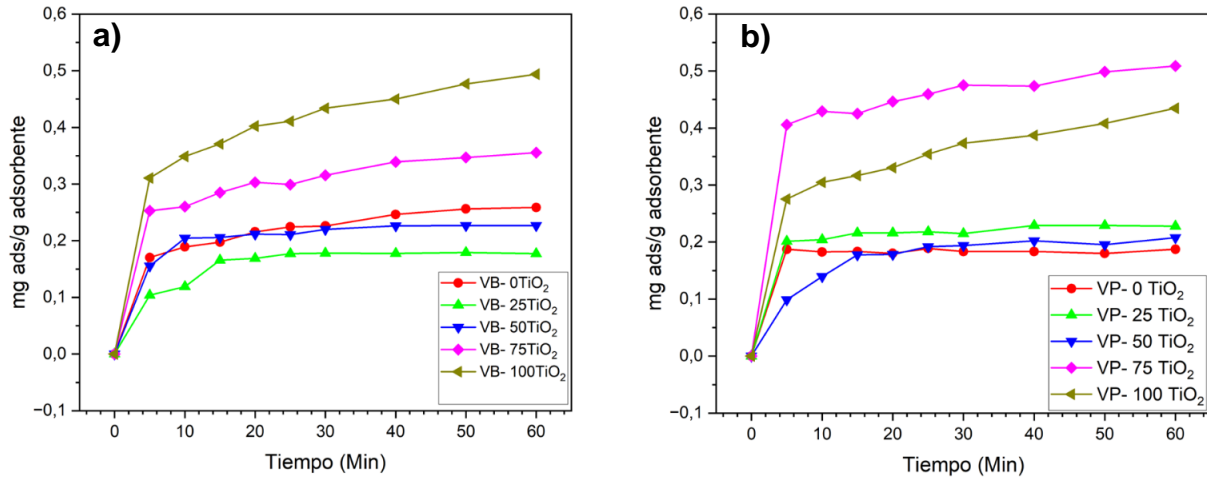
En las figuras 11 y 12 se presentan los resultados de % de remoción de NM y de capacidad de adsorción para los materiales desarrollados a partir del vástago de banano (VB) y de plátano (VP). Los resultados de % de remoción del colorante indican eficiencias similares para los carbones de los dos sistemas con vástago, alcanzándose remociones máximas del 77% y del 70% para las muestras VB-100TiO₂ y VP-100TiO₂. Nuevamente, las menores eficiencias se obtuvieron

para los carbones desarrollados con resinas de sacarosa sin adición de TiO₂, 51% y 42% para las muestras VB-0TiO₂ y VP-0TiO₂. Ahora bien, al normalizar los resultados (mg de NM adsorbidos/g de adsorbente), se encuentra que los carbones con mayor capacidad de adsorción son VB-100TiO₂ y VP-75TiO₂, con valores de 0.49 y 0.51 mg de NM adsorbidos/g de adsorbente, respectivamente. Estos resultados indican que los carbones de bagazo y de vástago de plátano tienen, aproximadamente, la misma capacidad de adsorción del colorante; no obstante, para el banano hay una gran diferencia en el comportamiento de las dos zonas de su pseudotallo, ya que la capacidad de adsorción del bagazo es 2.5 veces mayor a la del vástago. Tales diferencias permiten inferir que sólo el pseudotallo de banano tiene las dos zonas bien diferenciadas, la más exterior (bagazo) es más porosa, o de fibras más abiertas, en comparación con la zona central (vástago), la cual es más densa o menos porosa, característica que no favorece los procesos de adsorción.

Figura 11. Eficiencia de remoción de NM de los compuestos VB y VP



Nota: % de remoción de los compuestos a) vástago de banano y b) vástago de plátano

Figura 12. Capacidad de adsorción de los compuestos VB y VP

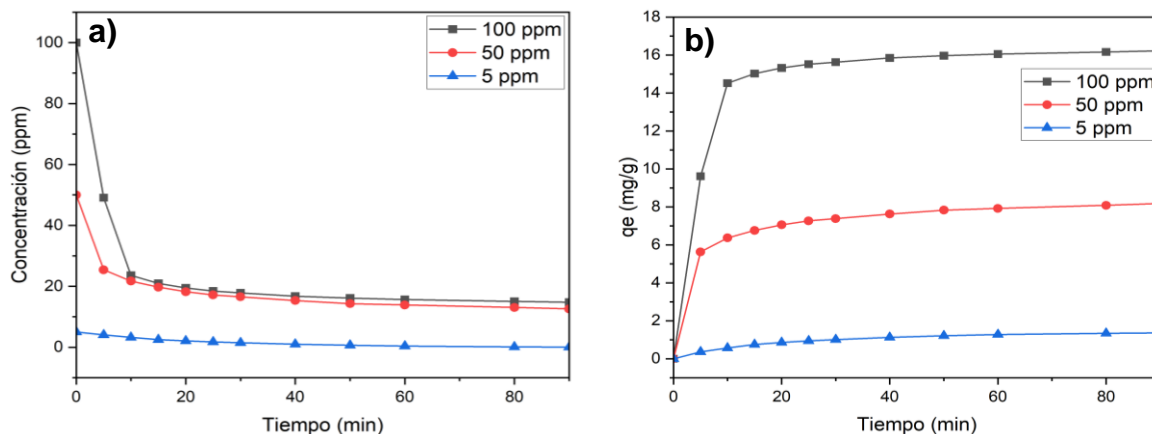
Nota: Capacidades de adsorción de naranja metilo (mg/g) de los compuestos vástago de banano y vástago de plátano

4.3 Isotermas de adsorción

En esta parte final del trabajo, se intentaron ajustar los resultados experimentales de adsorción a los modelos de Langmuir y de Freundlich, con el fin de determinar el mecanismo de adsorción que tiene lugar en el proceso evaluado. Para este estudio se utilizó el carbón que demostró mayor capacidad de adsorción, es decir BB-50TiO₂, variando la concentración inicial del colorante, de 5 ppm a 100 ppm, el valor de pH se mantuvo igual a los ensayos de adsorción previos, es decir en un valor de 2.4. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 13a, las curvas indican la variación de la concentración de la solución con el tiempo, observándose que para los ensayos con altas concentraciones iniciales (50 y 100 ppm), la remoción del colorante fue rápida en los primeros minutos, pero luego de esto, la velocidad de adsorción se vuelve más lenta a medida que baja la concentración. Este típico comportamiento indica una alta afinidad del adsorbente con el adsorbato, pero también una rápida saturación del primero por el agotamiento de los sitios de adsorción (Ma et al., 2015b). En la figura 13b se representan los resultados en

términos de la capacidad de adsorción (mg de NM adsorbido/g de adsorbente), obteniéndose una capacidad máxima de 16.314 mg de NM adsorbido/g de adsorbente. Este valor es muy cercano al obtenido en el trabajo realizado por (Ma et al., 2015b), en el cual se usó un carbón de cascara de banano en polvo para adsorber NM, llegando a una capacidad de adsorción de 25 mg/g, con concentración inicial del NM de 470 ppm. Comparando la capacidad máxima de adsorción de BB-50TiO₂ con otros biocarbones para adsorción de tintes, como la cascara de almendras, de albaricoque, de avellana y de nuez, el material desarrollado en el presente trabajo de grado es de 2 a 3 veces mayor (Katheresan et al., 2018), pero adicionalmente con la ventaja de que este material adsorbente es tridimensional, por lo que su implementación facilitaría en gran medida su recuperación de la solución.

Figura 13. Curvas de adsorción de NM a diferentes concentraciones sobre BB-50TiO₂

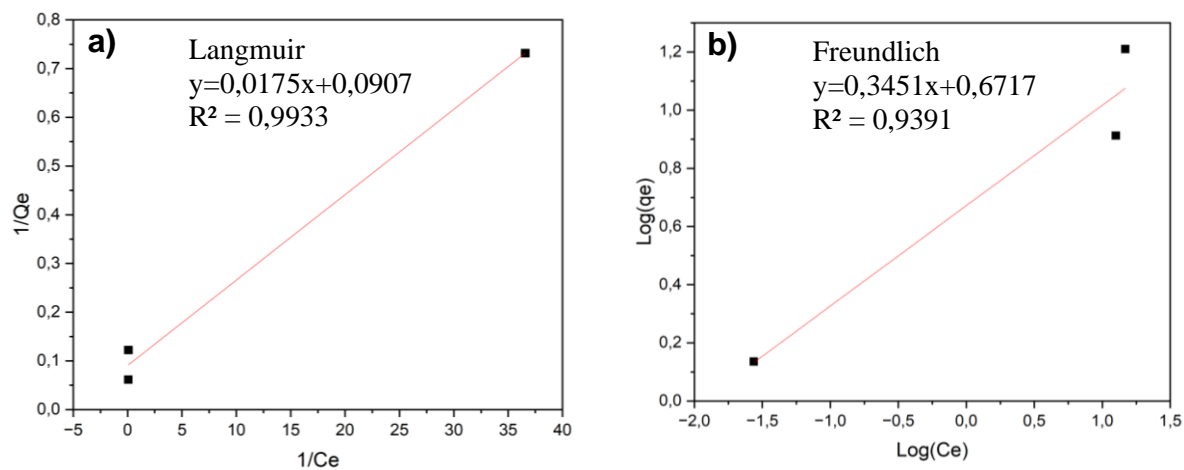


Nota. a) Remoción de NM sobre BB-50TiO₂, b) mg de NM adsorbidos por gramo de adsorbente (q_e)

Con los valores experimentales de C_e y Q_e y con ayuda de las ecuaciones (3) y (6), se hizo el ajuste de los datos experimentales a las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich, figuras 14a y 14b, respectivamente. Los parámetros relacionados con cada modelo se resumen en la tabla 1. Al comparar los valores de R^2 (coeficiente de regresión) de las isothermas, se evidencia

que el modelo de Langmuir tiene un valor más alto que el modelo de Freundlich, lo que indica que la adsorción de NM en BB-50TiO₂ se da de forma homogénea en sitios idénticos y equivalentes con un espesor de una molécula de capa adsorbida. La isoterma de Langmuir es característica de materiales meso y microporos (Cuong et al., 2019), además de tener mejor ajuste de R² en carbones de materiales de residuos, como los desarrollados en el presente trabajo (Bednárek et al., 2022). El parámetro Q_m representa la capacidad de adsorción máxima teórica (11.02 mg/g), este valor fue un poco menor al experimental, aun así, es un gran resultado dado el hecho de que se trata de un material tridimensional y no uno particulado. El K_l es una constante de la isoterma de Langmuir, la cual está relacionada con la energía de adsorción y con la distribución de los compuestos entre las dos fases, un valor alto de K_l, como el obtenido (5.1 L/mg) es el deseado para la adsorción, pues indica que el colorante tiene mayor afinidad por el adsorbente que por la solución (Chen et al., 2022).

Figura 14. Ajuste de las isotermas de adsorción



Nota. Gráficas correspondientes a las isotermas de adsorción de Langmuir (a) y Freundlich (b)

Tabla 1. Parámetros derivados de las isotermas de adsorción

Modelo de Langmuir	Modelo de Freundlich
Qm: 11.02 (mg/g)	Kf: 4.70 (mg/g)
Kl: 5.1 (L/mg)	n: 2.90
R ² : 0.9933	R ² : 0.9391

Nota: Capacidad máxima de adsorción Langmuir (Qm), constante de Langmuir (Kl), coeficiente de determinación (R²), constante de Freundlich (Kf), indicador de favorabilidad de adsorción (N)

Conclusiones

La metodología propuesta permitió obtener carbones tridimensionales modificados con TiO₂ a partir de residuos de plantas musáceas, cuya caracterización microscópica evidenció que la impregnación de los residuos vegetales en resinas de sacarosa/TiO₂ genera carbones con textura rugosa al interior de los poros, por precipitación de diversas fases cristalinas, tales como calcita, magnesita, silicatos, óxidos de Titanio, perovskita y kalicinita.

Se evaluó satisfactoriamente la eficiencia de adsorción de naranja metilo en los materiales adsorbentes desarrollados, alcanzando un porcentaje de remoción de hasta 86% para el carbón obtenido con bagazo de banano impregnado en resina de sacarosa con 50%v/v sol de TiO₂. Para el mismo material, la capacidad de adsorción con Co (concentración inicial) 100 ppm, llegó hasta 16.3 mg/g. Tal capacidad de adsorción del carbón tridimensional BB-50TiO₂ es comparable con la de muchos adsorbentes en polvo.

Se encontró que los desechos de banano generan carbones más porosos y adsorbentes que los de plátano, lo cual se relaciona con las fibras más abiertas de los primeros. Entre las dos zonas del pseudotallo del banano, el bagazo genera mejores adsorbentes que el vástago, dada la mayor porosidad del primero.

Los resultados experimentales de adsorción de naranja de metilo se ajustaron mejor al modelo de Langmuir que al de Freundlich, indicando que las moléculas del colorante se adsorben en una monocapa hasta agotar los sitios disponibles en el adsorbente desarrollado.

Recomendaciones

Para continuar con la investigación que se inició en el presente trabajo de grado, se recomienda lo siguiente:

Completar la caracterización morfológica y fisicoquímica de todos los materiales desarrollados, incluyendo la determinación del área superficial.

Evaluar la capacidad fotocatalítica y electrofotocatalítica de los carbones tridimensionales desarrollados con el fin de lograr no sólo la adsorción, sino también la degradación del colorante.

Estudiar la capacidad de adsorción de otros contaminantes de aguas industriales, tales como metales pesados, con los adsorbentes desarrollados.

Evaluar los materiales adsorbentes en reactores de diversas configuraciones para determinar los más apropiados para su posible escalamiento e implementación en la industria textil.

Referencias Bibliográficas

- Ahmad, T., & Danish, M. (2018). Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review. En *Journal of Environmental Management* (Vol. 206, pp. 330-348). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.061>
- Al-Lafi, A. G., & AL-Naser, I. (2022). Application of 2D-COS-FTIR spectroscopic analysis to milk powder adulteration: Detection of melamine. *Journal of Food Composition and Analysis*, 113, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104720>
- Anita, S., Hanifah, T. A., Kartika, G. F., & Yanti, P. H. (2021). Methylene Blue and Methyl Orange Dyes Removal using Low-Cost Composite of Banana Peel-TiO₂ Adsorbent. *Journal of Physics: Conference Series*, 1819(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1819/1/012060>
- Ansón-Casaos, A., Sampaio, M. J., Jarauta-Córdoba, C., Martínez, M. T., Silva, C. G., Faria, J. L., & Silva, A. M. T. (2015). Evaluation of sol-gel TiO₂ photocatalysts modified with carbon or boron compounds and crystallized in nitrogen or air atmospheres. *Chemical Engineering Journal*, 277, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.136>
- Aparna, R., Iyer, R. S., Das, T., Sharma, K., Sharma, A., & Srivastava, A. (2022). Detection, discrimination and aging of human tears stains using ATR-FTIR spectroscopy for forensic purposes. *Forensic Science International: Reports*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2022.100290>
- Arciniegas, G. (2020). *desarrollo de recubrimientos n-tio 2 sobre soportes 3d carbonosos para la purificación fotocatalítica de aguas escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales bucaramanga 2020*.

- Arutanti, O., Sari, A. L., Kartikowati, C. W., Sari, A. A., & Arif, A. F. (2022). Design and Application of Homogeneous-structured TiO₂/Activated Carbon Nanocomposite for Adsorption–Photocatalytic Degradation of MO. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(4). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05600-1>
- Azizian, S., & Eris, S. (2021). Adsorption isotherms and kinetics. *Interface Science and Technology*, 33, 445-509. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00011-4>
- Bednárek, J., Matejová, L., Jankovská, Z., Vaštyl, M., Sokolová, B., Peikertová, P., Šiler, P., Verner, A., Tokarský, J., Koutník, I., Šváb, M., & Vráblová, M. (2022). The influence of structural properties on the adsorption capacities of microwave-assisted biochars for metazachlor removal from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 108003. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108003>
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2010). Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment-A review. En *Chemical Engineering Journal* (Vol. 157, Números 2-3, pp. 277-296). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.007>
- Brañez Sánchez, M., Gutierrez, R., Pérez, R., Uribe, V., & Pamela, C. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Campus*, 23(26), 129-143. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n26.03>
- Budhiary, K. N. S., & Sumantri, I. (2021). Langmuir and Freundlich isotherm adsorption using activated charcoal from banana peel to reduce total suspended solid (TSS) levels in tofu industry liquid waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 012113. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1053/1/012113>

- Buschhaus, L., & Kleinermanns, K. (2014). Step-Scan FTIR spectroscopy and quantum chemical calculations of xanthone in the triplet state. *Chemical Physics Letters*, 613, 70-73.
<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2014.08.014>
- Cárdenas, H. (2019). *Riesgos Ambientales y Sociales Sector Textil*.
- Chen, X., Hossain, M. F., Duan, C., Lu, J., Tsang, Y. F., Islam, M. S., & Zhou, Y. (2022). Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. *Chemosphere*, 307, 135545.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135545>
- Chi, Z., Hao, L., Dong, H., Yu, H., Liu, H., & Yu, H. (2020). The innovative application of organosolv lignin for nanomaterial modification to boost its heavy metal detoxification performance in the aquatic environment. *Chemical Engineering Journal*, 382.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122789>
- Cuong, D. V., Liu, N. L., Nguyen, V. A., & Hou, C. H. (2019). Meso/micropore-controlled hierarchical porous carbon derived from activated biochar as a high-performance adsorbent for copper removal. *Science of The Total Environment*, 692, 844-853.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.125>
- Cury R, K., Aguas M, Y., Martinez M, A., Olivero V, R., & Chams Ch, L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista colombiana de ciencia animal*, 122-132.
- DANE. (2019). *Encuesta Ambiental Industrial*.
- DANE. (2022). *Boletín técnico encuesta ambiental industrial*.
- Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales Marzo 2020. (2020). *CADENA DE BANANO*.
- Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales Marzo 2021. (201d. C.). *CADENA DE PLÁTANO*.

- Faradilla, R. F., Risaldi, Tamrin, T. A. M., Salfia, Rejeki, S., Rahmi, A., & Arcot, J. (2022). Low energy and solvent free technique for the development of nanocellulose based bioplastic from banana pseudostem juice. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, 100261. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2022.100261>
- Farhan Hanafi, M., & Sapawe, N. (2020). A review on the water problem associate with organic pollutants derived from phenol, methyl orange, and remazol brilliant blue dyes. *Materials Today: Proceedings*, 31, A141-A150. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.258>
- Gajda, I., Greenman, J., Melhuish, C., Santoro, C., & Ieropoulos, I. (2016). Microbial Fuel Cell-driven caustic potash production from wastewater for carbon sequestration. *Bioresource Technology*, 215, 285-289. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.04.004>
- Gan, W., Shang, X., Li, X. H., Zhang, J., & Fu, X. (2019). Achieving high adsorption capacity and ultrafast removal of methylene blue and Pb²⁺ by graphene-like TiO₂@C. En *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (Vol. 561, pp. 218-225). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.079>
- Granda R, D. M., Mejía G, A. I., & Jiménez T, G. A. (2005). *UTILIZATION OF PLANTAIN WASTE FOR THE PRODUCTION OF SECONDARY ME-TABOLITES BY SOLID SUBSTRATE FERMENTATION USING THE FUNGI *Lentinus crinitus**.
- Han, B., Weatherley, A. J., Mumford, K., Bolan, N., He, J. Z., Stevens, G. W., & Chen, D. (2022). Modification of naturally abundant resources for remediation of potentially toxic elements: A review. En *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 421). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126755>
- Ibrahim, H. K., Albo Hay Allah, M. A., Al-Da'amy, M. A., Kareem, E. T., & Abdulridha, A. A. (2020). Adsorption of Basic Dye Using Environmental friendly adsorbent. *IOP Conference*

Series: Materials Science and Engineering, 871(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/871/1/012027>

Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., Emenike, E. C., Ogunfowora, L. A., & Igwegbe, C. A. (2021). Adsorption of methyl orange: A review on adsorbent performance. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100179. <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2021.100179>

Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. En *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 6, Número 4, pp. 4676-4697). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>

Khairiah, K., Frida, E., Sebayang, K., Sinuhaji, P., & Humaidi, S. (2021). Data on characterization, model, and adsorption rate of banana peel activated carbon (*Musa Acuminata*) for adsorbents of various heavy metals (Mn, Pb, Zn, Fe). *Data in Brief*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107611>

Lee, S. Y., & Park, S. J. (2013). TiO₂ photocatalyst for water treatment applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(6), 1761-1769. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2013.07.012>

Li, W., Mu, B., & Yang, Y. (2019). Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. En *Bioresource Technology* (Vol. 277, pp. 157-170). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.002>

Liu, Y., Liu, X., Ma, Z., He, Y., & Zhang, X. (2022). A new preparation method of graphite cones from polycyclic aromatic hydrocarbons/polyimide composite carbon fibers. *Carbon*, 196, 128-135. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2022.04.069>

- Ma, J., Huang, D., Zou, J., Li, L., Kong, Y., & Komarneni, S. (2015a). Adsorption of methylene blue and Orange II pollutants on activated carbon prepared from banana peel. *Journal of Porous Materials*, 22(2), 301-311. <https://doi.org/10.1007/s10934-014-9896-2>
- Ma, J., Huang, D., Zou, J., Li, L., Kong, Y., & Komarneni, S. (2015b). Adsorption of methylene blue and Orange II pollutants on activated carbon prepared from banana peel. *Journal of Porous Materials*, 22(2), 301-311. <https://doi.org/10.1007/s10934-014-9896-2>
- Martirosyan, G. G., Adonts, H. v., Hovhannisyan, G. S., & Kurtikyan, T. S. (2019). Comparative FTIR study of the cobalt and iron porphyrin reactions with CO. Does cobalt porphyrin form a bis-carbonyl complex in the Ar matrix? *Inorganica Chimica Acta*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.119011>
- Misran, E., Bani, O., Situmeang, E. M., & Purba, A. S. (2022). Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue removal: Isotherm, kinetics, and reusability. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 1946-1955. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.022>
- Modwi, A., Basith, N. M., Ghoniem, M. G., Ismail, M., ben Aissa, M. A., Khezami, L., & Bououdina, M. (2023). Efficient Pb(II) adsorption in aqueous solution by hierarchical 3D/2D TiO₂/CNNS nanocomposite. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116191>
- Naim, N., Ennahli, N., Hanine, H., Lahlali, R., Tahiri, A., Fauconnier, M. L., Madani, I., & Ennahli, S. (2022). ATR-FTIR spectroscopy combined with DNA barcoding and GC-MS to assess the quality and purity of saffron (*Crocus sativus* L.). *Vibrational Spectroscopy*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103446>

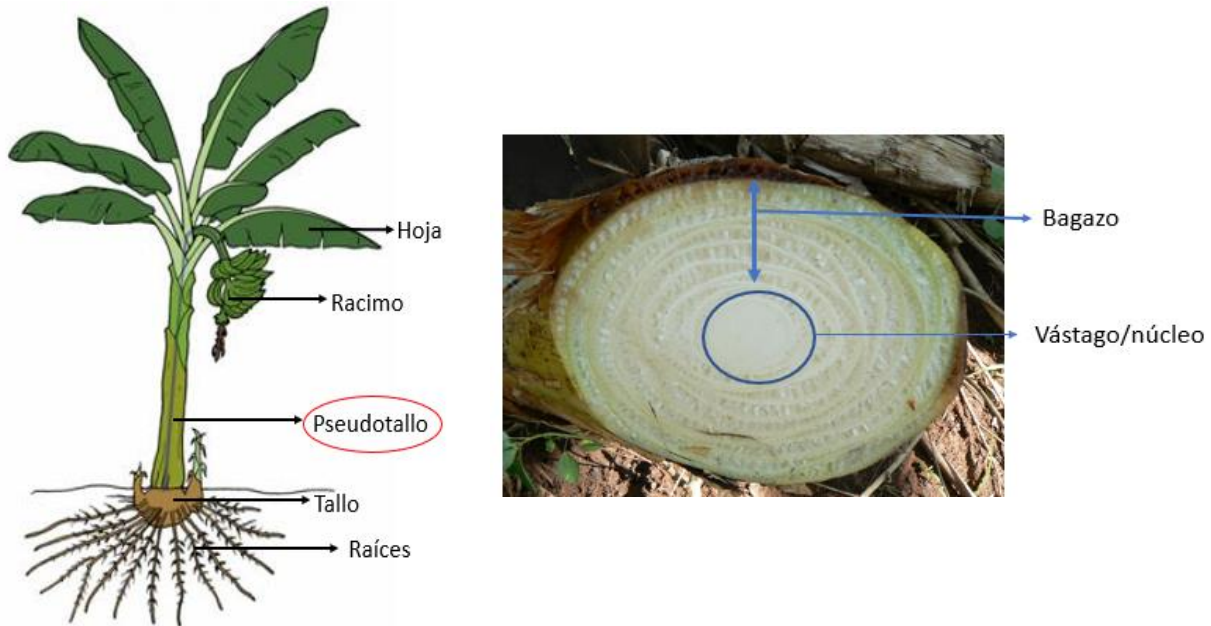
- Pourhakkak, P., Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Ghaedi, M., & Haghdoost, S. (2021). Fundamentals of adsorption technology. *Interface Science and Technology*, 33, 1-70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1>
- Ray, S. S., Gusain, R., & Kumar, N. (2020). Adsorption equilibrium isotherms, kinetics and thermodynamics. En *Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification* (pp. 101-118). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821959-1.00005-2>
- Russell, D. (2012). *Tratamiento de aguas residuales*.
- Salman, J. M., Njoku, V. O., & Hameed, B. H. (2011). Adsorption of pesticides from aqueous solution onto banana stalk activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.026>
- Schmidt, K., Laumer, J., & O'Leary, S. K. (2023). The D- and G-branches associated with the Raman spectrum of thin-film carbon. *Solid State Communications*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2022.115041>
- Sharma, A., & Sharma, V. (2023). Forensic analysis of cigarette filter using non-destructive ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Forensic Chemistry*, 32, 100465. <https://doi.org/10.1016/j.forc.2023.100465>
- Simonetti, E. A. N., de Simone Cividanes, L., Campos, T. M. B., de Menezes, B. R. C., Brito, F. S., & Thim, G. P. (2016). Carbon and TiO₂ synergistic effect on methylene blue adsorption. *Materials Chemistry and Physics*, 177, 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.04.035>
- Singh, S., Kumar, V., Datta, S., Dhanjal, D. S., Sharma, K., Samuel, J., & Singh, J. (2020). Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. En *Science of the Total Environment* (Vol. 709). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135895>

- Smirnova, N. S., Baeva, G. N., Markov, P. v., Mashkovsky, I. S., Bukhtiyarov, A. v., Zubavichus, Y. v., & Yu. Stakheev, A. (2022). In situ FTIR study of surface site transformations in Pd₃In/ α -Al₂O₃ and Pd₃Ag/ α -Al₂O₃ induced by CO adsorption. *Mendeleev Communications*, 32(6), 807-809. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.11.033>
- Strauss, I., Chakarova, K., Mundstock, A., Mihaylov, M., Hadjiivanov, K., Guschanski, N., & Caro, J. (2020). UiO-66 and UiO-66-NH₂ based sensors: Dielectric and FTIR investigations on the effect of CO₂ adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110227>
- Tee, G. T., Gok, X. Y., & Yong, W. F. (2022). Adsorption of pollutants in wastewater via biosorbents, nanoparticles and magnetic biosorbents: A review. En *Environmental Research* (Vol. 212). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113248>
- Teoh, H. L., Ibrahim, S. A., Ainuddin, A. R., Hussin, R., & Zakiah, K. (2021a). Preparation of Composite Banana Peel-TiO₂ for Methyl Orange Dyes Removal. *Journal of Physics: Conference Series*, 2080(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2080/1/012030>
- Teoh, H. L., Ibrahim, S. A., Ainuddin, A. R., Hussin, R., & Zakiah, K. (2021b). Preparation of Composite Banana Peel-TiO₂ for Methyl Orange Dyes Removal. *Journal of Physics: Conference Series*, 2080(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2080/1/012030>
- Terán, N. (2018). *DESARROLLO DE ANDAMIOS DE CARBÓN VÍTREO RETICULADO DE CELDA POLIÉDRICA A PARTIR DE SACAROSA PARA APLICACIONES EN*.
- UNESCO. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020_ agua y cambio climático - UNESCO Biblioteca Digital*.

- Uribe, L. M., Esperanza López, M., & Giovanni González, A. (2013). *ACTIVACIÓN DE CARBÓN MINERAL MEDIANTE PROCESO FÍSICO EN HORNO TUBULAR HORIZONTAL Y ATMÓSFERA INERTE*.
- Vézina, A., & Baena, M. (2020). *Morfología de la planta del banano | Improving the understanding of banana*.
<https://www.promusa.org/Morfolog%C3%ADa+de+la+planta+del+banano>
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. En *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 209, pp. 172-184). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yegane Badi, M., Azari, A., Pasalari, H., Esrafil, A., & Farzadkia, M. (2018). Modification of activated carbon with magnetic Fe₃O₄ nanoparticle composite for removal of ceftriaxone from aquatic solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 261, 146-154.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.019>
- Zheng, B., Lin, X., Zhang, X., Wu, D., & Matyjaszewski, K. (2020). Emerging Functional Porous Polymeric and Carbonaceous Materials for Environmental Treatment and Energy Storage. En *Advanced Functional Materials* (Vol. 30, Número 41). Wiley-VCH Verlag.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201907006>

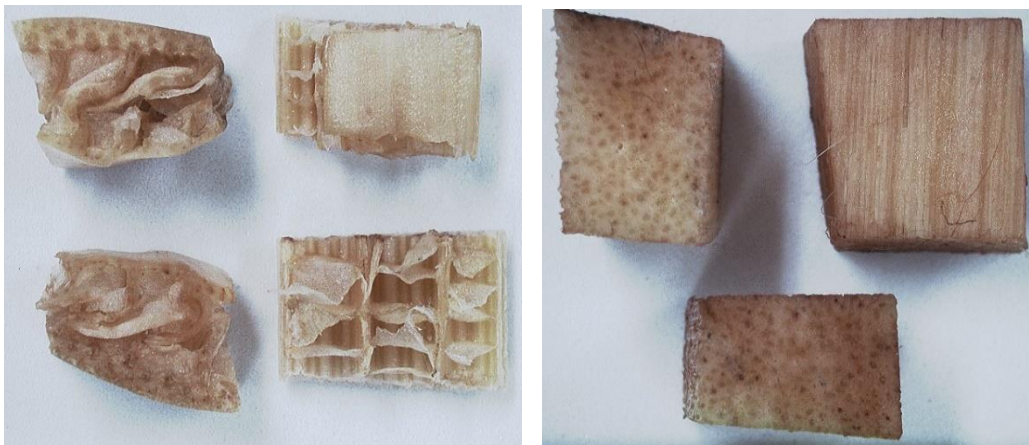
Apéndices

Apéndice A. Planta musácea.

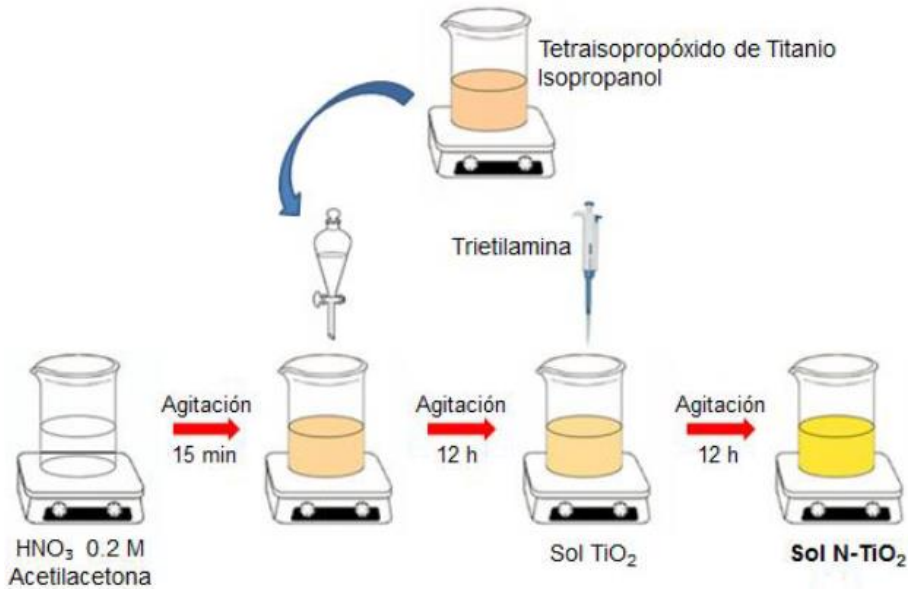


Nota. Representación gráfica de una planta musácea con sus partes. Tomado de (Vézina & Baena, 2020).

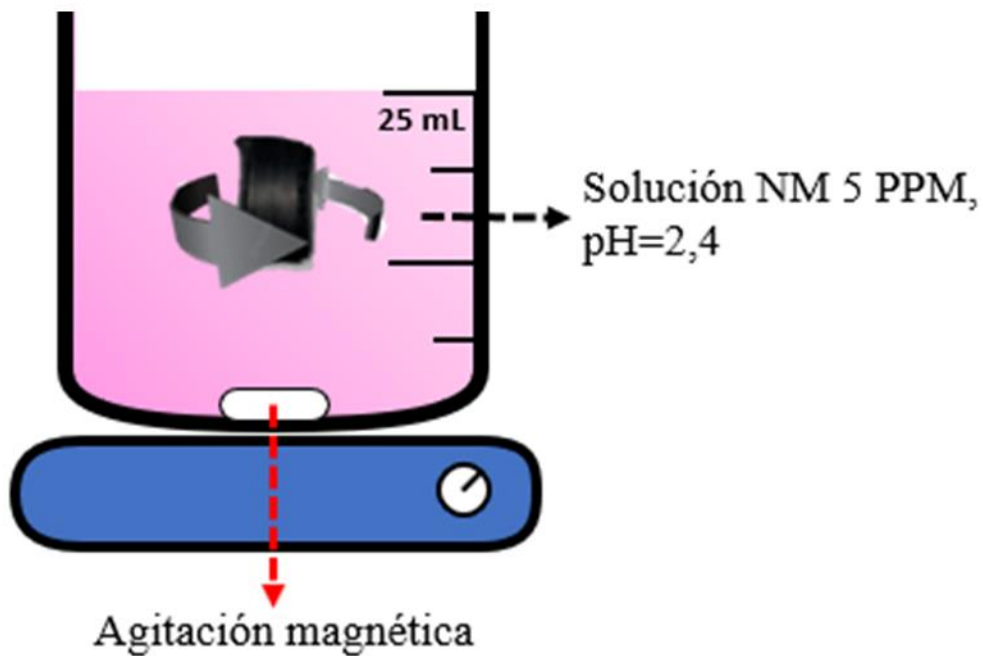
Apéndice B. Bagazo y vástago

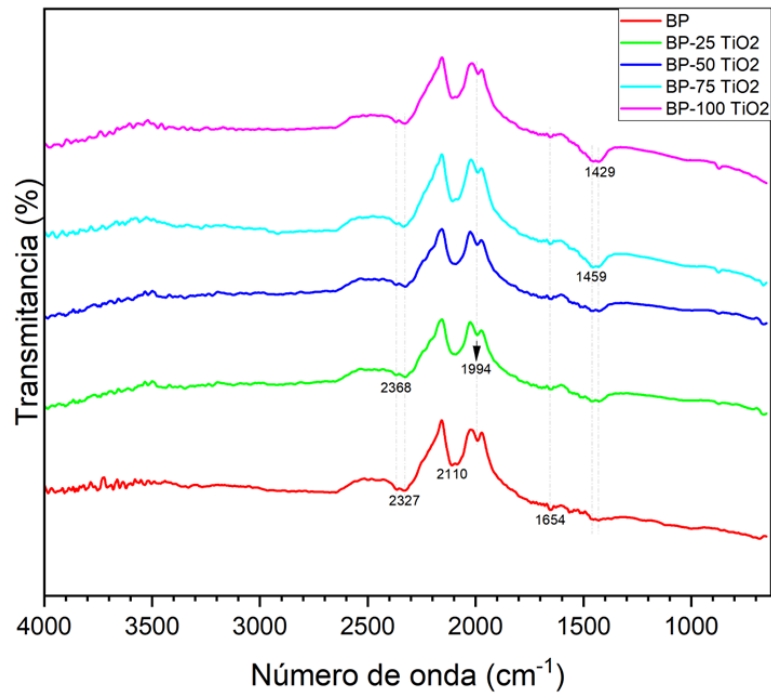


Nota. Bagazo y vástago en verde. Tomado con cámara digital.

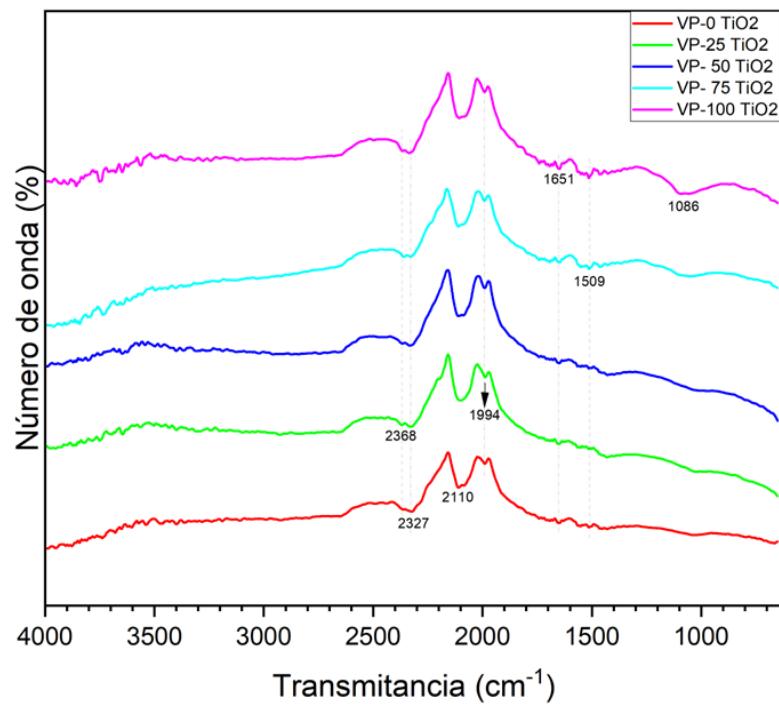
Apéndice C. Esquema de la metodología Sol TiO₂

Nota. Desarrollo del sol TiO₂, tomado de (Arciniegas, 2020)

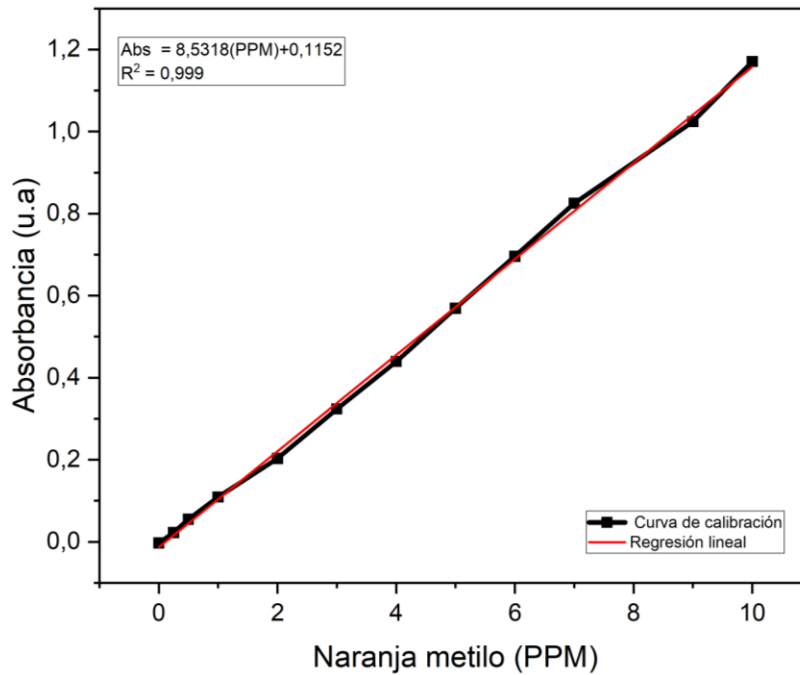
Apéndice D. Montaje ensayos de adsorción por lote

Apéndice E. Espectros FTIR para los compuestos BP

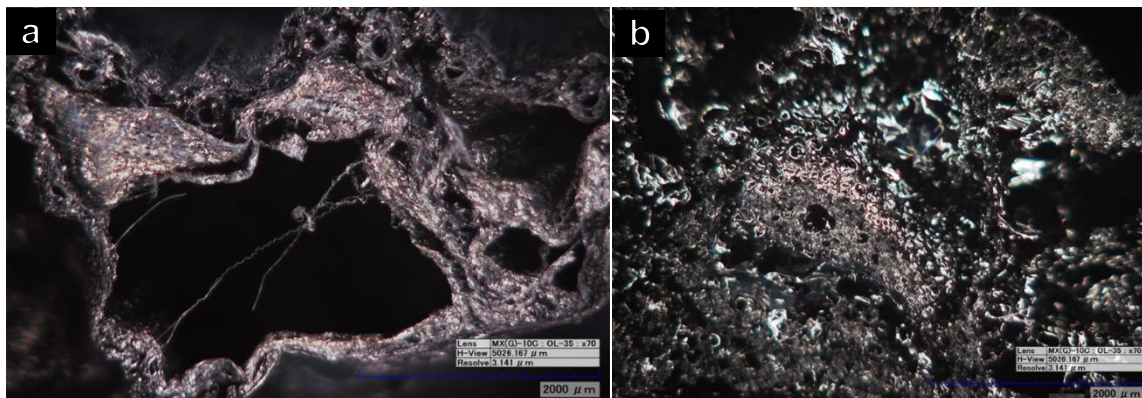
Nota. Indicación de picos de los espectros FTIR

Apéndice F. Espectros FTIR para los compuestos VP

Nota. Indicación de picos de los espectros FTIR

Apéndice G. Curva de calibración naranja metilo

Nota. curva calibración hasta 10 ppm de NM a pH 2.4.

Apéndice H. Comparación zona de bagazo del banano y plátano

Nota. a) micrografía a 70x de BP-50TiO₂, b) micrografía a 70x de BB-50TiO₂