

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**Obtención de subproductos derivados de la carbonización
hidrotermal de materiales adsorbentes derivados de residuos
agroindustriales**

Tesis para optar el título profesional de ingeniero forestal y medio
ambiente

Presentado por:

Br. Espinoza Mogollón Edson Ronaldihño

Tumbes, 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



Obtención de subproductos derivados de la carbonización hidrotermal de materiales adsorbentes derivados de residuos agroindustriales

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Mg. López Celi Alduvar N. (Presidente)

Dr. Herrera Palacios Eber L. (Secretario)

Mg. Silva Chávez José A. (Vocal)

Tumbes, 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



Obtención de subproductos derivados de la carbonización hidrotermal de materiales adsorbentes derivados de residuos agroindustriales

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y
forma:

Br. Espinoza Mogollón Edson R. (Autor)

Dr. Cruz Cerro Gerardo J. F. (Asesor)

Ing. Rimaycuna Ramírez John H. (Coasesor)

Tumbes, 2022

Copia del Acta de Sustentación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE
CAMPUS UNIVERSITARIO S/N "LA CRUZ"
SECRETARIA ACADEMICA
TUMBES - PERU



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En Tumbes, a los (09) días del mes de mayo de dos mil veintidós, se reunieron de manera virtual, en la plataforma google meet, a través del siguiente enlace <https://meet.google.com/xay-kwst-oqi> los integrantes del jurado designados, según Resolución Decanal N° 054-2020/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D (25-09-2020) y con Aprobación del Proyecto de Tesis, según Resolución Decanal N° 011-2021/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D (15-03-2021); con el objetivo de evaluar la sustentación de la tesis denominada: "OBTENCIÓN DE SUBPRODUCTOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO HIDROTHERMAL DE MATERIALES ADSORBENTES ELABORADOS A BASE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES", para optar e Título de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente. **Cuyo Asesor de la mencionada tesis es el Dr. GERARDO JUAN FRANCISCO CRUZ CERRO y el Mg. JOHN H. RIMAYCUNA RAMIREZ,**

A las **veinte (20)** horas con **quince (15)** Minutos y, de acuerdo a lo estipulado en el Reglamento respectivo, el presidente del jurado dio por iniciado el acto.

Luego de la exposición del trabajo, la formulación de preguntas y la deliberación del jurado lo declararon **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **BUENO**

Por lo tanto, el Bachiller, **ESPINOZA MOGOLLON EDSON RONALDIHÑO**, queda apto para que el Consejo Universitario de la Universidad Nacional de Tumbes, le expida el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente de conformidad con lo estipulado en el Artículo 90 del Estatuto de la Universidad Nacional de Tumbes y a lo normado en el Reglamento de Grados y Títulos.

Siendo las veintiuna horas con treinta y cinco (**35**) minutos, el presidente del jurado dio por concluido el presente acto académico y para mayor constancia de lo actuado firman en señal de conformidad todos los integrantes de este jurado, presentes en el acto de sustentación.

Mg. Alduvar Nectali López Celi

DNI: 32826529

Presidente

Dr. Eber L. Herrera Palacios

DNI: 42450218

Secretario

Mg. José A. Silva Chávez

DNI: N°41013171

Dedicatoria

En primer lugar, le dedico a Dios por ayudarme y guiarme a cumplir esta meta en mi vida, la cual es obtener mi título profesional, y así lograr ser un buen profesional al servicio de la sociedad.

A mis familiares por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi carrera universitaria, siempre alentándome a no rendirme y seguir adelante, así como mis docentes por todos sus consejos enseñanzas brindadas a lo largo de este tiempo, y a mis amigos que siempre estuvieron allí en las buenas y malas.

A Mi hermano Ailton Espinoza Mogollon y a mis amigos Maritza Madrid Guerrero, Edison Infante Huamán, Gustavo Moreno Medina, Nixon Castillo Gonzales, Antoni Cherres Seminario, Andy García Peña y Greys Noriega Peña, por su apoyo al momento recolectar la materia prima y a realizar las diversas pruebas en el laboratorio.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Tumbes, por ser mi casa de estudios superiores y a la vez haberme permitido el uso de sus instalaciones para la ejecución de mi tesis.

Al proyecto “Síntesis de puntos cuánticos de carbono (carbón quantum dots-CODs) a partir de biomasa residual agroindustrial, mediante el uso de carbonización hidrotérmica y/o microondas, con características técnicas adecuadas para su utilización en el transporte de biomoléculas” (contrato N°398-2019- FONDECYT) financiado por FONDECYT-CONCYTEC.

Al Dr. Gerardo Cruz Cerro, junto con el Ing. John Rimaycuna Ramirez y la Ing. Angie Gonzaga Sernaque, por su apoyo brindado durante la ejecución de la tesis, en la orientación al momento de realizar las pruebas en laboratorio, así también con facilitar bibliografía durante el desarrollo del proyecto.

Índice de contenido

I.	INTRODUCCIÓN	17
II.	REVISION DE LITERATURA (Estado del Arte)	20
III.	MATERIALES Y METODOS	28
3.1.	Recolección de muestras y acondicionamiento de muestras	28
3.2.	Producción de biocarbón.....	29
3.3.	Producción de carbón activado	29
3.4.	Tratamiento hidrotermal de biocarbón y carbón activado	30
3.5.	Caracterización de productos obtenidos	32
3.6.	Pruebas de adsorción	33
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
4.1.	Análisis superficial de materiales adsorbentes.....	34
4.1.1.	Materiales obtenidos a base de Raquis de banano	34
4.1.2.	Materiales obtenidos a base de cáscara de cacao	36
4.1.3.	Materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz	37
4.1.4.	Rendimiento de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.....	39
4.1.5.	Rendimiento de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao	40
4.1.6.	Rendimiento de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz.....	41
4.2.	Caracterización de los materiales obtenidos	42
4.2.1.	Análisis próximo	42
4.2.2.	Química superficial	46
4.2.3.	Propiedades texturales	66
4.3.	Cinética adsorción.....	70
4.3.1.	Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de raquis de banano.....	70
4.3.2.	Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de cáscara de cacao	78
4.3.3.	Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz	86
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
5.1.	Conclusiones	99

5.2. Recomendaciones	100
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	101
VII. ANEXOS	116
7.2. Tablas de adsorción de azul de metileno a una dosis de 05 G/L de material adsorbente.....	116
7.3. panel fotográfico	125

Índice de tablas

Tabla 1. Ecuaciones no lineales del modelo cinético de adsorción.	26
Tabla 2. Códigos y descripciones del biocarbón producidos.	29
Tabla 3. Códigos y descripción de los carbones activados a 2M y 5M (H ₃ PO ₄) producidos.	30
Tabla 4. Códigos y descripción de la fase solidad del biocarbón después del tratamiento hidrotermal.	30
Tabla 5. Códigos y descripción de la fase solidad de los carbones activados 2 y 5M (H ₃ PO ₄) después del tratamiento hidrotermal.	31
Tabla 6. Códigos y descripción de fase líquida del biocarbón después del tratamiento hidrotermal.	31
Tabla 7. Código y descripción de fase líquida de los carbones activados 2 y 5M (H ₃ PO ₄) después del tratamiento hidrotermal.	31
Tabla 8. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base de raquis de banano.	39
Tabla 9. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base cáscara de cacao.	40
Tabla 10. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base cascarilla de arroz.	41
Tabla 11. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.	43
Tabla 12. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao.	44
Tabla 13. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz.....	45
Tabla 14. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.	48

Tabla 15. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.....	51
Tabla 16. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cáscara de arroz.....	53
Tabla 17. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano.....	66
Tabla 18. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao.	67
Tabla 19. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz.	68
Tabla 20. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de raquis de banano sin/con tratamiento hidrotermal.	70
Tabla 21. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banano a 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	73
Tabla 22. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banano a 5 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	75
Tabla 23. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de cáscara de cacao sin/con tratamiento hidrotermal.	78
Tabla 24. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de cáscara de cacao a 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	80
Tabla 25. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banano a 5 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	83
Tabla 26. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de cascarilla de arroz sin/con tratamiento hidrotermal.	86
Tabla 27. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	88

Tabla 28. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	91
---	----

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación, de las muestras recolectadas	28
Figura 2. Materia prima y material adsorbente 2a) Raquis de banano, 2b) BC-RB, 2c) CA-2M-RB y 2d) CA-5M-RB	35
Figura 3. Materiales a base de raquis de banano después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 3a) BC-TH-RB, 3b) CA-2M-TH-RB, 3c) CA-5M-TH-RB.....	36
Figura 4. Materia prima y material adsorbente 4a) Cáscara de cacao, 4b) BC-CC, 4c) CA-2M-CC y 4d) CA-5M-CC	36
Figura 5. Materiales a base de cáscara de cacao después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 5a) BC-TH-RB, 5b) CA-2M-TH-RB, 5c) CA-5M-TH-RB.....	37
Figura 6. Materia prima y material adsorbente 6a) Cascarilla de arroz, 6b) BC-CA, 6c) CA-2M-CA y 6d) CA-5M-CA	38
Figura 7. Materiales a base de cascarilla de arroz después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 7a) BC-TH-RB, 7b) CA-2M-TH-RB, 7c) CA-2M-TH-RB.....	38
Figura 8. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano. 8a) BC-RB, 8b) CA-2M-RB y 8c) CA-5M-RB.....	47
Figura 9. . Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano después de TH. 9a) BC-TH-RB, 9b) CA-2M-TH-RB y 9c) CA-5M-TH-RB.	47
Figura 10. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao. 10a) BC-CC, 10b) CA-2M-CC y 10c) CA-5M-CC	49
Figura 11. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cacao después de TH. 11a) BC-TH-CC, 11b) CA-2M-TH-CC y 11c) CA-5M-TH-CC.....	50

Figura 12. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz. 15a) BC-CA, 15b) CA-2M-CA y 15c) CA-5M-CA.....	51
Figura 13. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz después de TH. 16a) BC-TH-CA, 16b) CA-2M-TH-CA y 16c) CA-5M-TH-CA	52
Figura 14. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de RB.	55
Figura 15. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de CC.....	59
Figura 22. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de CA.	63
Figura 17. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando biocarbón a base de raquis de banano sin/con tratamiento hidrotermal.	72
Figura 18. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de raquis de banano a 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.....	74
Figura 19. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de raquis de banano a 5 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.....	76
Figura 20. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando biocarbón a base de cáscara de cacao sin/con tratamiento hidrotermal.	80
Figura 21. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de cascara de cacao 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.....	82

Figura 22. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de cáscara de cacao a 5 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	84
Figura 23. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando biocarbón a base de cascarilla de arroz con tratamiento hidrotermal.	87
Figura 24. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de cascarilla de arroz 2 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	90
Figura 25. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 5 M de H ₃ PO ₄ sin/con tratamiento hidrotermal.	92

Índice de anexos

Anexo 1. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Raquis de Banano.	116
Anexo 2. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascara de Cacao.	116
<i>Anexo 3. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascarilla de Arroz.</i>	<i>117</i>
Anexo 4. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Raquis de Banano sometido a tratamiento hidrotermal.	117
Anexo 5. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascara de Cacao sometido a tratamiento hidrotermal.	118
Anexo 6. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento hidrotermal.	118
Anexo 7. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Raquis de Banano.	119
Anexo 8. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Cascara de Cacao.	119
Anexo 9. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Cascarilla de Arroz.	120

Anexo 10. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Raquis de Banano sometido a tratamiento hidrotermal.	120
Anexo 11. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Cascara de Cacao sometido a tratamiento hidrotermal.	121
<i>Anexo 12. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H₃PO₄ de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento hidrotermal.</i>	121
Anexo 13. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 5M de H ₃ PO ₄ de Raquis de Banano.	122
Anexo 14. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 5M de H ₃ PO ₄ de Cascara de Cacao.	122
Anexo 15. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 5M de H ₃ PO ₄ de Cascarilla de Arroz.....	123
Anexo 16. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 5M de H ₃ PO ₄ de Raquis de Banano sometido a tratamiento hidrotermal.	123
Anexo 17. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Cascara de Cacao sometido a tratamiento hidrotermal.	124
Anexo 18. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado 2M de H ₃ PO ₄ de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento hidrotermal.	124
Anexo 19. Recolección de muestras de raquis de banano (a) y cascara de cacao (b).	125
Anexo 20. Secado de muestra post lavado (a) estufa Memmert SNB 400 (b).	125
Anexo 21. Tamizado de materia prima a un diámetro de 1.5mm.	126
Anexo 22. Colocación de materia prima en horno tubular a una temperatura de 600°C por un periodo de 2 horas.	126
Anexo 23. Material obtenido y tamizado.	127
Anexo 24. Lavado y secado de material obtenido.	127

Anexo 25. Pesado de materiales para ser sometidos a tratamiento hidrotermal.	128
Anexo 26. Fase líquida y sólida obtenida después del tratamiento hidrotermal.	128
Anexo 27. Pesado y secado de material obtenido, para la determinación de su contenido de humedad y porcentaje de cenizas.....	129
Anexo 28. Ajuste de pH en rangos de 3 hasta 10 para posteriormente determinar el pH de carga cero.	129
Anexo 29. Analizador de área superficial NOVAtouch LX ⁴ ,.....	130
Anexo 30. Cinética de adsorción de azul de metileno 20ppm, con dosis de adsorbente de 0,5 g/L.	130
Anexo 31. Proceso de filtrado de muestras para realizar lectura en el espectrofotómetro uv-vis.	131
Anexo 32. Analizador de espectros infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) IRTracer-100.....	131
Anexo 33. Concentración de muestras en fase líquida, para posteriormente realizar su lectura en el analizador de espectros.....	132

Resumen

La presente investigación fue realizada en el laboratorio de análisis ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes, durante los meses de enero hasta octubre del 2021. Esta investigación busca obtener subproductos derivados del tratamiento hidrotermal (TH) de carbón activado (CA) y biocarbón (BC) producidos a partir de residuos agroindustriales. Las materias primas (Raquis de Banano- RB, Cascara de Cacao- CC y Cascarilla de Arroz- CA) fueron carbonizadas para la obtención de BC (600°C/2h en atmosfera de nitrógeno). Mientras que, para la obtención de CA, se utilizó ácido fosfórico (H_3PO_4) a 2M y 5M como agente activante. Los CA y BC fueron sometidos a tratamiento hidrotermal a 150°C durante 2h con una presión de 5 bar.

Con los productos obtenidos, se procedió a realizar la caracterización debida, análisis superficial (contenido de humedad, contenido de cenizas), química superficial (pH_{PZC} , FTIR) y propiedades texturales (Área superficial, volumen de poros). Además, para evaluar la efectividad de los materiales adsorbentes se realizó pruebas de adsorción con el colorante azul de metileno a una concentración de 20ppm, la cual se analizó mediante los modelos matemático de pseudo primer orden (PFO) y pseudo segundo orden (PSO).

Se encontró como resultado que el carbón activado a 5M de H_3PO_4 a base de raquis de banano sin tratamiento hidrotermal resulto con la mayor capacidad de adsorción de azul de metileno con un valor de 32,379 mg/g, siendo este el de mayor capacidad de adsorción a diferencia del resto de residuos agroindustriales trabajados, además obtuvo un rendimiento del 38%, además un contenido de humedad de 12,90% y un contenido de ceniza del 28,34%, con respecto al pH carga cero obtuvo un valor de 7,29 y por último el carbón activado a 5M de H_3PO_4 obtuvo 26,8 m²/g de área superficial y 0,02 m³/g_{liq}.

Palabras clave: Biocarbón, Carbón activado, tratamiento hidrotermal, residuos agroindustriales.

Abstract

This research was conducted at the environmental analysis laboratory of the Universidad Nacional de Tumbes, during the months of January through October 2021. This research seeks to obtain by-products derived from the hydrothermal treatment of activated carbon (AC) and biochar (BC) produced from agro-industrial waste. The raw materials (banana rachis - R, cocoa husk - C and rice husk - A) were carbonized to obtain BC (600°C/2h in nitrogen atmosphere). Meanwhile, phosphoric acid (H_3PO_4) at 2M and 5M was used as activating agent to obtain CA. The CA and BC were subjected to hydrothermal treatment at 150°C for 2h with a pressure of 5 bar.

With the products obtained, the due characterization was carried out, surface analysis (moisture content, ash content), surface chemistry (pHPZC, FTIR) and textural properties (Surface area, pore volume). In addition, to evaluate the effectiveness of the adsorbent materials, adsorption tests were carried out with the methylene blue dye at a concentration of 20ppm, which was analyzed using the mathematical models of pseudo first order (PFO) and pseudo second order (PSO).

As a result, it was found that activated carbon at 5M H_3PO_4 based on banana rachis without hydrothermal treatment resulted in the highest adsorption capacity for methylene blue with a value of 32.379 mg/g, this being the one with the highest adsorption capacity at difference from the rest of the processed agro-industrial residues, it also obtained a yield of 38%, in addition to a moisture content of 12.90% and an ash content of 28.34%, with respect to the pH zero load, it obtained a value of 7.29 and Finally, activated carbon at 5M H_3PO_4 obtained 26.8 m²/g of surface area and 0.02 m³/g_{liq}.

Key words: Biochar, activated carbon, hydrothermal treatment, agro-industrial wastes.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú a lo largo de los años ha venido experimentando un alto crecimiento en la actividad agroindustrial (Escalante Rebolledo et al., 2016) con cultivos como cacao (Prado, 2021), arroz (Arias & Becerra, 2020), banano (Retto, 2019), entre otros; generando así una alta cantidad de residuos que actualmente por las condiciones de manejo que se les aplica vienen causando diferentes impactos adversos al ambiente (Cardoen et al., 2015).

Actualmente a pesar de que existen diversas alternativas para el aprovechamiento de dichos residuos, solo una pequeña parte de estos son reutilizados como alimento para animales y abono orgánico (Elías Silupu et al., 2020), lo demás son dispuestos en botaderos autorizados o no autorizados generando malos olores producto de la descomposición anaeróbica o aeróbica (Bone Lemos & López Villalta, 2021), además de generar partículas por la quema estos y por consecuencia generando gases de efecto invernadero (E. Herrera et al., 2021).

La creciente preocupación por el uso de residuos agroindustriales ha generado la búsqueda de procesos de transformación y reutilización de esto (Güemes-Vera et al., 2020), una de las opciones para el aprovechamiento de dichos residuos es la producción de materiales adsorbentes como el biocarbón (Beesigamukama et al., 2020), un material de moderada área superficial, que cuenta con múltiples aplicaciones en el campo agrícola, en generación de energías y en el campo ambiental (Sohi et al., 2010). Además estos residuos producidos pueden ser empleados para transformarlos en productos que le aporten mayor valor agregado como el carbón activado e hidrocarbón (Burgos Campuzan & Jaramillo Quiroz, 2015; Kannan et al., 2020).

En la región Tumbes una de las principales actividades económicas es la agricultura (Sapaico Castañeda et al., 2018), se cultivan alrededor de 33 cultivos, del cual 17 son transitorios y lo restante son permanentes y especiales.

El cultivo transitorio más representativo de la región es el arroz cáscara con un área de cultivo total de 14557 ha (Sanjinez Salazar, 2019). Toda esa producción genera una gran cantidad de residuo (cascarilla), este residuo está conformado por celulosa y sílice (Valverde G. et al., 2007), además entre sus principales

características resaltan el poder calorífico, la composición química y la humedad (Avalos & Torres, 2018), los cuales permiten que tenga facultades para ser transformado en materiales adsorbentes.

El cultivo de banano es el principal cultivo permanente de la región con un área de cultivo total de 4535 ha (García Criollo, 2021), durante su proceso de cultivo se genera grandes cantidades de residuos orgánicos, como los tallos, la fruta de rechazo, la hojarasca y principalmente el raquis (Veliz Pérez, 2021), este último residuo se genera en la etapa de cosecha, lamentablemente, no es aprovechado por parte de la industria, ya que estos una vez extraídos de los racimos, son depositados en el suelo hasta que se lleve su biodegradación (Florian et al., 2019).

Si bien los cultivos de arroz y plátano, son dos de los principales cultivos de la región Tumbes, desde hace algunos años, el cultivo de cacao se ha ido expandiendo en una alta cantidad de producción, lo que a mediano plazo, este podría convertirse en un cultivo de importancia económica para la región, sin embargo como todo cultivo este también genera sus residuos, el más sobresaliente es la cáscara la cual comprende un 90% del fruto, (Burgos Campuzan & Jaramillo Quiroz, 2015), se proponen diversos usos para la cáscara de cacao, en las que sobresalen el aprovechamiento como alimento para animales de granja, precursor para la elaboración de sales de potasio para jabón y materiales absorbentes como lo son el carbón activado y biocarbón (Sanchez, 2014).

Estos residuos agroindustriales contienen grandes cantidades de carbono, en el caso del raquis de banano contiene 35,3% de celulosa, 17,9% de hemicelulosa y 6% de lignina (Florian et al., 2019); la cascara de cacao contiene 19,7 a 26,1% de celulosa, 8,7 a 12,8% de hemicelulosa y 28% de lignina (F. Lu et al., 2018); y la cascarilla de arroz contiene 62,2% de celulosa + hemicelulosa, y 21,8% de lignina (Barana et al., 2016). Dado la naturaleza lignocelulolítica de estos materiales son potencialmente aprovechables para la producción de materiales carbonosos (Ma et al., 2017).

Como aprovechamiento para estos residuos agroindustriales, se está optando por la producción de materiales adsorbentes, estos materiales hoy en día se

están empleando en el tratamiento de aguas residuales, en la eliminación de contaminantes de aguas y en la recuperación de suelos agrícolas, además de esto en los últimos años se ha venido aplicando el tratamiento hidrotermal tanto al biocarbón como al carbón activado, para mejorar sus propiedades según la aplicación a la que están destinados. Sin embargo, no se ha encontrado información sobre la caracterización de los subproductos de la fase líquida derivados de la carbonización hidrotermal.

Por ello se realizó esta investigación con el objetivo de obtener y caracterizar subproductos de las fases líquida y sólida derivados de la carbonización hidrotermal de materiales adsorbentes a base de residuos agroindustriales, además se hizo una comparación de la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno con los materiales adsorbentes con tratamiento hidrotermal y sin este.

II. REVISION DE LITERATURA (Estado del Arte)

El pirólisis es una reacción termoquímica que descompone compuestos orgánicos en condiciones limitadas de oxígeno o en ausencia de oxígeno (Leng et al., 2018), y se utiliza con frecuencia para el procesamiento de biomasa (Leng et al., 2021). De acuerdo con la velocidad de calentamiento y el tiempo de reacción, la pirólisis se divide en pirólisis rápida, que se procesa a una velocidad de calentamiento muy alta (10-200 °C/s) con un tiempo de residencia de varios segundos (0,5-10 s, generalmente <2 s) para producir principalmente bio-aceite (J. Liang et al., 2021), y pirólisis lenta, que tiene una baja tasa de calentamiento (1-100 °C / min) y generalmente toma mucho tiempo de residencia (que dura minutos a horas o incluso días) para producir el producto de biocarbón (Leng et al., 2020).

El biocarbón es un material rico en carbono, una alta capacidad de intercambio catiónico, una gran superficie y una estructura de estabilidad (Tareq et al., 2019) se produce a partir de materia prima orgánica seca y sin tratamiento químico (Kambo & Dutta, 2015), sus propiedades y rendimiento van a depender del tipo de biomasa, y condiciones de pirolisis (Nanda et al., 2016), el área superficial, la porosidad y los grupos funcionales son unas de sus propiedades más importantes (Leng et al., 2021; X. Tan et al., 2015) y mejoran las propiedades del biocarbón, como la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de retención de agua y la capacidad de adsorción (Weber & Quicker, 2018) convirtiéndose en una alternativa sustentable para su aplicación en la recuperación de suelos (Ruiz Perez, 2019), enmienda de cultivos (E. L. Herrera et al., 2018) y tratamiento de aguas residuales (Présiga-López et al., 2021).

Otro producto de la pirolisis a base de biomasa es el carbón activado (Vidal et al., 2018), el cual es un producto microcristalino, carbonoso y no grafitico (Sarmiento Fadul, 2021), cuyo proceso de activación se produce mediante gases oxidantes, o adicionando productos químicos como son el ácido fosfórico (H_3PO_4), cloruro de Zinc ($ZnCl_2$) (Heidarinejad et al., 2020), con el propósito de extender su porosidad y amplificar su superficie interna lo que otorga una elevada capacidad de adsorción (Martinez de Yuzo, 2015).

El carbón activado tiene una gran superficie porosa, estructura de poros sintonizable (Y. Yu et al., 2019) y química de superficie, buena termoestabilidad a altas temperaturas en atmósferas inertes o de reducción, baja reactividad ácido-base (Qu et al., 2019), además se ha demostrado que es un adsorbente eficaz para eliminar una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, compuestos polares y no polares en la fase acuosa o del medio ambiente gaseoso (Ao et al., 2018).

En la elaboración de carbones activados empleando baya de cacao, parte interna y parte externa de mango y cáscara de café, se lograron obtener materiales con una elevada área superficial BET que van desde 892m²/g y 1180m²/g respectivamente, y un área superficial moderada en la región mesoporosa, dichos productos presentan una estructura desarrollada, albergando diversos poros en varias formas y tamaños (Cerro et al., 2015).

En un estudio hecho por (Carrillo Quijano, 2013), en la elaboración de carbón activado a base de cascarilla de arroz, se determinó que, a un mayor lapso de tiempo de activación, el área BET y el volumen de poros reducen su tamaño, lo que expresa una afectación negativa, puesto que al producir carbón activado se quiere obtener el área superficial y el volumen de los poros de mayor tamaño. El carbón activado a base de cascarilla de arroz no cuenta con características óptimas para ser material absorbente para el colorante amarillo anaranjado, ya que cuenta con un área de microporos pequeña (Ensuncho et al., 2015).

El carbón activado obtenido mediante cáscaras de plátano, utilizando como agente activante el ácido fosfórico, carbonizado a tres temperaturas diferentes (400,500, 600 °C cuentan con mayores micropartículas, además puede presentar poros de forma clara con agujeros transparentes, partes con superficies lisas, canales complejos y partículas en forma de aglomerados (Bibaj et al., 2019)

Una de las nuevas tecnologías para mejorar las propiedades del biocarbón, así como las del carbón activado es someterlos a un proceso hidrotermal (Prasannamedha et al., 2021; Xing et al., 2019a), el cual es un proceso de conversión, en temperaturas de 180-260°C, donde el material a tratar es

sumergido en agua y calentado por un sistema a una presión controlada (Heidari et al., 2019).

Estudios mencionaron que el tratamiento hidrotermal es una tecnología prometedora para convertir la biomasa en carbón de tipo lignito (Parshetti et al., 2013), en biocarbón líquido (Hoekman et al., 2011), en un protector del suelo (Libra et al., 2011; Rillig et al., 2010), en un material de carbono para la adsorción de contaminantes líquidos (Regmi et al., 2012), en material de carbono de nano estructura (Cui et al., 2006), en un catalizador de carbono (Hu et al., 2010; L. Yu et al., 2012), o en material de carbono para aumentar la eficiencia de la pila de combustible (Titirici et al., 2012).

El resultado de dicho proceso es la creación de 3 subproductos principales: el sólido (Carbón), líquido (Bio aceite mezclado con agua) y escasas fracciones de gases, destacando el CO₂ (Kambo & Dutta, 2015), en el proceso de carbonización ocurre un reordenamiento de su estructura por degradación en sólido, líquido y gaseoso (Guachi Cabrera, 2019). La parte sólida presenta una composición química y apariencia física dependiente de la biomasa utilizada (Y. Lu & Savage, 2015), lo diferente en la composición química se indica por los mecanismos de reacción que suceden durante el proceso de carbonización, los cuales son hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización y recondensación (Guachi Cabrera, 2019).

Aunque estos procesos suceden en el orden mencionado, no suelen operar de manera continua, se dan aleatoriamente durante el proceso de carbonización y son interconectados entre sí (Fang et al., 2018), de las reacciones antes mencionadas, la hidrólisis es la que cuenta con la menor energía de activación, ya que esta descompone la estructura química de la biomasa por medio de la escisión de enlaces éster y éter de bio-macromoléculas con moléculas de agua, en la deshidratación el agua de la matriz de la biomasa es eliminada, produciendo la eliminación de los grupos hidroxilos (Aguilera Torre, 2020), por su parte la descarboxilación es la encargada de eliminar el CO₂ de la biomasa, a la vez durante este proceso se elimina el grupo carboxilo (Fang et al., 2018), la aromatización sucede gracias a la deshidratación y la descarboxilación, los

grupos funcionales que presentan doble enlace como C=O y C=C sustituyen a los grupos hidroxilo y carboxilo (Cayo Reinoso, 2018).

Los compuestos furfural que se generan por estos dos mecanismos se someten a hidrólisis, la cual los quiebra más en ácidos, aldehídos y fenoles, los ácidos que se generan posteriormente catalizan la liberación de elementos inorgánicos de la matriz de la biomasa (Espinoza Tapia et al., 2020). La recondensación de los productos degradados en la carbonización lleva a la formación de carbón (Fang et al., 2018).

En estudios se realizó el análisis a la fase líquida del proceso de carbonización hidrotermal de bagazo de agave, puesto que en este líquido se pueden obtener subproductos de interés comercial, siendo uno de ellos el furfural, el cual es usado como precedente en la elaboración de distintos solventes y productos para química fina, con el análisis de CG/MS (cromatografía de gases), se encontraron diversos compuestos tales como 1,2-dimetil-benceno, 1,2 furanil-etanona, piroles, fenol, entre otros (Mendoza, 2018).

Como caracterización general de estos materiales es considerado determinar la humedad, cenizas que pertenecen al análisis proximal, en lo que es química superficial se realizan las pruebas de pH carga Zero y Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y las propiedades texturales como son área superficial y volumen de poros.

La ASTM, define la humedad del biocarbón como la cantidad de masa de agua perdida durante el secado de la muestra, asumiendo que es el único material volátil a una temperatura de 105°C, las cenizas es definida como la fracción no orgánica que se encuentra libre de humedad y presenta gran cantidad de minerales (Bachmann et al., 2016).

El pH de carga Zero, está definido como el valor del pH donde la carga neta total (externa e interna) de las partículas sobre la superficie del material adsorbente es neutra, es decir tanto el número de sitios positivos junto con números de sitios negativos es el mismo (Franks & Meagher, 2003), la técnica de caracterización de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se realiza para identificar cualitativamente los posibles grupos funcionales, esta prueba está basada en la capacidad de las moléculas para

transmitir y absorber radiación infrarroja, cuando sobre ellas inciden haces de energía de diversas longitudes de onda, consiguiendo un espectro de absorción infrarrojo, el cual podrá analizarse la frecuencia de resonancia que es la energía absorbida en longitudes de onda determinadas en las estructuras moleculares que, a su vez, están asociadas a modos de movimientos y tipos de enlaces específicos (Delgado, 2019).

El área superficial es de vital importancia en la adsorción de contaminantes orgánicos, esta se ve afectada por las condiciones de operación al momento de la carbonización, al emplear la pirolisis como alternativa de producción sobresale el aumento del área superficial y el tamaño de los poros al aumentar el tiempo de residencia (Cha et al., 2016). El volumen de poros presente en el biocarbón o carbón activado es de gran importancia para la adsorción de contaminantes, es este caso el volumen del poro tiene que presentar un adecuado tamaño para alojar una molécula del contaminante al que se va a aplicar, se destaca que la porosidad del biocarbón suele ser alta; está compuesto por micro, meso y macroporos, cuyos tamaños van desde $< 2\text{nm}$, $2\text{-}50\text{nm}$ y $>50\text{nm}$, respectivamente (Zhu et al., 2018).

En la elaboración de carbones activados empleando baya de cacao, parte interna y parte externa de mango y cáscara de café, se lograron obtener materiales con una elevada área superficial BET que van desde $892\text{m}^2/\text{g}$ y $1180\text{m}^2/\text{G}$ respectivamente, y un área superficial moderada en la región mesoporosa, dichos productos presentan una estructura desarrollada, albergando diversos poros en varias formas y tamaños (Cerro et al., 2015).

Este tipo de materiales carbonosos son utilizados para el tratamiento de aguas en la eliminación de contaminantes por medio de adsorción, el termino adsorción su utiliza para describir la existencia de una elevada concentración de cualquier sustancia en la superficie de un líquido a sólido, esta concentración superficial suele ser bastante mayor que la concentración promedio en el sólido o en el líquido, debido al estado en el desbalance de fuerzas moleculares o al estado de instauración. Como resultado las superficies sólidas y líquidas tienden a completar sus fuerzas atrayendo y reteniendo en sus superficies gases o sustancias disueltas, con las cuales entren en contacto. Las sustancias

así adsorbidas en la superficie se denomina fase adsorbida o adsorbato, mientras que la sustancia en la cual está fijada se conoce como adsorbente (Hernández-Rodríguez et al., 2017). La adecuada dosis de adsorbente, tiene un dominio significativo en la eficiencia de adsorción, la aplicación de una óptima dosis de biocarbón para la erradicación de contaminantes es crucial para obtener una aplicación rentable (Chen et al., 2011).

En el campo de la adsorción, el beneficio de esta se puede plasmar como la cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio o el porcentaje de adsorbato eliminado. La cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio (q_e ; mg/g, a menudo se calcula empleando el balance de materiales de un sistema de adsorción; el adsorbato, que desaparece de la solución, debe estar presente en el adsorbente (Tran et al., 2017).

$$q_e = \frac{C_o - C_e}{m} V \quad Eq. 1$$

Donde:

- C_o (mg/L) y C_e (mg/L) son la concentración de adsorbato inicial y de equilibrio en la solución respectivamente.
- m (g) es la masa seca del adsorbente empleado.
- V (L) es el volumen de la solución de adsorbato; y m/V (g/L) se define como la relación sólida/líquido (X. Tan et al., 2015).

La relación que se da entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la presión o concentración de equilibrio a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción, la cual es una parte fundamental para moldear la adsorción, así como para el diseño, cálculo de eficiencias y los costos de la adsorción. Las isotermas nos permiten valorar el nivel de remoción que llega a ser alcanzado, la cantidad que se requiere de adsorbente, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del soluto. A la vez es necesario instaurar, mediante el uso de coeficientes de transparencia de masa, el tiempo preciso para lograr una separación (Zhang, 2019).

El estudio de la cinética de adsorción tiene importancia por las siguientes razones:

- Permite conocer el tiempo de interacción adsorbato-adsorbente y

- Permite la determinación de la etapa determinante de la adsorción (Rimaycuna Ramírez, 2020).

Seguidamente se presentan las ecuaciones no lineales en su forma extensa:

Tabla 1. Ecuaciones no lineales del modelo cinético de adsorción.

Modelo	Ecuación	Parámetros
Pseudo Primer Orden (PFO)	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	q_t : cantidad de adsorción de adsorbato por masa de adsorbente en cualquier tiempo t (min) (mg/g) q_e : cantidad de adsorción de adsorbato por masa de adsorbentes en el equilibrio (mg/g) k_1 : constante de velocidad de la ecuación de PFO (min^{-1})
Pseudo segundo orden (PSO)	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + k_2 q_e t}$	k_2 : constante de velocidad de la ecuación PSO (g/mg x min) h : tasa de adsorción inicial (mg/g x min), $h = k_2 q_e^1$

Fuente (Rimaycuna Ramírez, 2020)

La interacción electrostática entre las especies contaminantes y la superficie del biocarbón es el mecanismo principal, responsable de la desaparición de colorantes catiónicos aromáticos. Los biocarbones obtenidos a base de residuos de cultivos de trigo y paja de arroz logran eliminar eficazmente colorantes como el azul de metileno, el violeta de metilo y la rodanina utilizando interacción electrostática (Xu et al., 2011). Uno de los colorantes que se usan con más frecuencia, tanto en las industrias así como a nivel de laboratorio, es el azul de metileno, debido a que es un colorante modelo para colorear fácilmente cualquier superficie y para realizar experimentos científicos, además de su abundancia y fácil manera de obtenerse (Funar-Timofei et al., 2012), no se considera un colorante toxico, pero su presencia por periodos largos,

podrían ocasionar varios efectos nocivos para los seres vivos (Deng et al., 2011), por ejemplo, al inhalarse, causa dificultad y agitación en la respiración, mientras que su ingestión produce vómitos, náuseas confusión mental, entre otras (Rafatullah et al., 2010).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Recolección de muestras y acondicionamiento de muestras

Se utilizó como materias primas cáscara de cacao (CC), raquis de banano (RB) y cascarilla de arroz (CA), las cuales CC y RB fueron recolectadas en parcelas de producción ubicadas en el sector de Pueblo Nuevo del Caserío de Cabuyal del distrito de Pampas de Hospital, mientras que CA se recolectó en un molino ubicado en el distrito de Corrales (Figura 1), se recolectó una cantidad de 20 kg de cada materia prima.

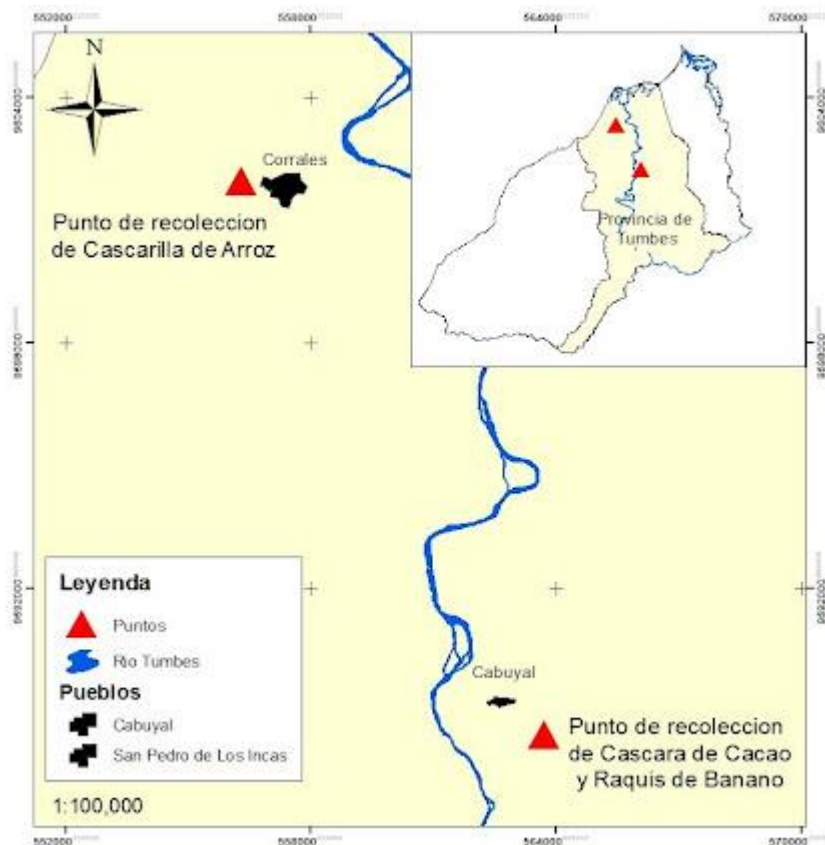


Figura 1. Mapa de ubicación, de las muestras recolectadas

Posteriormente a su recolección fueron trasladadas al laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional de Tumbes, en donde se realizó el lavado con agua para la eliminación de impurezas y polvo, luego se realizó un fraccionamiento para realizar el secado en una estufa (Memmert SNB 400) (anexo 20), por un periodo de 72 horas a 100°C.

La materia prima seca en su totalidad, fue molida empleando un molino industrial, para ser tamizada y lograr un tamaño de partícula comprendido entre 0,50 a 1,00 mm. El material obtenido, fue almacenado en un lugar seco y con temperatura controlado para evitar su posible deterioro.

3.2. Producción de biocarbón

Para la producción del biocarbón (BC) se utilizó como materia prima, CC, RB y CA con tamaño de partícula inicial de 0,50 – 1,00 mm (anexo 21), siguiendo la secuencia de (Cruz et al., 2015a), la muestra fue colocada en un tubo de acero inoxidable para posteriormente ser introducido en un reactor adaptado a un horno tubular (*Nabertherm GmbH, Alemania*) (anexo 22), a 600°C en un periodo de 2 horas. Posteriormente el material obtenido fue lavado con una solución acida de (0,1 N de HCl), después el material fue secado en estufa a 80°C hasta la obtención de un peso constante.

Tabla 2. Códigos y descripciones del biocarbón producidos.

Código	Descripción
BC-RB	Biocarbón de raquis de banano
BC-CC	Biocarbón de cáscara de cacao
BC-CA	Biocarbón de cascarilla de arroz

3.3. Producción de carbón activado

Para la producción de carbón activado (CA), se utilizó como agente activante el ácido fosfórico (H_3PO_4), en concentraciones de 2 y 5 molar (M), las cuales fueron homogenizadas con la materia prima, para la activación se va a trabajar en relación 1/1, al tener las muestras homogenizadas siguiendo la secuencia de (Cruz et al., 2015b), se colocara en el tubo de acero inoxidable a una temperatura de 600°C por un periodo de 2 horas en atmosfera de nitrógeno, pasado el periodo de carbonización se procederá a lavar con solución ácida de (0,1N de HCl) y abundante agua destilada, para después ser llevado a estufa a 80°C hasta obtener un peso constante.

Tabla 3. Códigos y descripción de los carbones activados a 2M y 5M (H₃PO₄) producidos.

Código	Descripción
CA-2M-RB	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de raquis de banano
CA-2M-CC	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cáscara de cacao
CA-2M-CA	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cascarilla de arroz
CA-5M-RB	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) de raquis de banano
CA-5M-CC	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) de cáscara de cacao
CA-5M-CA	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) de cascarilla de arroz

3.4. Tratamiento hidrotermal de biocarbón y carbón activado

Los materiales adsorbentes BC y CA fueron sometidos al tratamiento hidrotermal (TH) con un *Setup* (reactor hidrotermal) (anexo 6) teniendo como condiciones una presión de 5 bares y una temperatura controlada de 150°C por un periodo de 2 horas a partir de llegada la temperatura, dentro del reactor se colocó 20g de muestra solida (material adsorbente) y 150ml de agua destilada, transcurrido el tiempo de carbonización se procedió a separar la parte solida de la líquida, las cuales serán caracterizadas.

La fase sólida obtenida fue lavada con solución acida y posteriormente secado por un periodo de 48 horas en estufa a 70°C, mientras que la parte líquida fue almacenada en tubos de 50 ml, los cuales fueron puestos en refrigeración, para posteriormente pasar a un proceso de centrifugación y se realice su respectiva caracterización.

Tabla 4. Códigos y descripción de la fase solidad del biocarbón después del tratamiento hidrotermal.

Código	Descripción
BC-TH-RB	Biocarbón con tratamiento hidrotermal de RB
BC-TH-CC	Biocarbón con tratamiento hidrotermal de CC
BC-TH-CA	Biocarbón con tratamiento hidrotermal de CA

Tabla 5. Códigos y descripción de la fase solidad de los carbones activados 2 y 5M (H₃PO₄) después del tratamiento hidrotermal.

Código	Descripción
CA-2M-TH-RB	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de raquis de banano
CA-2M-TH-CC	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de cáscara de cacao
CA-2M-TH-CA	Carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de cascarilla de arroz
CA-5M-TH-RB	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de raquis de banano
CA-5M-TH-CC	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de cáscara de cacao
CA-5M-TH-CA	Carbón activado 5M (H ₃ PO ₄) con tratamiento hidrotermal de cascarilla de arroz

Tabla 6. Códigos y descripción de fase líquida del biocarbón después del tratamiento hidrotermal.

Código	Descripción
FL-BC-RB	Fase líquida de biocarbón de raquis de banano
FL-BC-CC	Fase líquida de biocarbón de cáscara de cacao
FL-BC-CA	Fase líquida de biocarbón de cascarilla de arroz

Tabla 7. Código y descripción de fase líquida de los carbones activados 2 y 5M (H₃PO₄) después del tratamiento hidrotermal.

Código	Descripción
FL-CA-2M-RB	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de raquis de banano
FL-CA-2M-CC	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cáscara de cacao

Tabla 7. Continuación...

FL-CA-2M-CA	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cascarilla de arroz
FL-CA-5M-RB	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de raquis de banano
FL-CA-5M-CC	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cáscara de cacao
FL-CA-5M-CA	Fase líquida de carbón activado 2M (H ₃ PO ₄) de cascarilla de arroz

3.5. Caracterización de productos obtenidos

La caracterización de los materiales, inicio con el análisis proximal, usando como referencia las normas dispuestas por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), determinándose los parámetros del contenido de humedad (D2867-09) (ASTM International, 2004) y porcentaje de cenizas (D1506-15) (ASTM., n.d.).

El pH de carga cero (pH_{PZC}) fue medido utilizando el método pH *drift*, donde se preparó una solución de Nitrato de Potasio (KNO₃) al 0,01 M, la cual fue saturada con nitrógeno gas, para reducir el efecto del CO₂, seguidamente la solución fue dividida en 8 erlenmeyer de 200ml, cada uno con 50ml de solución, para el ajuste del nivel de pH en valores de entre 3 y 10 se empleó soluciones de NaOH y H₂SO₄ a 0,1N según lo amerite el caso.

Se colocó 0,1g de los materiales adsorbentes solidos (BC, CA, BC-TH, CA-TH), en cada erlenmeyer, se taparon y fueron colocados en agitación constante por un periodo de 48 horas en un agitador orbital (*Gesellschaft für Labortechnik*, Alemania).

Transcurrido el tiempo se tomaron alícuotas de cada erlenmeyer, las cuales fueron filtradas con papel filtro *Whatman 1* y se determinó el pH final, con un multiparametro *Multi 3620 IDS*. El pH_{PZC} se calculó de la intercepción de las curvas del pH inicial vs pH final.

La determinación de las características texturales se basó en la técnica de adsorción de N₂ a 77K en un analizador de área superficial *NOVAtouch LX⁴* (anexo 29), mediante los datos de adsorción se determinó el área superficial específica (S_{BET} en m²/g) con la metodología descrita por *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). El valor del volumen total de poros (V_{neto}) se calculó a partir del máximo volumen de nitrógeno adsorbido a la máxima presión relativa (0,989).

Los grupos funcionales de las superficies de los materiales adsorbentes fueron analizados mediante un analizador de espectros infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) *IRTracer-100* (anexo 32).

3.6. Pruebas de adsorción

Se realizó la prueba de cinética de adsorción al colorante azul de metileno, aplicando modelos matemáticos para determinar la capacidad de adsorción.

Para realizar la prueba de cinética de adsorción de azul de metileno, se preparó una solución de 20 ppm de esta, la dosis empleada de adsorbente que se utilizó fue de 0,5 g/L, a temperatura ambiente. En una cantidad de 200ml de solución de azul de metileno, se le agregó 0,1 g de material adsorbente, la muestra fue colocada en agitación durante 240 minutos en un agitador magnético, extrayendo periódicamente muestras en los 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240 min, las cuales las alícuotas extraídas fueron filtradas en papel filtro *Whatman 1*, para luego ser analizadas en es espectrofotómetro UV-VIS Lambda 365. Para analizar los datos de esta prueba se aplicó la forma no lineal de la ecuación de los modelos cinéticos, el pseudo primer orden (*PFO*) y el pseudo segundo orden (*PSO*).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis superficial de materiales adsorbentes.

Se produjeron materiales puros (biocarbón) y materiales compósitos (Carbón Activado), de residuos agroindustriales (Raquis de banano, Cáscara de Cacao y Cascarilla de arroz), en el caso de los compósitos fueron funcionalizados con ácido fosfórico en diferentes concentraciones (2 y 5 M) para obtener materiales adsorbentes.

Los cambios químicos y físicos que se producen, ocurren simultáneamente en la pirolisis, y dependen en gran medida de las condiciones del reactor, los parámetros de operación y la naturaleza de las materias primas (Onay, 2007) y esto depende el rendimiento y las propiedades de los materiales.

Las partículas de materiales funcionales se almacenaron en la superficie de carbono y dentro de la matriz del biocarbón, la cual podría servir como sitios altamente activos para poder adsorber contaminantes de soluciones acuosas. Los compuestos resultantes tienen funciones y propiedades superiores heredadas de nanopartículas funcionales y biocarbón (Ahmed et al., 2016).

4.1.1. Materiales obtenidos a base de Raquis de banano

En la figura 2, se observa los materiales que se han empleado en la presente investigación, en la figura 2a se observa a simple vista la estructura del raquis de banano, presentando un color marrón con algunos filamentos negros y cremas, con una textura blanda y lisa con granulometría de forma irregular, asimismo en la imagen 2b se observa el biocarbón de raquis de banano con coloración negro brillante, con una textura fina y de granulometría de forma irregular, así mismo se observa el carbón activado a 2M con y el carbón activado a 5M con ácido fosfórico en, el cual se observa un cambio visible en la apariencia del material, estos presentan una granulometría más fina y un aspecto blanquecino como se muestran en la figura 2c y 2d es visible la disposición del ácido

fosfórico en la superficie, llevando al cambio de coloración de soporte del negro original a una tonalidad más blanquecina.

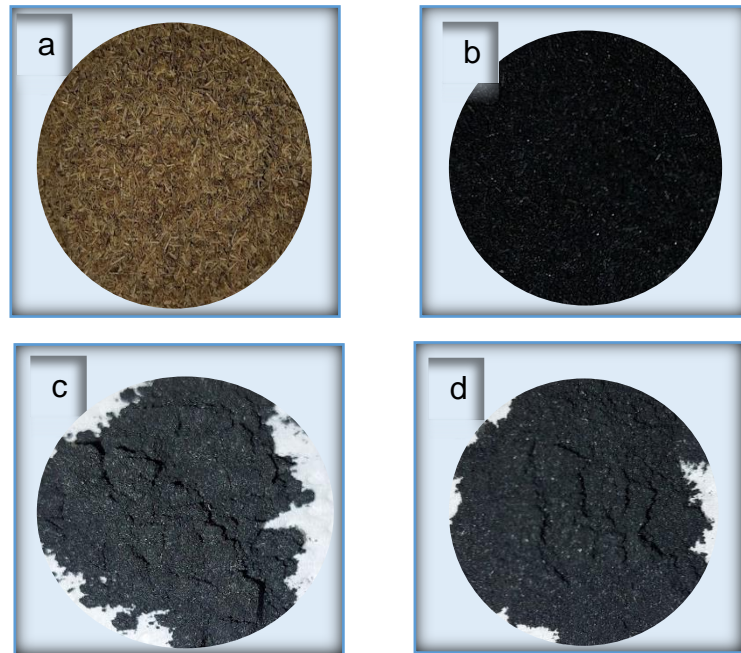


Figura 2. Materia prima y material adsorbente 2a) Raquis de banano, 2b) BC-RB, 2c) CA-2M-RB y 2d) CA-5M-RB

Materiales obtenidos a base de raquis de banano sometidos a tratamiento hidrotérmal

Así mismo en la figura 3, se observan los materiales adsorbentes obtenidos después de ser sometidos al tratamiento hidrotérmal. En la figura 3a se aprecia la muestra de biocarbón con un color negro brillante, con textura suave y granulometría de forma irregular, así también mismo en la figura 3b se aprecia el carbón activado 2M, el cual presenta una textura suave y un color negro brillante con pequeñas manchas blanquecinas en su superficie, además de presentar una granulometría irregular, en la figura 3c se aprecia el carbón activado a 5M, el cual presenta características cualitativas similares al carbón activado a 2M, presentando textura suave, un color negro brillante con manchas blanquecinas en su superficie y con una granulometría de forma irregular.

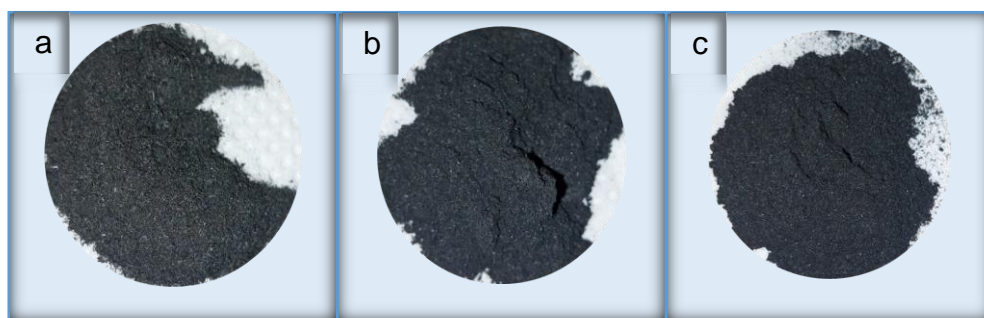


Figura 3. Materiales a base de raquis de banana después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 3a) BC-TH-RB, 3b) CA-2M-TH-RB, 3c) CA-5M-TH-RB.

4.1.2. Materiales obtenidos a base de cáscara de cacao

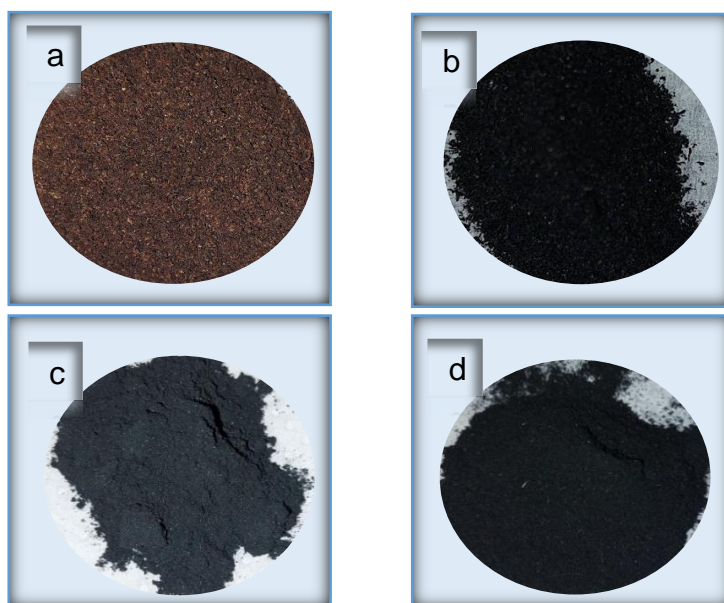


Figura 4. Materia prima y material adsorbente 4a) Cáscara de cacao, 4b) BC-CC, 4c) CA-2M-CC y 4d) CA-5M-CC

En la figura 4a, se observa la estructura de la cáscara de cacao, la cual presenta un color marrón oscuro, con una textura rugosa, con una granulometría de forma irregular, así también en la figura 4b se aprecia el biocarbón de cáscara de cacao, presentando un color negro brillante con textura fina y suave y una granulometría de forma irregular, así mismo se observa el carbón activado a 2M y el carbón activado a 5M de H_3PO_4 en la figura 4c y 4d, los cuales presentan diferencias visibles en su coloración presentando un

color blanquecino en la superficie de estos, además de presentar una textura más fina con diferencia al biocarbón del mismo material.

Materiales obtenidos a base de cáscara de cacao sometidos a tratamiento hidrotermal

En la figura 5 se puede apreciar los materiales preparados a base de cáscara de cacao después de ser sometidos al tratamiento hidrotermal, en la figura 5a se observa el biocarbón de cáscara de cacao el cual presenta un color negro más brillante que su antecesor, con una textura fina y suave y una granulometría de forma irregular, así también se observa los carbones activados de 2 y 5M de H_3PO_4 , presentan coloración similar con un negro brillante, con granulometría irregular, siendo el de 5M figura 6c quien presenta una textura más suave.



Figura 5. Materiales a base de cáscara de cacao después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 5a) BC-TH-RB, 5b) CA-2M-TH-RB, 5c) CA-5M-TH-RB

4.1.3. Materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz

En la figura 6a, se observa la estructura de la cascarilla de arroz, la cual presente un color crema con pequeños filamentos negros, con una granulometría irregular y una textura rugosa, en la figura 6b, se puede apreciar el biocarbón obtenido de la cascarilla de arroz, el cual presenta un color negro brillante, y una textura fina con granulometría irregular, así mismo se aprecia el carbón activado 2M y carbón activado 5M de H_3PO_4 figura 6c y 6d, los cuales muestran una coloración blanquecina en su superficie a diferencia

del color negro puro del biocarbón de la misma muestra, además presentan una textura más fina y suave en diferencia del biocarbón.

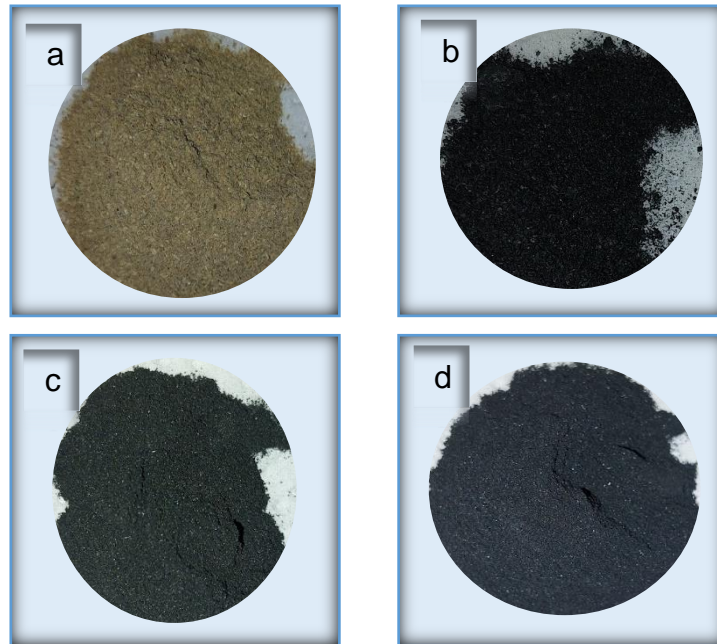


Figura 6. Materia prima y material adsorbente 6a) Cascarilla de arroz, 6b) BC-CA, 6c) CA-2M-CA y 6d) CA-5M-CA

Materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz sometidos a tratamiento hidrotermal



Figura 7. Materiales a base de cascarilla de arroz después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, 7a) BC-TH-RB, 7b) CA-2M-TH-RB, 7c) CA-2M-TH-RB

En la figura 7, se aprecia los materiales producidos a base de cascarilla de arroz después de haber sido sometidos al tratamiento hidrotermal, en la figura 7a se presenta el biocarbón obtenido el cual presenta un color negro brillante, el cual resalta más a

diferencia del biocarbón base, su textura es de consistencia suave y su granulometría es similar a la que presenta antes de ser sometido al tratamiento, así también se observa el carbón activado de 2 y 5M, los cuales presentan características similares tanto en coloración presenta un negro brillante con pequeñas manchas blancas, con textura suave y granulometría irregular.

4.1.4. Rendimiento de los materiales obtenidos a base de raquis de banano

Tabla 8. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base de raquis de banano.

Muestra	Peso inicial	Peso final	Rendimiento
BC-RB	300g	144g	48%
CA-2M-RB	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	101g	34%
CA-5M-RB	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	114g	38%

En tabla 8 se puede observar el rendimiento en la producción de los materiales obtenidos a base de raquis de banano, señalando las masas de materias primas y masas de material obtenido en gramos, el biocarbón obtenido a base de raquis de banano presento un rendimiento del 48%, este valor se encuentra por encima del 40%, a una carbonización de entre 500 y 600°C de raquis de banano (B. Liang et al., 2010).

El carbón activado a 2M y 5M presentan un rendimiento del 33,6 y 38% respectivamente en su producción, siendo mayor al 12% de rendimiento reportado por (Lam, 2020). Además (Martinez & Gonzalez, 2019) al usar 30 y 40% de H₃PO₄ obtuvo carbones activados de raquis de banano con un rendimiento de 14,3 y 9,7% respectivamente, dichos rendimientos son menores en comparación con la presente investigación.

4.1.5. Rendimiento de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao

En la tabla 9 se puede apreciar el rendimiento en la producción de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao, se observa que el biocarbón tiene un rendimiento de 35,6%, superando el 19,4 y 26,8% de rendimiento reportado por (Guerra, 2014) con un tiempo de carbonización de 144 y 94 minutos. Probando así que el tiempo de carbonización influye en gran manera en el rendimiento del biocarbón (Onay, 2007).

En la producción del carbón activado a 2M y 5M su rendimiento es del 62,33% y 39,3% respectivamente, siendo valores mayores a lo reportado por (Burgos Campuzaon & Jaramillo Quiroz, 2015) con un valor de 30%. A temperaturas de 500 a 700°C en periodos de 30,60 y 90 minutos se obtuvieron rendimientos de 30,20 al 36,27% en la producción de carbón activado de cáscara de cacao (Suárez Ramos & Villegas Silva, 2018).

Dichos valores se encuentran por debajo del 62,33% de rendimiento de la presente investigación. Los carbones sometidos a temperaturas de 500°C presentan una mayor concentración de masa residual y por ende presentan un mayor rendimiento a diferencia de los que fueron sometidos a 700°C (Suárez Ramos & Villegas Silva, 2018), los carbones que se someten a un mayor tiempo de exposición presentan un rendimiento menor, puesto que a mayor temperatura y tiempo de exposición se acentúa la pérdida de materia volátil (Macías, 2021).

Tabla 9. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base cáscara de cacao.

Muestra	Peso inicial	Peso final	Rendimiento
BC-CC	300g	107g	35,6%
CA-2M-CC	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	187g	62,33%

CA-5M-CC	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	118g	39,3%
-----------------	---	------	-------

4.1.6. Rendimiento de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz

En la tabla 10 se puede apreciar el rendimiento en la producción de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz, el biocarbón a base de cascarilla de arroz presenta un valor de 41,7% en un periodo de carbonización de 2 horas a 600°C, resultado por debajo al obtenido por (Kalderis et al., 2014) usando temperaturas de 200 con un rendimiento de entre 66 a 55%, evidenciando que a mayor temperatura menor es el rendimiento en la producción de biocarbón utilizando dicha materia prima (Kalderis et al., 2014).

El carbón activado a 5M en su producción presento un rendimiento de 47%, valor más elevado a diferencia del rendimiento encontrado en el carbón activado 2M (39%) de la misma materia prima, sin embargo, es menor a los 72,92% de rendimiento reportado por (Condori, 2018).

En investigaciones realizadas sobre la elaboración de carbones activados con H₃PO₄ al 30 y 60%, de las cuales el carbón activado obtenido al 60% presento un mejor rendimiento con un valor de 42,95% (Arévalo & Reátegui, 2020).

Tabla 10. Rendimiento en la producción de materiales adsorbentes a base cascarilla de arroz.

Muestra	Peso inicial	Peso final	Rendimiento
BC-CA	300g	125g	41,7%
CA-2M-CA	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	117g	39%
CA-5M-CA	150g + 150ml sol(H ₃ PO ₄)	141g	47%

4.2. Caracterización de los materiales obtenidos

Las características que se evaluaron de los materiales obtenidos para conocer sus diferentes propiedades fueron análisis próximo, química superficial y propiedades estructurales.

4.2.1. Análisis próximo

El análisis próximo de los materiales obtenidos como son el contenido de humedad y contenido de cenizas, se puede determinar de acuerdo con la metodología estándar de ASTM.

Análisis próximo de los materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano

El resultado del análisis próximo del biocarbón fue de 4,3% de humedad y 23,26% de ceniza sin el tratamiento hidrotermal, en cambio al ser sometido al tratamiento hidrotermal disminuyó el contenido de humedad y aumentó el % de ceniza llegando a unos valores de 1,35% y 25,63% respectivamente.

Por otro lado, al producir carbón activado de 2 y 5M de H_3PO_4 se obtuvo un contenido de humedad de 2,8% y 12,9% respectivamente, sin embargo, al ser sometido al tratamiento hidrotermal se observa una disminución en el contenido de humedad de 1,08 % y 1,19%. En el caso del contenido ceniza el carbón activado de 2 y 5M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal se obtuvo valores de 18,52% y 29,82% respectivamente, siendo estos mayores al contenido de ceniza del carbón activado sin tratamiento hidrotermal.

En estudios realizados por (Yargicoglu et al., 2015) encontraron valores de humedad de 5,66% y 2,15 para los biocarbón de madera de pino y pallets; por otro lado (Solís-Fuentes et al., 2012) produjeron carbones activados empleando diferentes concentraciones de H_3PO_4 , obteniendo valores de 7,15% para el carbón activado de cáscara de naranja, 9,33% para el de cascarilla de café y 6,9% para el de bagazo de caña de azúcar; (Karim et al., 2015), produjo biocarbón de raquis de banano a 500°C, del cual

obtuvo un valor en el contenido de humedad de 26,28 y 21,26%, valores mayores a los que se han encontrado en la presente investigación.

Tabla 11. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.

Muestra	Humedad %	Cenizas %
BC-RB	4,30	23,26
CA-2M-RB	2,80	16,40
CA-5M-RB	12,90	28,34
BC-TH-RB	1,35	25,63
CA-2M-TH-RB	1,08	18,52
CA-5M-TH-RB	1,19	29,82

Análisis próximo de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao.

El contenido de humedad del biocarbón de cáscara de cacao BC-CC, presento un valor de 3,82%, valor mayor al que se obtuvo en el CA-2M-CC, el cual presento un valor de 3,54%, mientras que el CA-5M-CC, obtuvo un valor mayor a los anteriores presentando un 9,23% de contenido de humedad, sin embargo en los materiales que se obtuvieron después de ser sometidos a tratamiento hidrotermal se pudo obtener un valor para el BC-TH-CC de 1,27% valor aceptable para la adsorción de contaminantes, así también los carbones activados de 2 y 5M presentaron valores de 1,23 y 1,17% respectivamente, presentando una pequeña disminución a los materiales previos al tratamiento hidrotermal.

Así mismo se obtuvo, un valor de 14,28% de contenido de cenizas, en la muestra de biocarbón de cáscara de cacao, mientras que los carbones activados 2 y 5M presentan valores más altos 14,67 y 26,48% respectivamente, lo cual indica que existen contenido de impurezas, las cuales se forman al momento de la activación; mientras el contenido de cenizas sea mayor, la efectividad de

adsorción será menor (Burgos Campuzan & Jaramillo Quiroz, 2015). Por otro lado, el contenido de cenizas después de ser sometidos al tratamiento hidrotermal aumento ligeramente llegando a valores de 16,46% para biocarbón y 17,51% y 28,26% para el carbón activado de 2 y 5 M de H₃PO₄.

En la producción de carbón activado empleando cáscara del fruto de calabaza se utilizó como agente activante el ácido fosfórico en concentraciones de 30 y 60%, observando que la concentración del activante influye según el tiempo de activación, presentando valores en el contenido de humedad de 4,96; 7,33 y 12,01% para la concentración de activante al 30% en tiempos de 45, 60 y 75 minutos respectivamente, mientras que los valores que presento el material con activante al 60% fueron de 6,44; 3,76 y 2,69% en los mismos periodos (Arévalo & Reátegui, 2020), obteniendo materiales con una alta capacidad de adsorción.

Tabla 12. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao.

Muestra	Humedad (%)	Cenizas (%)
BC-CC	3,82	14,28
CA-2M-CC	3,54	14,67
CA-5M-CC	9,23	26,48
BC-TH-CC	1,27	16,46
CA-2M-TH-CC	1,23	17,51
CA-5M-TH-CC	1,17	28,26

Análisis próximo de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz.

El contenido de humedad que logro presentar el biocarbón de cascarilla de arroz fue de 2,54%, mientras que los carbones activados con ácido fosfórico a 2 y 5M obtuvieron valores de 2,82 y 8,17%, observando que con estos valores se tiene un material de buena calidad con alto poder de adsorción; (Lee et al., 2013). Para

el caso de los materiales después de ser sometidos al tratamiento hidrotermal, presentaron valores de 1,26% de contenido de humedad para el biocarbón, mientras que los carbones activados presentaron valores de 1,25% para el CA-2M-TH-CA, y 1,30% para el CA-5M-TH-CA, estos valores han tenido una mínima variación con los que presentaron los materiales previos al TH, según la literatura al menor contenido de humedad, mayor cantidad de adsorción, lo cual estos materiales están en un rango aceptable para realizar dicho método ante contaminantes.

Tabla 13. Análisis próximo de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz.

Muestra	Humedad (%)	Cenizas (%)
BC-CA	2,54	26,44
CA-2M-CA	2,82	21,56
CA-5M-CA	8,17	12,64
BC-TH-CA	1,26	29,16
CA-2M-TH-CA	1,25	23,46
CA-5M-TH-CA	1,30	14,64

Con respecto al contenido de cenizas, el biocarbón presento un valor de 26,44%, valor mayor a los que presentaron el CA-2M-CA, con 21,56% y el CA-5M-CA, con 12,64%, esta reducción en el contenido de cenizas es debido al lavado que se le da al material obtenido antes de realizar su caracterización correspondiente. Por otro lado, el contenido de ceniza después del tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores ligeramente más elevados a lo obtenido en los materiales adsorbentes sin tratamiento hidrotermal con valores de 29,16% para el BC-TH-CA, 23,46% para el CA-2M-TH-CA y 14,64% para el CA-5M-TH-CA.

En comparación con los datos obtenidos al carbonizar a diferentes temperaturas se obtiene como resultados 35,48 y 24,84% contenido de ceniza a temperaturas de 500 y 600°C

respectivamente, esto se da ya que las condiciones de pirolisis, puede presentar una concentración de oxígeno elevada, la cual producirá una mayor cantidad de cenizas, reduciendo la cantidad de material adsorbente que se espera obtener, además al usar materias primas con bajo contenido de lignina, las posibilidades de obtener una cantidad mayor de carbón se verán reducidas (Cao & Harris, 2010)

4.2.2. Química superficial

La superficie de los materiales obtenidos, describe los grupos superficiales de carácter básico y de carácter ácido. Así como la naturaleza de la composición estructural de los materiales obtenidos.

pH de carga cero de materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano

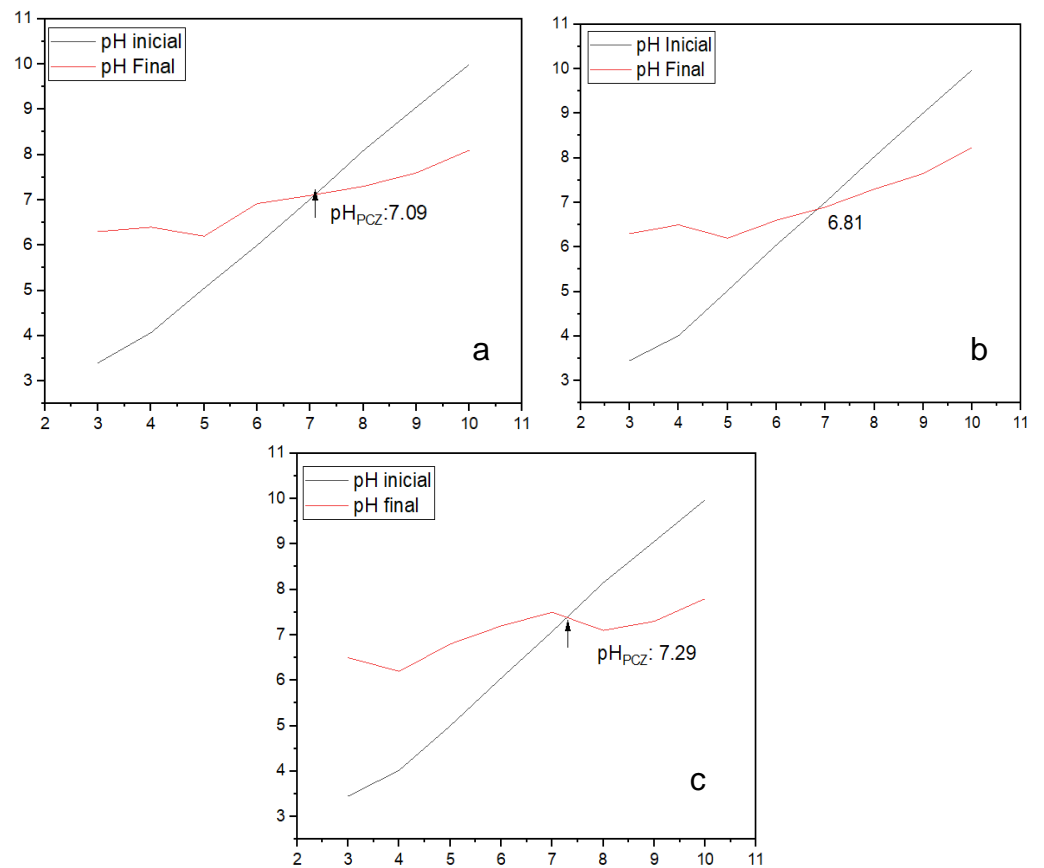


Figura 8. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano. 8a) BC-RB, 8b) CA-2M-RB y 8c) CA-5M-RB.

En la figura 8a se puede apreciar que el pH_{PZC} del biocarbón obtenido, el cual fue evaluado entre valores de pH de 3 a 10, siguiendo el método de *pH drift*, nos dio un valor de 7,09, mientras que los carbones activados en las figuras 8b y 8c, a concentraciones de 2 y 5M de ácido fosfórico, presentan valores de 6,81 y 7,73 respectivamente, observando que al activar las muestras con concentraciones menores de ácido fosfórico reduce ligeramente el pH de la muestra.

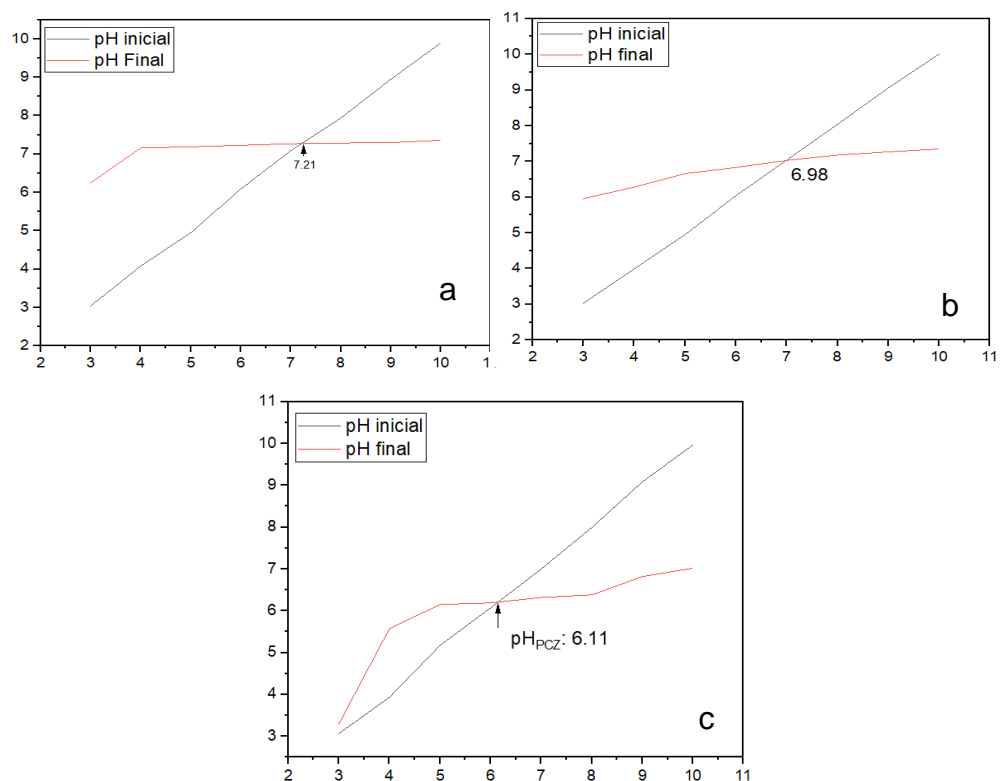


Figura 9. . Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano después de TH. 9a) BC-TH-RB, 9b) CA-2M-TH-RB y 9c) CA-5M-TH-RB.

El pH_{PZC} de los materiales después de haber sido sometido al tratamiento hidrotérmal, obtuvo un valor ligeramente mayor de 7,21

para el caso del biocarbón en comparación con el material original figura 9a, para el caso del carbón activado a 2M se presentó un valor de 6,98 figura. 9b, el cual presenta un ligero aumento a diferencia del material previo al TH, el carbón activado a 5M, dio un valor menor 6,11 Fig. 9c, comparado con la muestra inicial, las muestras modificadas al igual que su antecesor presentan un pH ligeramente ácido, el tipo de pirolisis hace que algunos de los grupos funcionales ácidos que presenta el material, sean separados al comienzo de la carbonización, esto se evidencia en el biocarbón ya que tiene un ligero aumento en su pH comparado con el material original, el aumento principal del pH sería la rotura y fractura de los enlaces débiles, que presenta la estructura del material sometido a altas temperaturas.

Tabla 14. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.

Muestra	pH Carga cero (pH_{Pzc})
BC-RB	7,09
CA-2M-RB	6,81
CA-5M-RB	7,29
BC-TH-RB	7,21
CA-2M-TH-RB	6,98
CA-5M-TH-RB	6,11

pH de carga cero de materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao

En la figura 10a se observa el pH_{Pzc} que se obtuvo del biocarbón, siguiendo la metodología de pH *drift*, lo cual nos presenta un valor de 7,26, a diferencia de los materiales que obtuvieron a concentraciones de 2 y 5M, CA-2M-CC, figura 10b y CA-5M-CC, figura 10c, los cuales obtuvieron valores de 6,6 y 7,24 respectivamente, lo cual evidencia que el uso del activante a concentraciones menores reduce el pH en mayor proporción,

mientras que al usar una concentración mayor del activante el pH reduce ligeramente, lo cual aumenta la posibilidad de adsorber contaminantes con carga positiva como lo es por ejemplo el caso del plomo. (Ahmad et al., 2014), logro obtener de la producción de biocarbón a 500°C un valor en pH_{PZC} de 10,1, el cual se debe a las concentraciones de nutrientes y minerales que se atribuyen a la división de sales alcalinas de la matriz orgánica que presenta la materia prima utilizada.

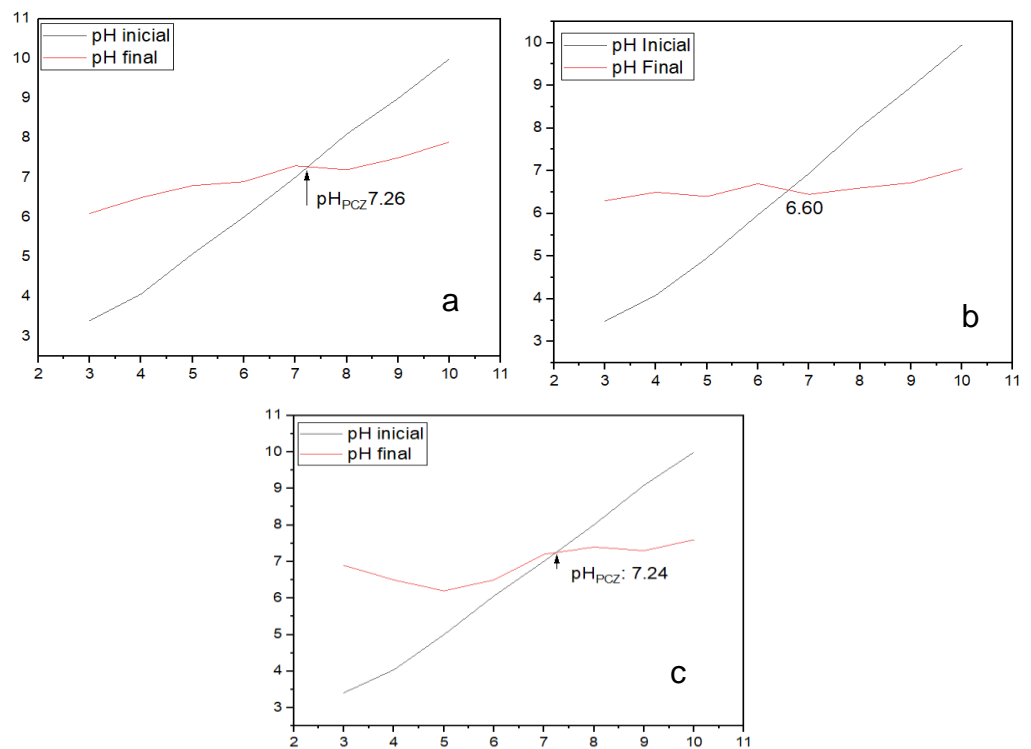


Figura 10. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cáscara de cacao. 10a) BC-CC, 10b) CA-2M-CC y 10c) CA-5M-CC

Los materiales sometidos a tratamiento hidrotermal producidos a base de cáscara de cacao, presentaron valores de pH_{PZC} ligeramente diferentes a sus antecesores, el biocarbón presentó un valor de 7,05, lo cual es menor al que se obtuvo a la muestra original, al presentar una disminución en el pH resultaría un menor porcentaje de eliminación de contaminantes de carga negativa, en el caso del carbón activado de 2M logro presentar un valor de 6,62

valor similar al valor que presento el material previo, este valor nos da a entender que a menor sea el valor del pH, mayor será la adsorción de contaminantes de carga positiva, en lo concerniente al carbón activado a 5M, este logro presentar un valor de 5,06 lo cual como se mencionó con anterioridad es un valor optimo en la adsorción de contaminantes con carga positiva, a un $\text{pH} < \text{al } \text{pH}_{\text{PZC}}$, se va a favorecer la adsorción de aniones, debido a que la carga del adsorbente es positiva y cuando el $\text{pH} > \text{al } \text{pH}_{\text{PZC}}$, indica que el adsorbente se encuentra cargado negativamente por lo cual beneficiara mucho la adsorción del catión (Kalaivani et al., 2014).

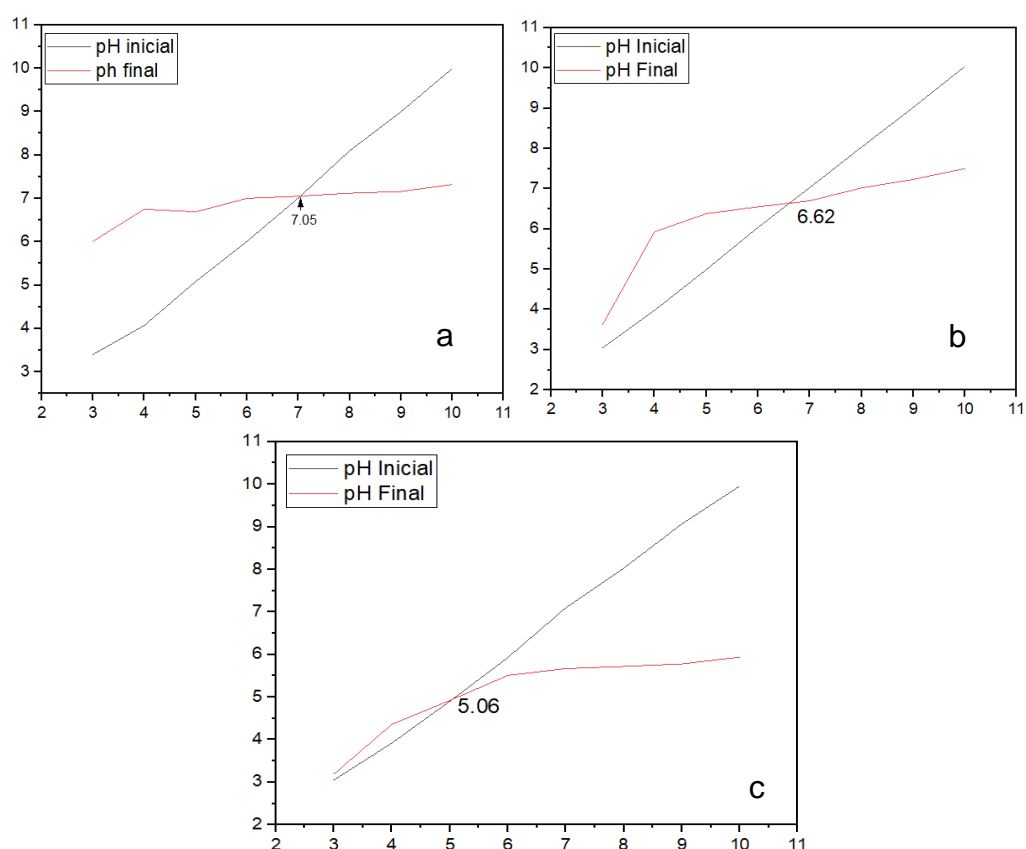


Figura 11. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cacao después de TH. 11a) BC-TH-CC, 11b) CA-2M-TH-CC y 11c) CA-5M-TH-CC

Tabla 15. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de raquis de banano.

Muestra	pH Carga cero (pH _{PZC})
BC-CC	7,26
CA-2M-CC	6,60
CA-5M-CC	7,24
BC-TH-CC	7,05
CA-2M-TH-CC	6,62
CA-5M-TH-CC	5,06

pH de carga cero de materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz.

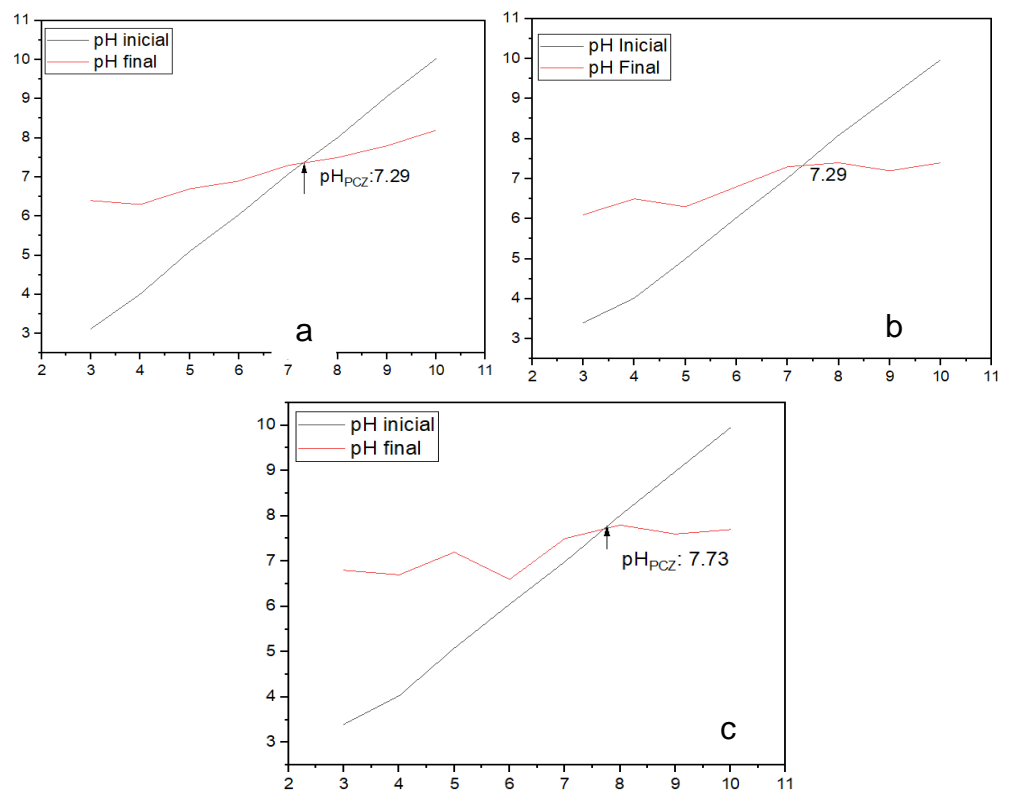


Figura 12. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz. 15a) BC-CA, 15b) CA-2M-CA y 15c) CA-5M-CA

El pH_{PZC} que se obtuvo para el biocarbón presentó un valor de 7,29 figura 12a, valor similar al que presentó el CA-2M-CA figura 12b,

mientras que el CA-5M-CA, presentó un ligero, aumento en el pH_{PZC} , presentando un valor de 7,73 figura 12c, estos valores fueron determinados siguiendo la metodología de *pH Drift*. Se observa que el activante aplicado (H_3PO_4), no altera en gran proporción el pH_{PZC} , que presenta el material base (BC-CA), manteniendo valores óptimos para ser aplicados en la eliminación de ácidos.

En estudios realizados por (Gutiérrez et al., 2017), obtuvo carbones activados utilizando como agente activante el ácido fosfórico, el cual al evaluar su pH_{PZC} , obtuvo un valor de 3,0, valor perfecto para la adsorción de contaminantes, además respaldado por presentar ácidos carboxílicos e incorporar lactonas, también se observó que este tipo de carbones presentan señales de anillos aromáticos y alifáticos, pero que estos no tienen mucha influencia en el pH superficial.

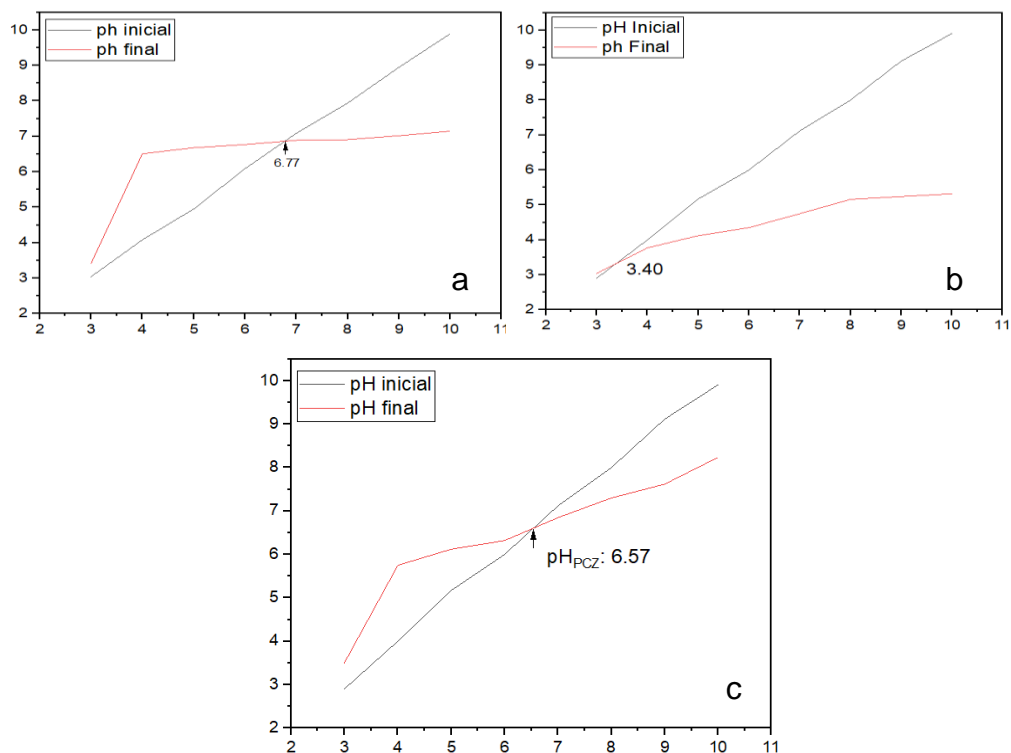


Figura 13. Determinación de pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cascarilla de arroz después de TH. 16a) BC-TH-CA, 16b) CA-2M-TH-CA y 16c) CA-5M-TH-CA

El biocarbón obtenido después de ser sometido a tratamiento hidrotermal presento un valor de 6,77 el cual es menor al que se obtuvo de la muestra previa, este valor nos da evidencia de que se pueden adsorber contaminantes de carga positiva, cuando la solución del contaminante presenta un valor menor que el pH_{PZC} , la superficie del material adsorbente se verá cargada positivamente debido a la reacción de protonación, en estudio en la producción de biocarbón de cáscara de arroz se obtuvieron valores de pH_{PZC} de 5,2 y 5,6 respectivamente en la cual la adsorción de cobre se inhibió a valores de pH bajo, esto posiblemente porque los valores de pH bajo presentan enlaces H^+ en grupos funcionales, los cuales contienen oxígeno excluyendo la solución de cobre, lo cual permite la disminución de la adsorción de iones de cobre en el biocarbón (Gai et al., 2016), el carbón activado de 2M logro presentar un valor de 3,40 lo cual es un pH moderadamente ácido, si el adsorbente se encuentra cargado negativamente inhibirá con significancia la adsorción de contaminantes a través de la repulsión electroestática, el carbón activado a 5M presento un valor en su pH_{PZC} de 6,57, esta reducción de su pH a diferencia de la muestra previa puede ser debido a la fijación de los grupos ácidos que se encuentran presentes en la superficie del carbón, lo cual lo vuelve más hidrófilo y permite que se reduzca su pH_{PZC} .

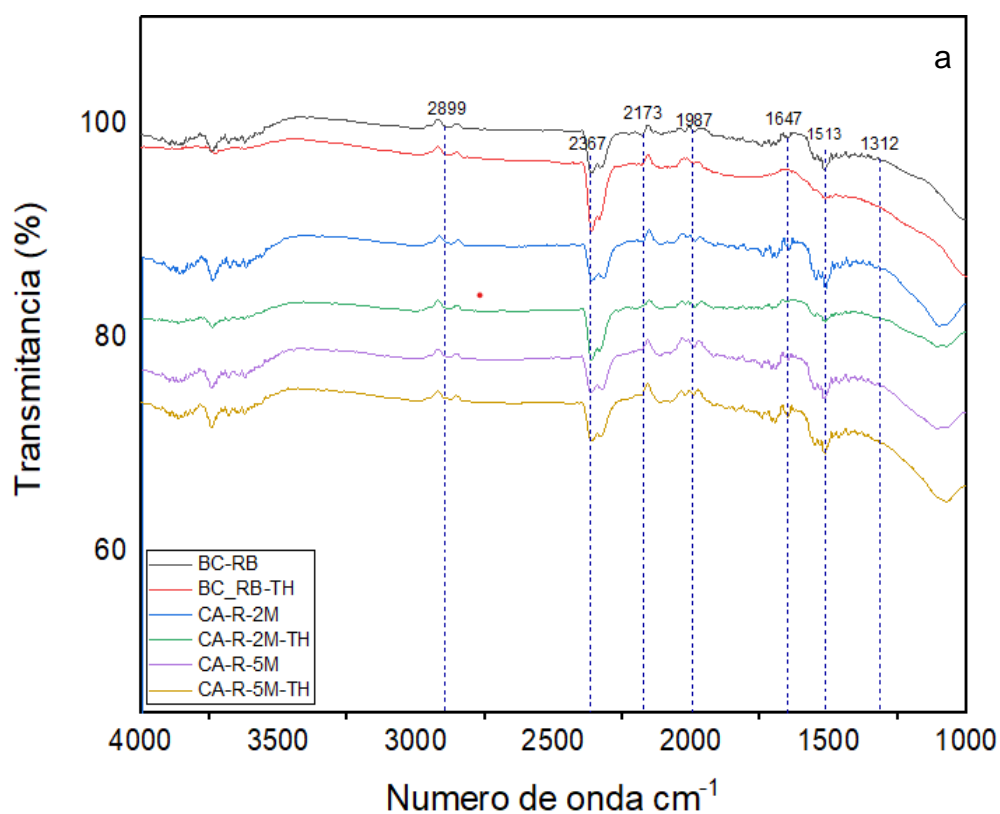
Tabla 16. pH de carga cero de los materiales obtenidos a base de cáscara de arroz.

Muestra	pH Carga cero (pH_{PZC})
BC-CA	7,29
CA-2M-CA	7,29
CA-5M-CA	7,73
BC-TH-CA	6,77
CA-2M-TH-CA	3,40
CA-5M-TH-CA	6,57

Espectrofotometría infrarroja de los materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano

Los grupos funcionales de la superficie de los materiales obtenidos, fueron analizados mediante FTIR. Distintas bandas en los espectros representan la vibración de estiramiento gracias al grupo funcional -OH (3400 cm^{-1}), C=O (1984 cm^{-1}), C-C (1001 cm^{-1}), C=C aromático (1578 cm^{-1}) y CH (827 cm^{-1}) (Li et al., 2018). Se puede observar que por lo general la intensidad de los picos que presentan los materiales previos al tratamiento hidrotérmal son más bajos en algunos casos.

En el número de onda 2899 cm^{-1} (Manyà, 2012), se logra ver la vibración de C-H del grupo alifático, en todas las muestras obtenidas, sin presentar alguna variación. En el BC-RB-TH se logra observar el pico más pronunciado en la longitud de onda 2367 cm^{-1} , la cual pertenece a la vibración de estiramiento $\text{C}\equiv\text{C}$ del grupo alquino, mientras que el CA-5M-RB , presenta el pico menos pronunciado en dicho rango.



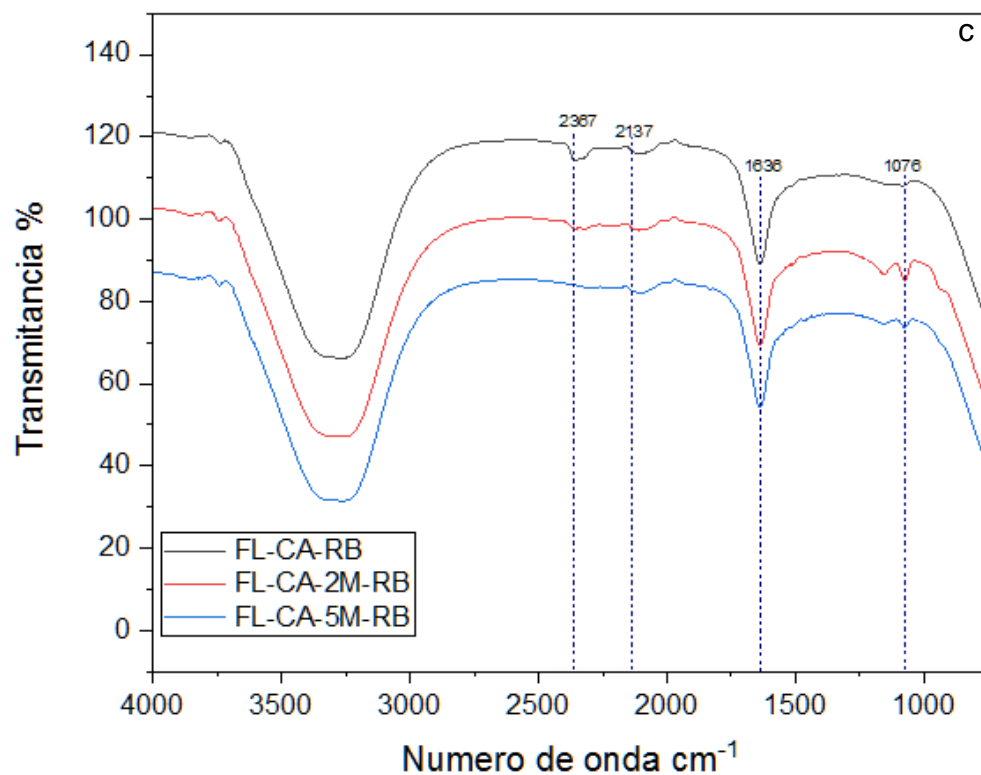
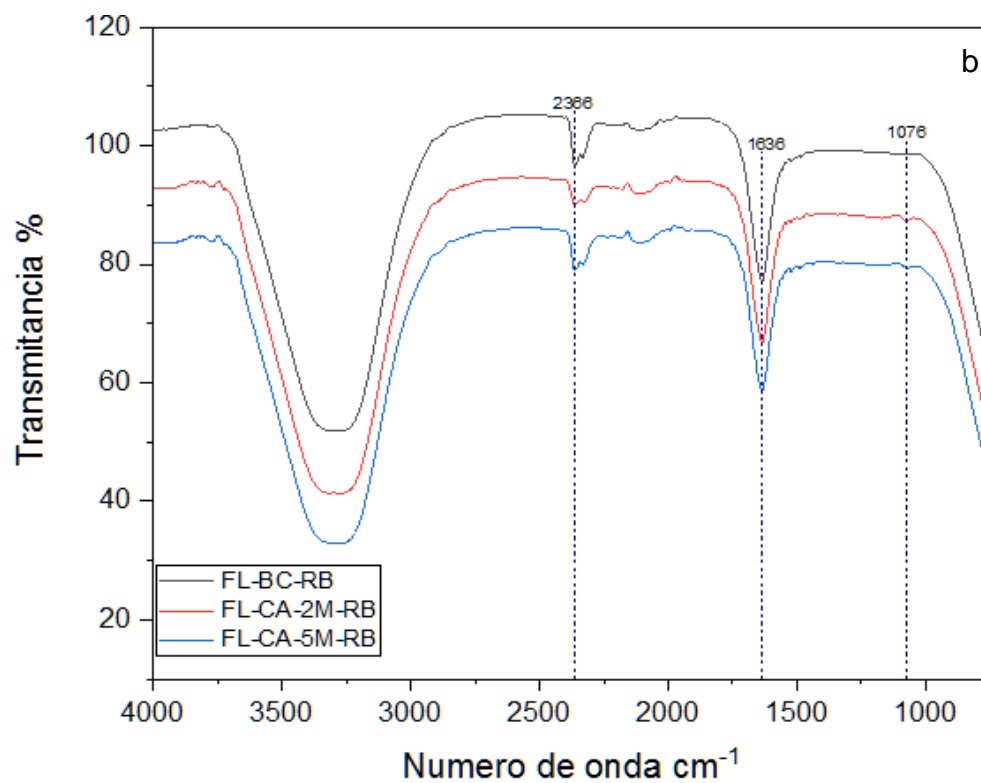


Figura 14. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de RB.

En el caso de las muestras líquidas obtenidas del proceso hidrotermal analizadas por FTIR sin concentrar también se observó un pico en el número de banda 2367 cm^{-1} en todas las muestras líquidas siendo la muestra del biocarbón la que tiene el pico más pronunciado, sin embargo al concentrar la muestra 1:10 como se aprecia en la figura 14c este pico se desvanece, manteniéndose un leve pico en la muestra del biocarbón.

En el número de onda 2173 cm^{-1} , se observa la presencia de sales en este caso tiocianato ($-\text{SCN}$), esta se observa en las muestras de BC-RB, BC-RB-TH y CA-2M-RB, aunque en menor proporción, a medida que se aumenta la molaridad de impregnación se observa que esta sal va desapareciendo. En el número de onda 2173 cm^{-1} aparece como más elongación en las muestras líquidas concentradas en comparación a las muestras sin concentrar.

En el número de onda 1987 cm^{-1} se observa la presencia del grupo carbonilo de metales de transición, donde el CA-5M-RB, presenta una mayor elongación a diferencia de las otras muestras, mientras que el CA-5M-RB-TH, presenta un mayor estiramiento, dando a entender que los átomos aumentan su distancia con coordinación, pero permanecen en el mismo eje del enlace.

En el número de onda 1647 cm^{-1} , se logra observar el estiramiento $\text{C}=\text{C}$ del grupo alqueno, en la muestra de BC-RB-TH, se observa una reducción considerable de dicho grupo, en comparación con la elongación y estiramiento que presenta el BC-RB, así también las muestras modificadas con H_3PO_4 y las muestras sometidas a tratamiento hidrotermal presentan dicho grupo, se observa que las muestras sometidas a tratamiento hidrotermal reducen ligeramente dicho grupo, sin embargo en las muestras líquidas muestran grandes picos en la banda 1647 cm^{-1} dando a entender que el estiramiento $\text{C}=\text{C}$ del grupo alqueno se quedaría suspendido en la fase líquida del tratamiento hidrotermal además las muestras de carbón activado al ser activadas previamente con H_3PO_4 , este

mantiene presente el grupo funcional, a diferencia de la muestra BC-RB-TH, en la cual sin contar con el agente activante, el grupo funcional fue reducido considerablemente.

En el número de onda 1513 cm^{-1} se logra observar el estiramiento de anillo aromático de origen C=C-C, este grupo se presenta en mayor concentración en la muestra CA-5M-RB, la cual presenta una mayor elongación a diferencia de las otras muestras, dando a entender que a mayor molaridad del activante, se presentara en mayor proporción dicho grupo funcional, así también se observa que el CA-2M-RB, cambia la posición de alargamiento de dicho grupo, presentando una deformación, esto quiere decir que los átomos varían en relación al eje del enlace original, así mismo las muestras después de ser sometidas a tratamiento hidrotermal, reducen dicho grupo, donde la muestra con mayor concentración de H_3PO_4 , presenta una mayor elongación que las otras con menor y sin ácido.

En el número de onda 1312 cm^{-1} se identificó Fenol o Alcohol terciario de origen OH, donde se logra observar que las muestras sin ser sometidas a tratamiento hidrotermal presentan dicho grupo, además de presentar similitud en su elongación, en cambio las muestras modificadas con H_3PO_4 , presentan un estiramiento diferente al que presentó el BC-RB.

En el número de onda 1076 cm^{-1} , aparece en las muestras líquidas concentradas lo que podrían corresponder al enlace Si-O-Si, siendo la muestra líquida del carbón activado a 2M de H_3PO_4 la que tiene el pico más pronunciado seguida de la muestra líquida del carbón activado a 5M de H_3PO_4 , sin embargo, en la muestra líquida del biocarbón no se muestra este pico.

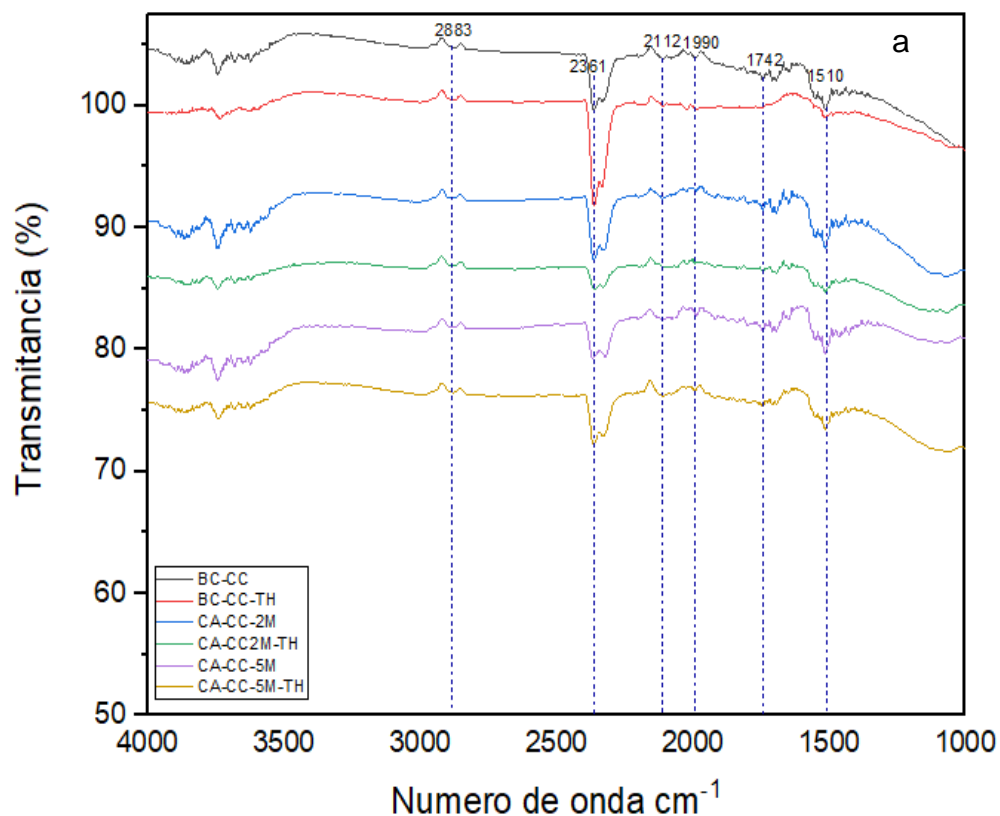
En resumen, se puede decir que las muestras modificadas con H_3PO_4 , no presentan una variación considerable con la muestra pura (BC-RB), caso contrario sucede al ser sometidas a tratamiento hidrotermal, en el cual, si es observable una reducción en la

elongación y el estiramiento de los diversos picos de grupos funcionales identificados, tanto para las muestras con H_3PO_4 y la muestra sin este.

Espectrofotometría infrarroja de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao

La banda de alta intensidad presente en el rango 3400 cm^{-1} , es debido a las vibraciones de estiramiento, las cuales son características del grupo OH, la cual es perteneciente a la estructura que presenta la celulosa, la cual es el componente principal de los materiales lignocelulósicos (Sharma et al., 2000).

El grupo OH, ha sido detectado en la mayoría de los carbones activados, incluyendo aquellos que presentan una alta calidad comercial (Jung et al., 2001).



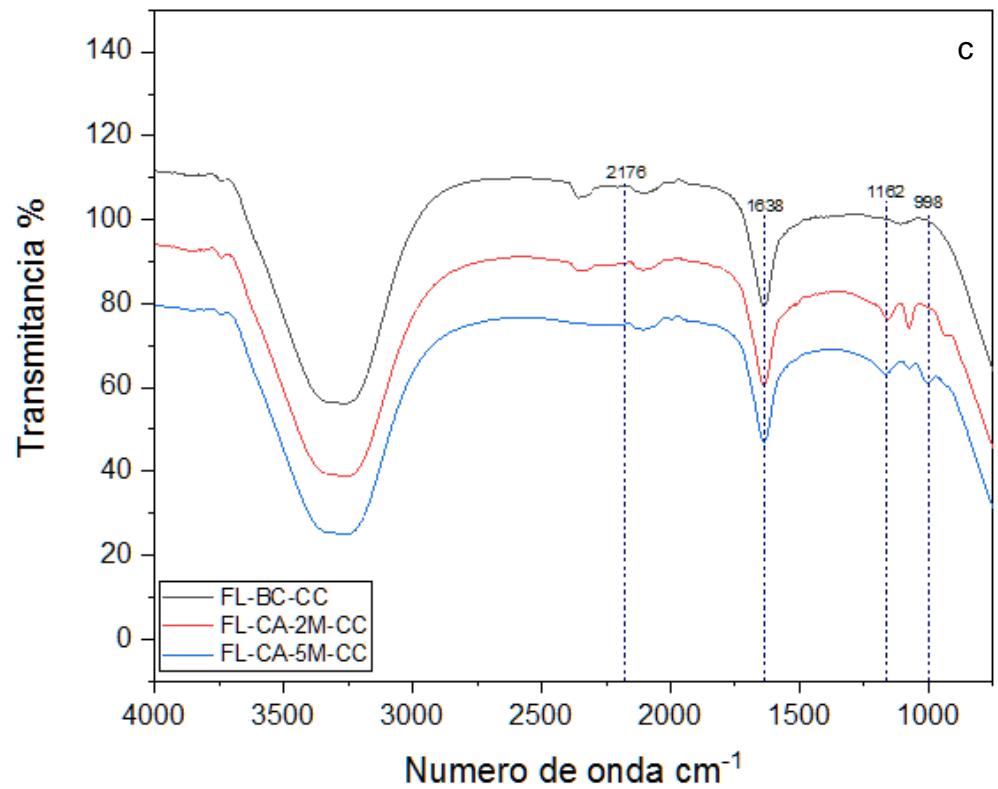
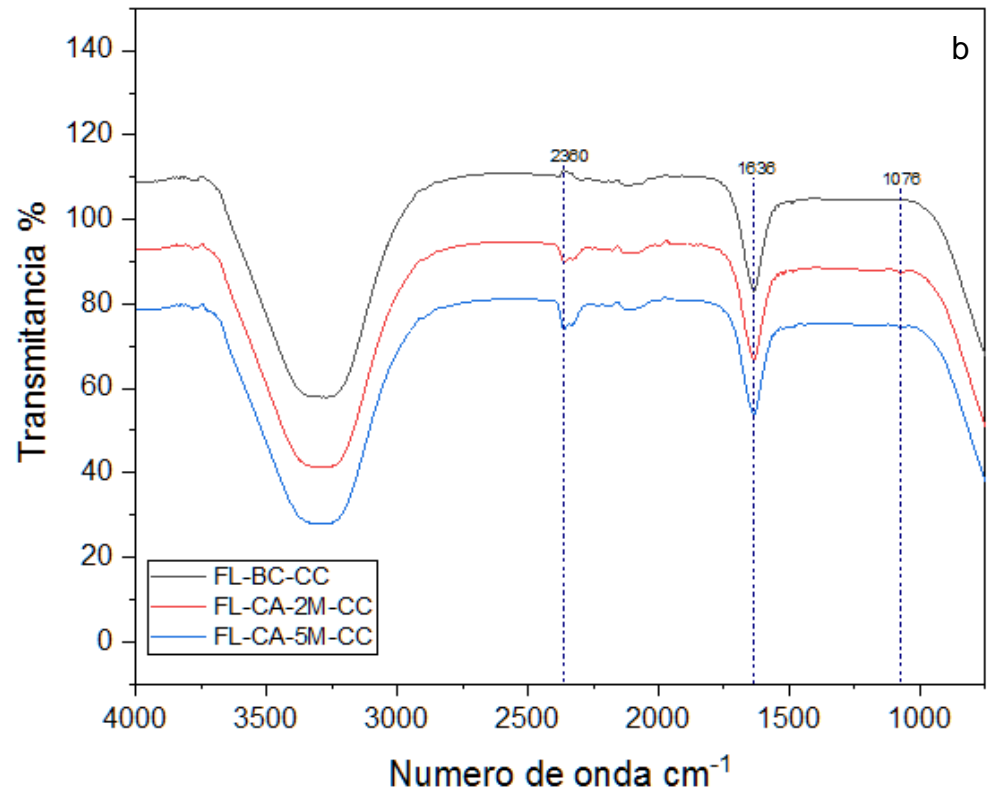


Figura 15. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de CC.

En el número de onda 2883 cm^{-1} , el BC-CC presenta un estiramiento con mayor pronunciación con respecto a las demás muestras, dicho estiramiento corresponde al C-H del grupo alifático (Manyà, 2012).

En el número de onda 2361 cm^{-1} , el BC-CC-TH, presenta una mayor elongación en la vibración de estiramiento $\text{C}\equiv\text{C}$ del grupo alquino, en comparación al BC-CC, asimismo se observa que al usar el agente activante la elongación se ve reducida, según el aumento de la molaridad (2 y 5M), no obstante, al momento de ser sometidos a tratamiento hidrotermal, la elongación se ve más pronunciada en la muestra que presenta una mayor molaridad y reduciendo la elongación de la muestra con molaridad menor.

Además, en el caso de las muestras líquidas del carbón activado se observan picos en la banda 2176 cm^{-1} que llegan a desaparecer cuando la muestra es concentra 1:10.

En los rangos 2112 cm^{-1} y 1990 cm^{-1} se nota la presencia en baja concentración de isocianato (-NCS), presentándose en mayor concentración en el CA-5M-CC, al aplicarse el tratamiento hidrotermal, este reduce considerablemente la elongación, degradando sus moléculas por efecto de la alta temperatura (150°C) a la que es sometido, además se observa que con las muestras que fueron impregnadas con H_3PO_4 , presentaron un menor estiramiento en sus átomos, pero manteniendo el mismo eje del enlace.

En el número de onda 1742 cm^{-1} se aprecia el grupo de carbonato de alquilo el cual resulta de la combinación de un Ester carbónico y un metal, se aprecia que en las muestras previas al tratamiento hidrotermal presentan similitud en sus picos, mientras que después de ser sometidas a dicho tratamiento, estas reducen su elongación, deduciendo que a menor molaridad, más reducido será el pico que presenta, asimismo a muestra sin acido (BC-CC), ya no logra

presentar dicho grupo, evidenciando que el tratamiento hidrotermal logra desaparecerlo por completo.

Para el caso de las muestras líquidas se observan picos en la onda 1647 cm^{-1} donde se logra observar el estiramiento C=C del grupo alquelino, dando a entender que el estiramiento C=C del grupo alquelino se formaría durante el tratamiento hidrotermal.

En el número de onda 1510 cm^{-1} las muestras previas al tratamiento hidrotermal lograron presentar similitud en sus picos, estos se atribuyen al estiramiento de anillo aromático de origen C=C-C, de naturaleza aromática, se puede observar que después de ser sometidos a dicho tratamiento, este grupo reduce considerablemente, presentando el pico más pronunciado en la muestra con mayor molaridad a diferencia del pico presentado por la de menor y sin molaridad.

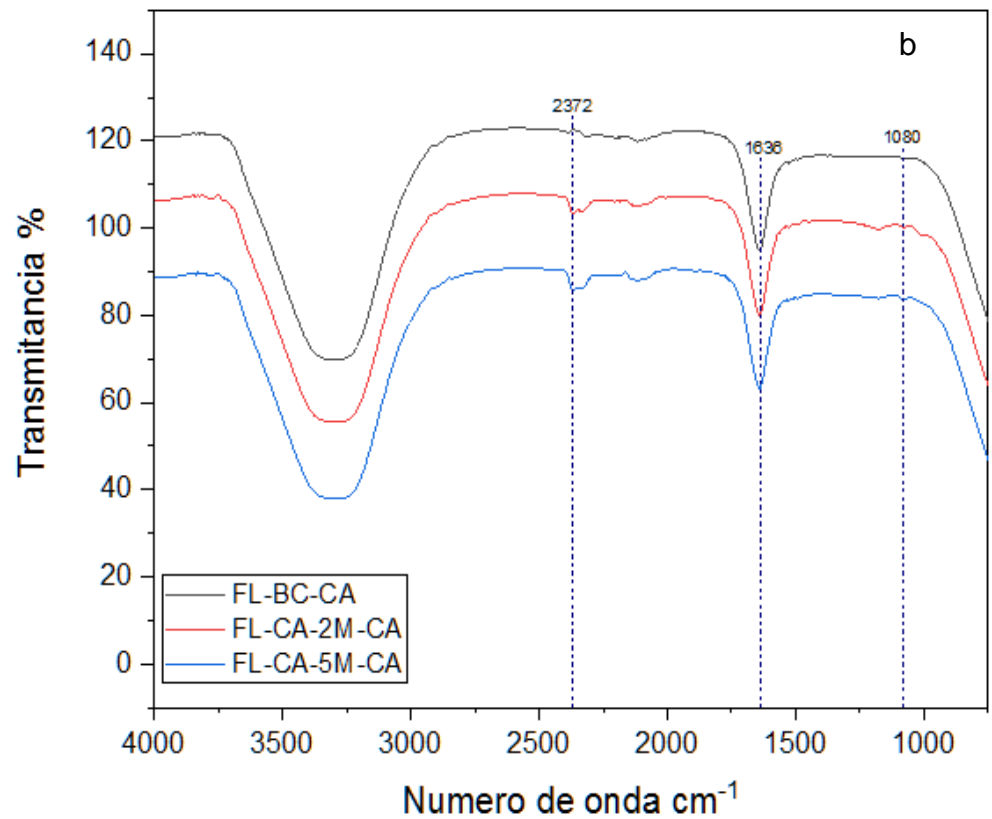
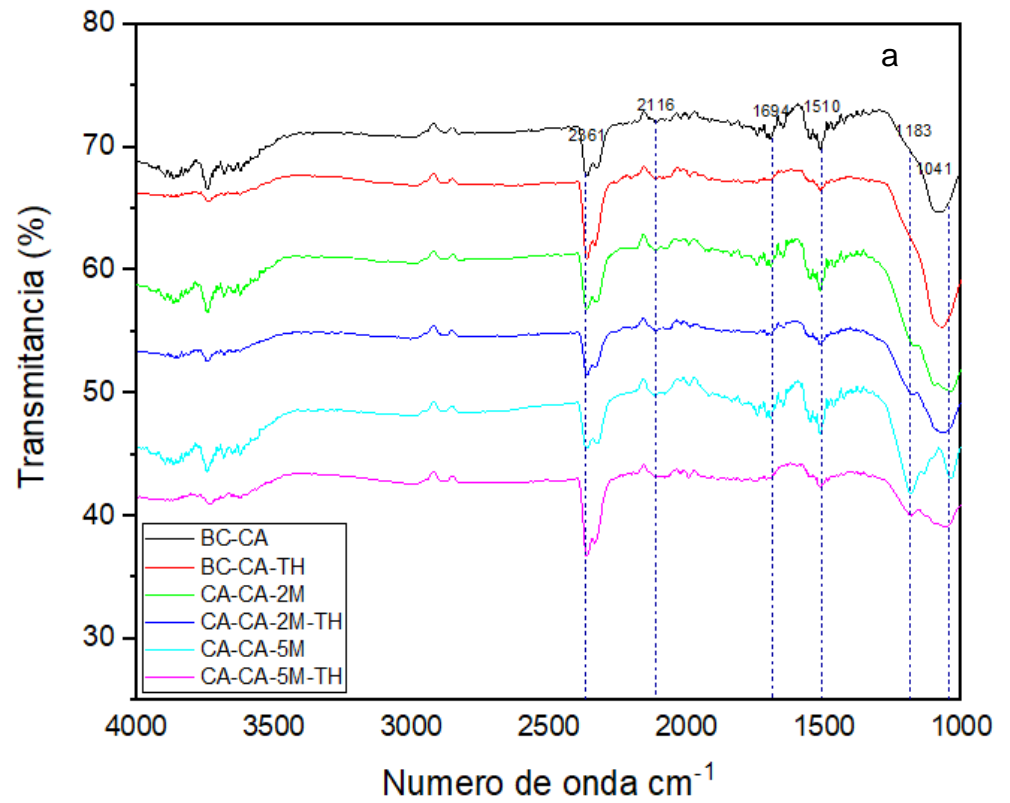
En las muestras de la fase líquida concentrada de los carbones activados aparecen picos entre los rangos de 1162 cm^{-1} y 998 cm^{-1} , se observa una mayor elongación al carbón activado a 5M de H_3PO_4 , por otro lado, la banda 1075 cm^{-1} se observa un mayor pico en el carbón activado a 2M de H_3PO_4 lo que podría corresponder al estiramiento del carbohidrato con $-\text{CO}$.

Se puede decir que las muestras sometidas a tratamiento hidrotermal, presentan en su mayoría una gran reducción de los diversos grupos identificados, debido a la alta temperatura a la que se someten, la cual por medio de esta se daría origen a la eliminación de los átomos que presentan dichos grupos (Tchuifon et al., 2014).

Espectrofotometría infrarroja de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz

Se ha demostrado que la cascarilla de arroz, en su estructura presenta compuestos, tales como son la celulosa y la lignina, los cuales tienen su origen en el grupo Hidroxilo ($-\text{OH}$) (Tarley &

Arruda, 2004), la banda $3413,62\text{cm}^{-1}$, es correspondiente al grupo OH, el cual aparece por la presencia de agua.



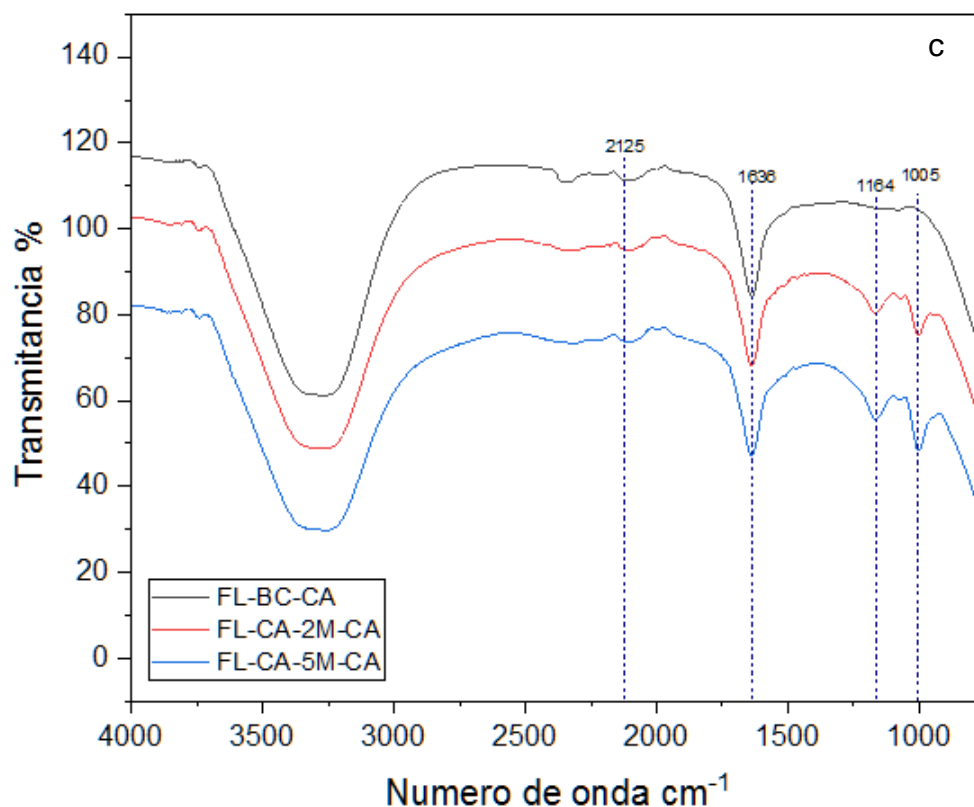


Figura 16. Análisis de grupos funcionales mediante Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de materiales adsorbentes, 14a en fase sólida. 14b. en fase líquida y 14c. en fase líquida concentrada (1:10) a base de CA.

En la banda 2561, se logra observar una mayor elongación en las muestra de BC-TH-CA y CA-5M-TH-CA, las cuales se atribuyen a la vibración de estiramiento $C\equiv C$ del grupo alquino, se aprecia que las muestra que no han sido sometidas a TH, presentan una similitud en la intensidad de sus picos y a la vez sé que no se presentó variación con respecto al estiramiento, manteniendo los átomos en el mismo eje, por otro lado las muestras impregnadas con H_3PO_4 y sometidas a TH, aquella que contiene una mayor molaridad, logra presentar una mayor elongación en lo que respecta.

En el número de onda 2372 cm^{-1} , se logra observar elongaciones en las muestras líquidas de los carbones activados, sin embargo, al concentrar la muestra estas elongaciones desaparecen y

aparecen elongaciones en la banda 2125 cm^{-1} , estos rangos son correspondientes a los enlaces C=O, C=C y C-H.

Se aprecia que en el número de onda 2166 no existe variación en la intensidad de los picos de las diversas muestras, al igual que no presenta ningún tipo de variación en lo que concierne al estiramiento, este rango evidencia la presencia en baja intensidad de isocianato (-NCS).

En la banda 1694, se observa la presencia de quinona (Cetona Conjugada), procedente del grupo carbonilo, se logra apreciar que existe similitud tanto en la magnitud de los picos y en e estiramiento, para las muestras que no fueron sometidas a TH, por otro lado las muestras sometidas, presentan una reducción considerables en la magnitud de sus picos, siendo el BC-TH-CA, el que presento una reducción, esto deduce que al no contar con un agente activante y al ser sometido a una elevada temperatura en presencia de agua, las moléculas de quinona se verán degradadas, hasta desaparecer en su totalidad, mientras que las muestras que cuentan con agente activante, reducen las cantidad de dicho compuesto, siendo el de mayor molaridad el que presenta una cantidad mayor del compuesto antes mencionado.

Las bandas $2922,67\text{ cm}^{-1}$, $2125,34\text{ cm}^{-1}$, $1643,54\text{ cm}^{-1}$ y $1376,47\text{ cm}^{-1}$, son correspondientes a los enlaces C=O, C=C y C-H, los cuales son característicos de materiales orgánicos tales como la lignocelulosa (Salinas & Vargas, 2012).

Para el caso de las muestras líquidas se observan picos en la onda 1647 cm^{-1} donde se logra observar el estiramiento C=C del grupo alquelino, dando a entender que al igual que en las muestras líquidas de materiales adsorbentes a base de cáscara de cacao el estiramiento C=C del grupo alquelino se formaría durante el tratamiento hidrotermal.

La aparición que se presenta en el número de onda 1510 cm^{-1} es correspondiente a la presencia de enlaces C=C de compuestos

aromáticos (Muniandy et al., 2014), se puede observar que las muestras previas al TH, logran presentar una ligera variación en lo que respecta a su elongación, siendo el CA-5M-CA, aquel que presenta el pico más pronunciado, las muestras que fueron sometidas a TH, reducen la presencia de dicho enlace, además de presentar un aumento en el estiramiento similar en dichas muestra, manteniendo el eje del enlace.

En el número de onda 1183 cm^{-1} se observa que la muestra activada a una mayor molaridad logra presentar una mayor elongación a diferencia de las demás muestras, la cual se atribuye a la presencia de ion sulfato, este pico surge como producto de la activación con ácido fosfórico (Kennedy et al., 2004), esto se da a que presenta una mayor molaridad al momento de su activación, la muestra con menos molaridad logra presentar el pico considerablemente menor al anterior, mientras que la muestra sin H_3PO_4 no presenta dicho pico, según los datos informados que presenta (Xie et al., 2001), las bandas $900\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$, podrían atribuirse a las especies de fosforo que se han generado gracias a la activación con H_3PO_4 , la muestra de menor molaridad sometida a TH, presenta una pequeña variación en su estiramiento, mientras que la de mayor molaridad se logra apreciar una considerable reducción en su elongación, además de presentar un aumento en el estiramiento, pero manteniendo el eje en el enlace, en el caso de la muestra de BC-TH-CA, no se logra observar ninguna variación con respecto a la muestra previa.

En la banda 1041 cm^{-1} se aprecia la presencia del grupo funcional Si-O, el cual es perteneciente al contenido de sílice que presenta la muestra (Salinas & Vargas, 2012), se observa que la muestra CA-5M-CA logra presentar el pico más pronunciado con respecto a este grupo, junto al CA-2M-CA, con un pico considerablemente reducido, y con un estiramiento diferente, así mismo las muestras después de ser sometidas a TH, logran presentar una deformación en lo que respecta a su eje, variando la posición de sus átomos y

presentando un estiramiento mayor, pero con una intensidad baja en sus picos, a diferencia de las muestras previas, en el caso de las muestras sin agente activante tanto con y sin TH, estas presentan un estiramiento similar, pero el grupo identificado se encontraba en un distinto rango de longitud de onda.

4.2.3. Propiedades texturales

La porosidad y el área superficial son comúnmente las propiedades físicas más sobresalientes que tienen influencia en la capacidad de adsorción que presentan los materiales adsorbentes (Rimaycuna Ramírez, 2020). El tamaño que logran presentar los poros es de suma importancia para la adsorción de contaminantes ya que, independientemente de la polaridad o la carga, el material con un tamaño de poro más bajo, no podrá retener adsorbatos de tamaño mayor (Tareq et al., 2018).

La medición de las propiedades texturales fue realizada mediante adsorción de N₂ a 77K

Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano

Tabla 17. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de raquis de banano.

Código	Área superficial (m²/g)	Volumen de poros ((m³/g)_{liq})
BC - RB	5,3	0,01
BC – TH - RB	23,1	0,01
CA - 2M – RB	41,3	0,03
CA - 2M - TH - RB	13,1	0,01
CA - 5M – RB	26,8	0,02
CA - 5M - TH - RB	10,9	0,02

En la tabla 17 se observan los resultados del área superficial y el volumen de poros de los materiales adsorbentes a base de raquis de banano, siendo el material adsorbente con mayor área

superficial y volumen de poro es el carbón activado a 2M de H₃PO₄ sin tratamiento hidrotermal con un área de 41,3 m²/g y 0,03 (m³/g)_{liq} de volumen de poro, este resultado varia de lo reportado por (Silva et al., 2021) donde en su investigación reporto 1975 m²/g de área superficial y 0,38 (m³/g)_{liq}, además se observa una disminución del área superficial cuando el carbón activado es sometido al tratamiento hidrotermal, esto puede deberse a las condiciones de pirolisis y tratamiento hidrotermal, por otro lado en el biocarbón sin tratamiento hidrotermal tuvo un área superficial de 5,3 m²/g siendo mucho menor a lo encontrado por (Lang et al., 2021) donde reporta un área superficial de 859 m²/g, además reporta una disminución del área superficial, en cambio en este trabajo aumenta significativamente su área superficial después del tratamiento hidrotermal con un valor de 23,1 m²/g.

Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao

Tabla 18. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cáscara de cacao.

Código	Área superficial (m²/g)	Volumen de poros (m³/g)_{liq}
BC - CC	30,7	0,02
BC - TH - CC	12,6	0,01
CA - 2M - CC	8,9	0,01
CA - 2M - TH - CC	20,6	0,02
CA - 5M - CC	8,6	0,01
CA - 5M - TH - CC	12,7	0,02

En la tabla 18 se aprecian los resultados del área superficial y el volumen de poros de los materiales adsorbentes a base de cáscara de cacao, se observa que el material adsorbente con mayor área superficial y volumen de poro es el biocarbón sin tratamiento hidrotermal con un área de 30,7 m²/g y 0,02 (m³/g)_{liq} de volumen de poro sin embargo este valor está muy por debajo a lo encontrado

por (Lang et al., 2021) sin embargo también reporta que al someter el biocarbón al tratamiento hidrotermal hay una disminución considerable del área superficial al igual que el volumen de poro, las propiedades texturales mejoradas del biocarbón sin tratamiento hidrotermal se podría deber a que la disolución de los compuestos orgánicos y el calor y la masa transferidos durante la pirólisis convencional superaron las condiciones establecidas para el tratamiento hidrotermal (Lang et al., 2021). Además, también se encontró que en caso de los carbones activados con el tratamiento hidrotermal aumenta el área superficial, iniciando con un área superficial de 8,9 m²/g y 8,6 m²/g para los carbones activados sin tratamiento hidrotermal de 2 y 5M de H₃PO₄ respectivamente, aumentando a 20,6 m²/g y 12,7 m²/g con ayuda del tratamiento hidrotermal, esto difiere a lo encontrado por (Susanti et al., 2022).

Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz

Tabla 19. Área superficial y porosidad de los materiales adsorbentes obtenidos a base de cascarilla de arroz.

Código	Área superficial (m²/g)	Volumen de poros (m³/g)_{liq}
BC - CA	18,3	0,01
BC - TH - CA	19,0	0,01
CA - 2M - CA	18,0	0,01
CA - 2M - TH - CA	25,7	0,01
CA - 5M - CA	3,5	0,01
CA - 5M - TH - CA	5,7	0,01

En la tabla 19 se observan los resultados del área superficial y el volumen de poros de los materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz, se observa que el material adsorbente con mayor área superficial y volumen de poro es el carbón activado a 2M de H₃PO₄ con tratamiento hidrotermal con un área de 25,7 m²/g y 0,01 (m³/g)_{liq} de volumen de poro, se observa también que en

caso todos los materiales adsorbentes trabajados hay un leve aumento del área superficial cuando son sometidos al tratamiento hidrotermal, sin embargo el volumen de poro en todos los materiales adsorbentes es el mismo con un valor de $0,01 \text{ (m}^3\text{/g)}_{\text{liq}}$, en general las propiedades texturales de los materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz presentan un valor bajo a lo reportado por (Lang et al., 2021; Mbarki et al., 2022; F. Zhou et al., 2021). En un estudio hecho por (Carrillo Quijano, 2013), en la elaboración de carbón activado a base de cascarilla de arroz, se determinó que, a un mayor lapso de tiempo de activación, el área BET y el volumen de poros reducen su tamaño, lo que expresa una afectación negativa.

4.3. Cinética adsorción

El experimento se realizó en *batch*, empleando las muestras tanto de biocarbón y carbón activado, así como las muestras después de ser sometidas a tratamiento hidrotermal, con dosis de material adsorbente de 0.5 g/L y extrayendo alícuotas de 10 ml periódicamente en un tiempo total de 240 min.

4.3.1. Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de raquis de banano

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando biocarbón

Tabla 20. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de raquis de banano sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	BC – RB	BC – TH - RB
<i>Pseudo</i>	q _e (mg/g)	31,639	28,063
<i>First</i>	K ₁ (min ⁻¹)	0,006	0,070
<i>Order</i>	χ ²	8,501	10,512
(PFO)	R ²	0,917	0,888
<i>Pseudo</i>	q _e (mg/g)	29,768	30,148
<i>Second</i>	K ₁ (min ⁻¹)	0,115	0,004
<i>Order</i>	χ ²	18,501	5,866
(PSO)	R ²	0,819	0,938

En la tabla 20 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno usando biocarbón a base de raquis de banano y biocarbón a base de raquis de banano sometido a tratamiento hidrotermal.

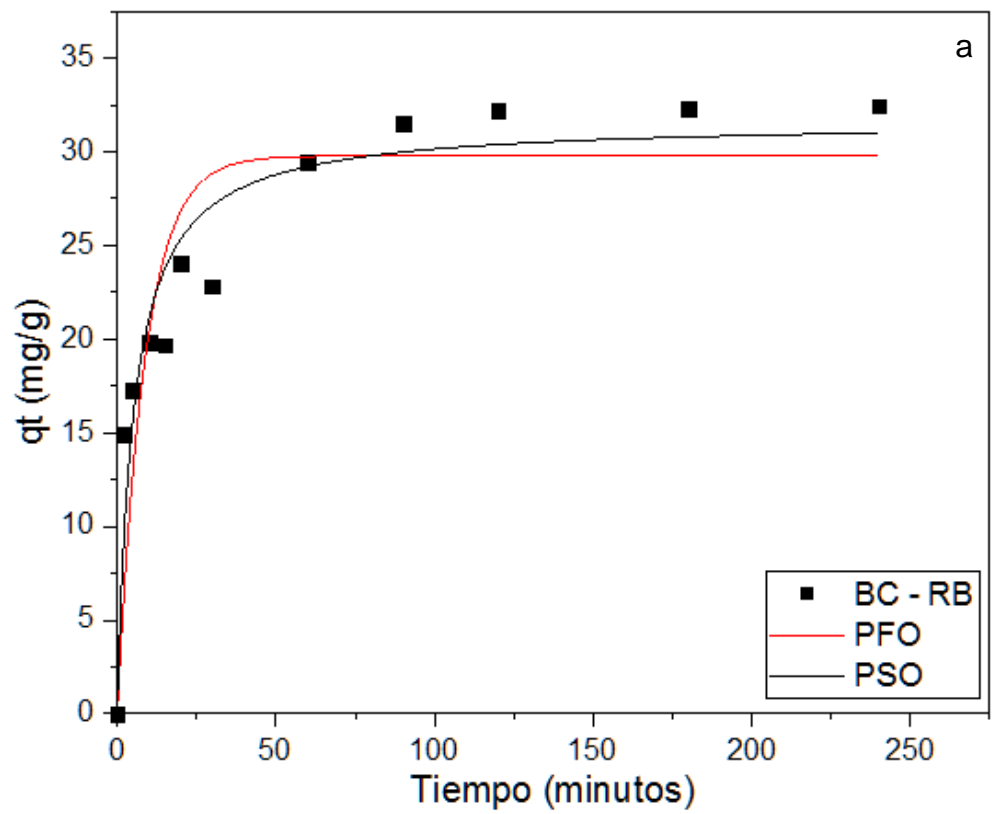
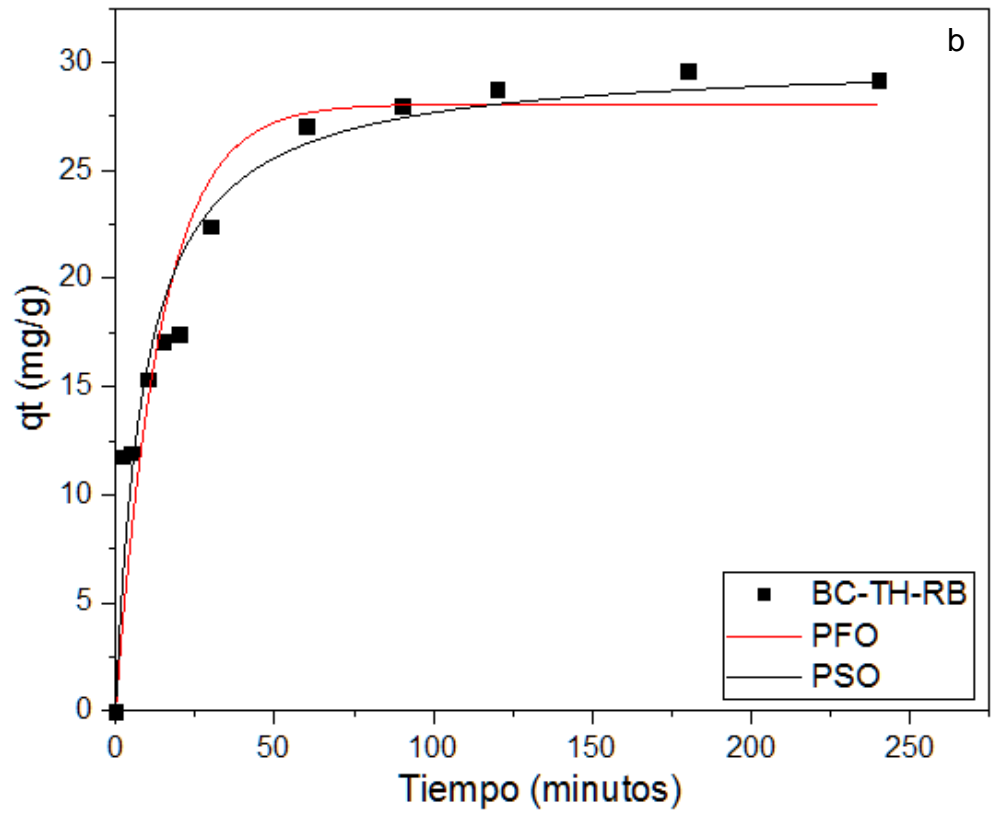


Figura 17. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando BC-RB (a) y BC-TH-RB (b).

En la figura 17 se muestran las curvas de ajuste de los modelos matemáticos de cinética de adsorción de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando biocarbón a base de raquis de banano sin tratamiento hidrotermal (BC – RB) y con este (BC – TH – RB) a una concentración de 20 ppm.

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de biocarbón sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,917 y 0,819 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 8,501 y 18,501 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 29,768 mg/g, en cambio cuando se realizaron las pruebas del biocarbón con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,888 y 0,938 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 10,512 y 5,866 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 30,148 mg/g.

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 2 M de H₃PO₄.

Tabla 21. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banano a 2 M de H₃PO₄ sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA – 2M – RB	CA – 2M – TH – RB
Pseudo	q _e (mg/g)	16,152	17,778
First	K ₁ (min ⁻¹)	395,352	0,241
Order	X ²	14,213	17,989
(PFO)	R ²	0,627	0,606
Pseudo	q _e (mg/g)	16,155	18,739
Second	K ₁ (min ⁻¹)	3,020	0,023
Order	X ²	14,213	14,515
(PSO)	R ²	0,627	0,683

En la tabla 21 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno. En la figura 18 se muestran las curvas de ajuste de los modelos matemáticos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando carbón activado a 2 M de H₃PO₄ a base de raquis de banano sin tratamiento hidrotermal (CA – 2M – RB) y con este (CA – 2M – TH - RB) a una concentración de 20 ppm.

Los resultados de las pruebas de cinética del carbón activado sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R²) de 0,6272 y valores de estadístico chi-cuadrado (X²) de 14,21297 para ambos modelos de PFO y PSO obteniendo una curva idéntica. Siendo que ambos modelos no lineales resultaron ser igual con una capacidad máxima de adsorción de 16,15 mg/g.

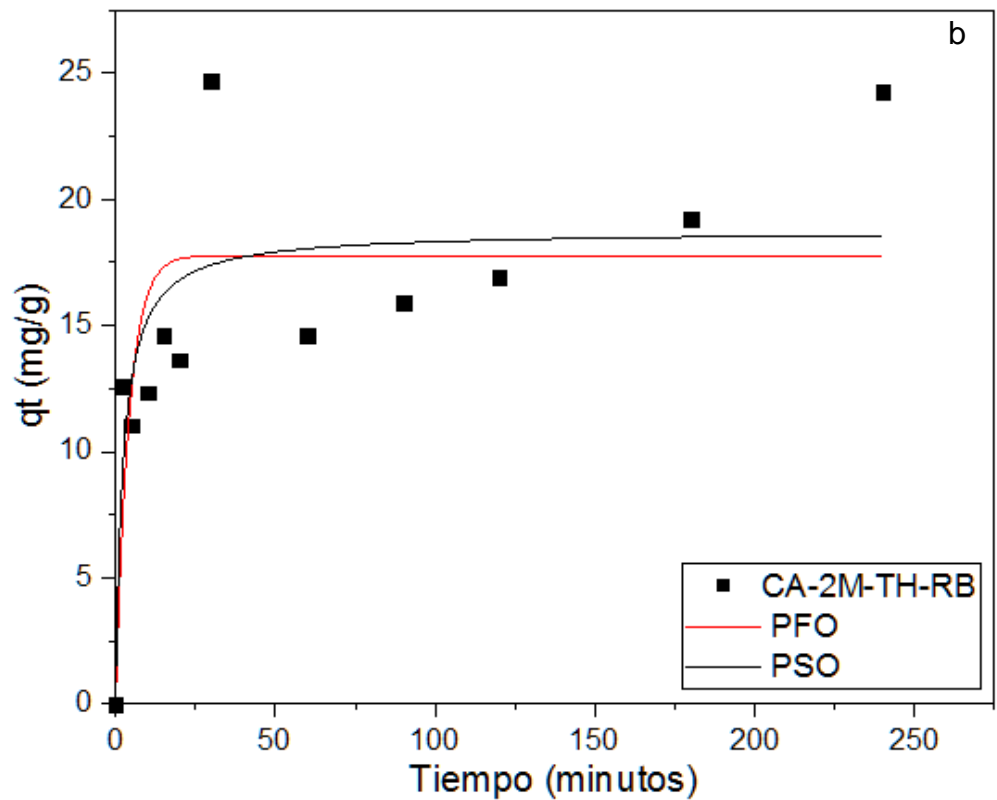
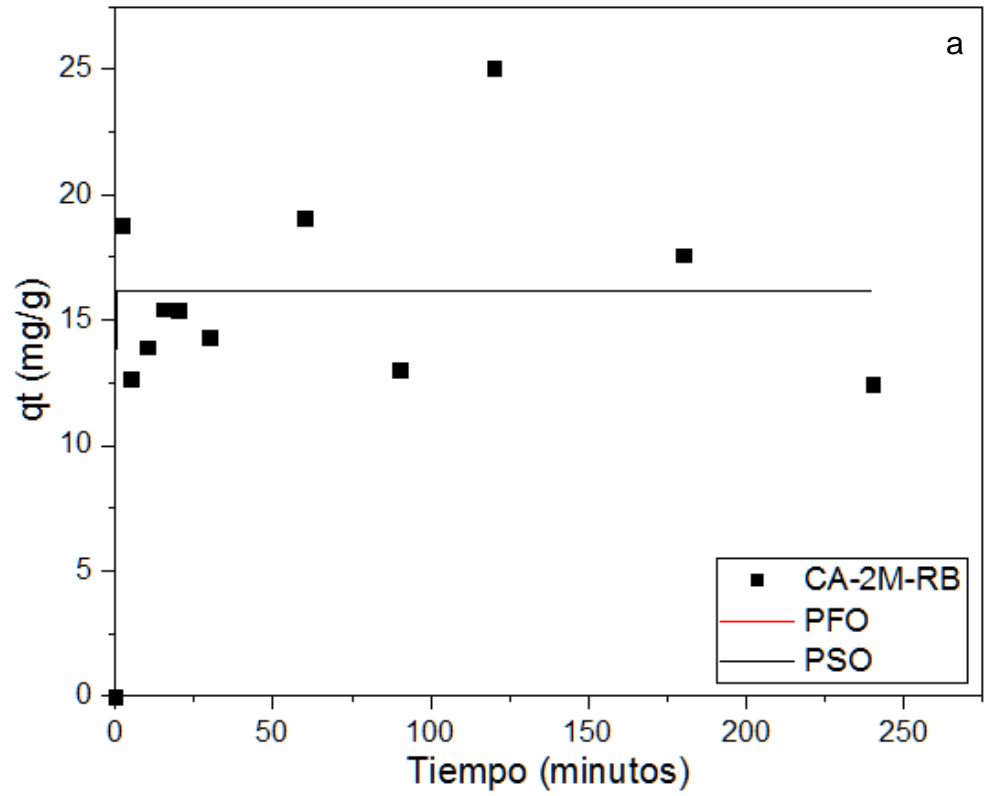


Figura 18. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando CA-2M-RB (a) y CA-2M-TH-RB (b).

Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,607 y 0,683 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 17,989 y 14,515 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 18,739 mg/g.

Se evidencia que el carbón activado al 2M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal resulto con mayor capacidad máxima de adsorción que el carbón activado sin tratamiento hidrotermal a pesar de tener menor área superficial, volumen de poro, así como un bajo contenido de humedad.

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 5 M de H_3PO_4 .

Tabla 22. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banano a 5 M de H_3PO_4 sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA – 5M – RB	CA – 5M – TH – RB
Pseudo	q_e (mg/g)	30,038	28,556
First	K_1 (min^{-1})	0,241	0,214
Order	X^2	14,462	15,425
(PFO)	R^2	0,859	0,839
Pseudo	q_e (mg/g)	32,379	30,866
Second	K_1 (min^{-1})	0,010	0,009
Order	X^2	5,56976	6,649
(PSO)	R^2	0,94607	0,931

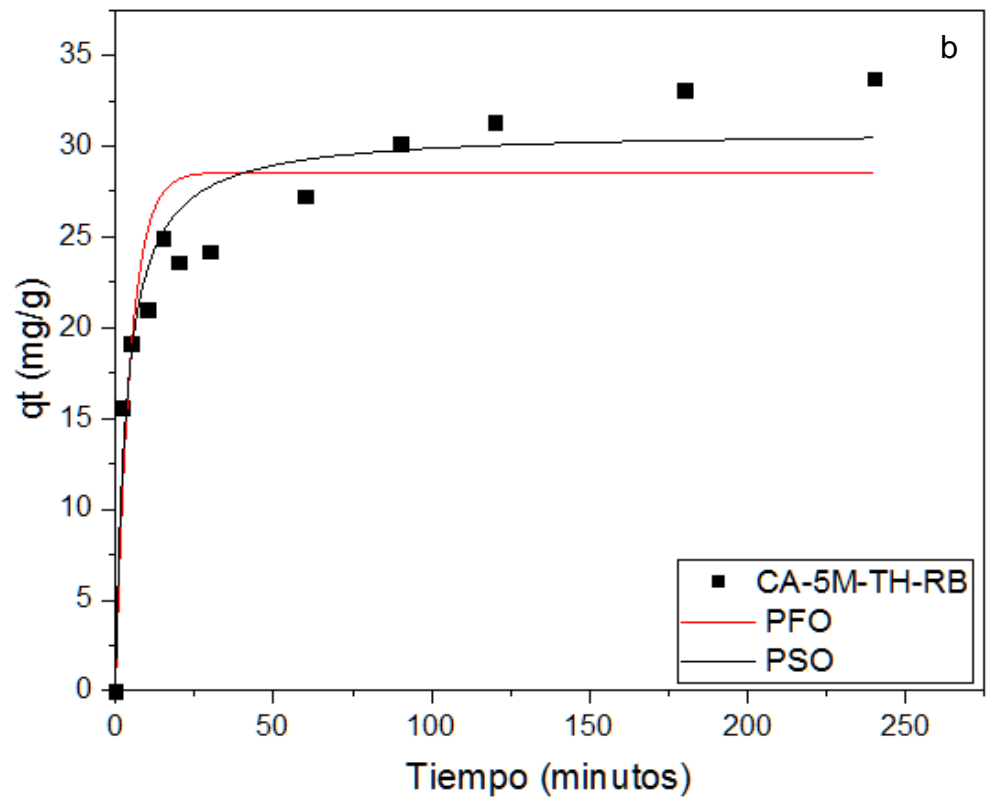
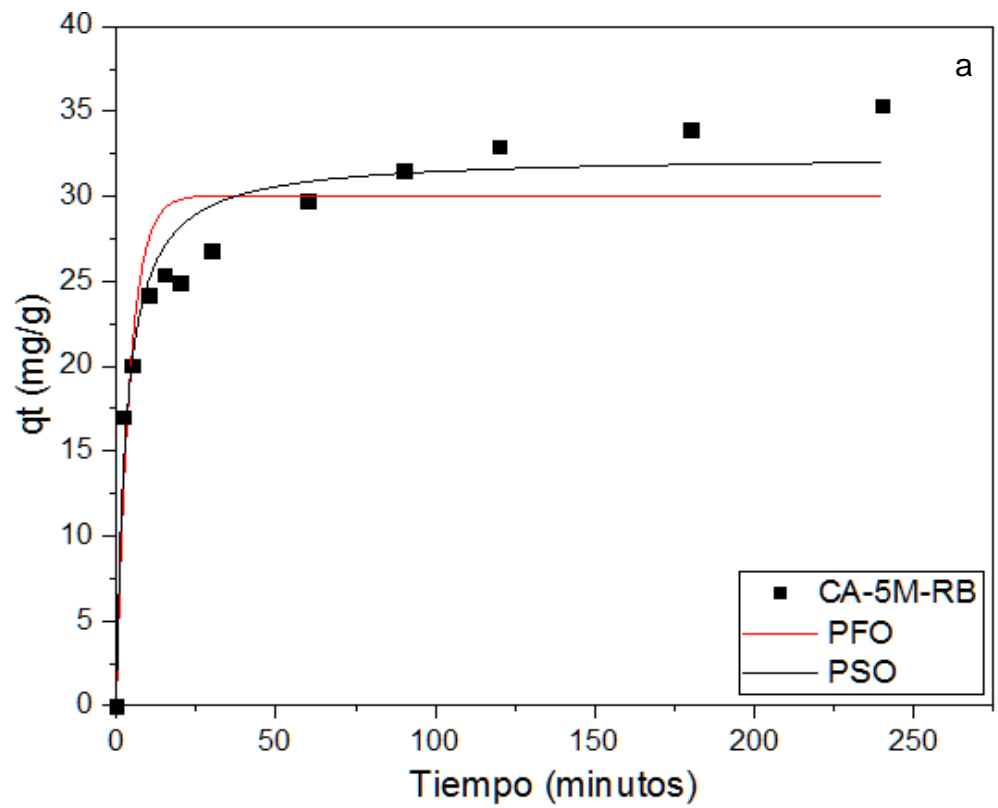


Figura 19. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando CA-5M-RB (a) y CA-5M-TH-RB (b).

En la figura 19 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando carbón activado a 5 M de H_3PO_4 a base de raquis de banano sin/con tratamiento hidrotermal (CA – 5M – RB) y con este (CA – 5M – TH - RB) a una concentración de 20 ppm.

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de carbón activado sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,859 y 0,946 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 14,462 y 5,569 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 32,379 mg/g. Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,606 y 0,682 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 17,989 y 14,515 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo que ambos modelos no lineales resultaron ser igual con una capacidad máxima de adsorción de 18,739 mg/g.

4.3.2. Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de cáscara de cacao

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando biocarbón

Tabla 23. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de cáscara de cacao sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	BC - CC	BC – TH - CC
Pseudo	qe (mg/g)	10,394	7,410
First	K ₁ (min ⁻¹)	1,202	0,376
Order	X ²	8,159	6,499
(PFO)	R ²	0,547	0,461
Pseudo	qe (mg/g)	10,305	8,534
Second	K ₁ (min ⁻¹)	2,109	0,028
Order	X ²	8,276	5,479
(PSO)	R ²	0,540	0,546

En la tabla 23 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno.

En la figura 20 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando biocarbón a base de cáscara de cacao sin tratamiento hidrotermal (BC – CC) y con este (BC – TH – CC) una concentración de 20 ppm.

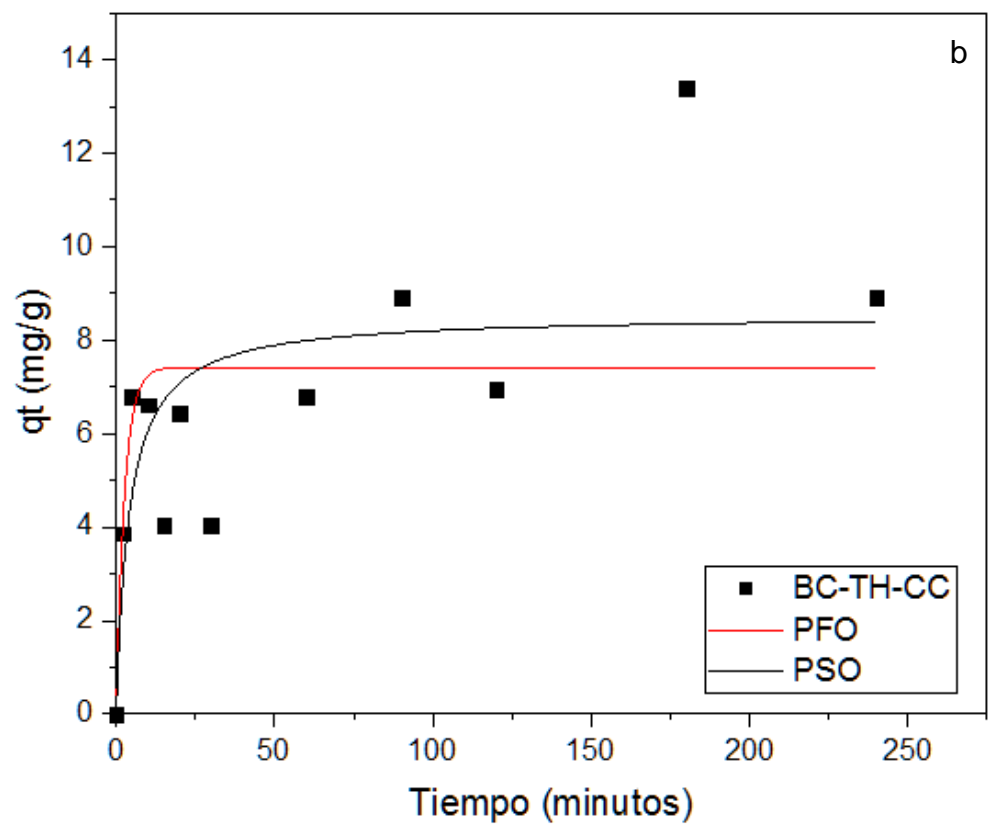
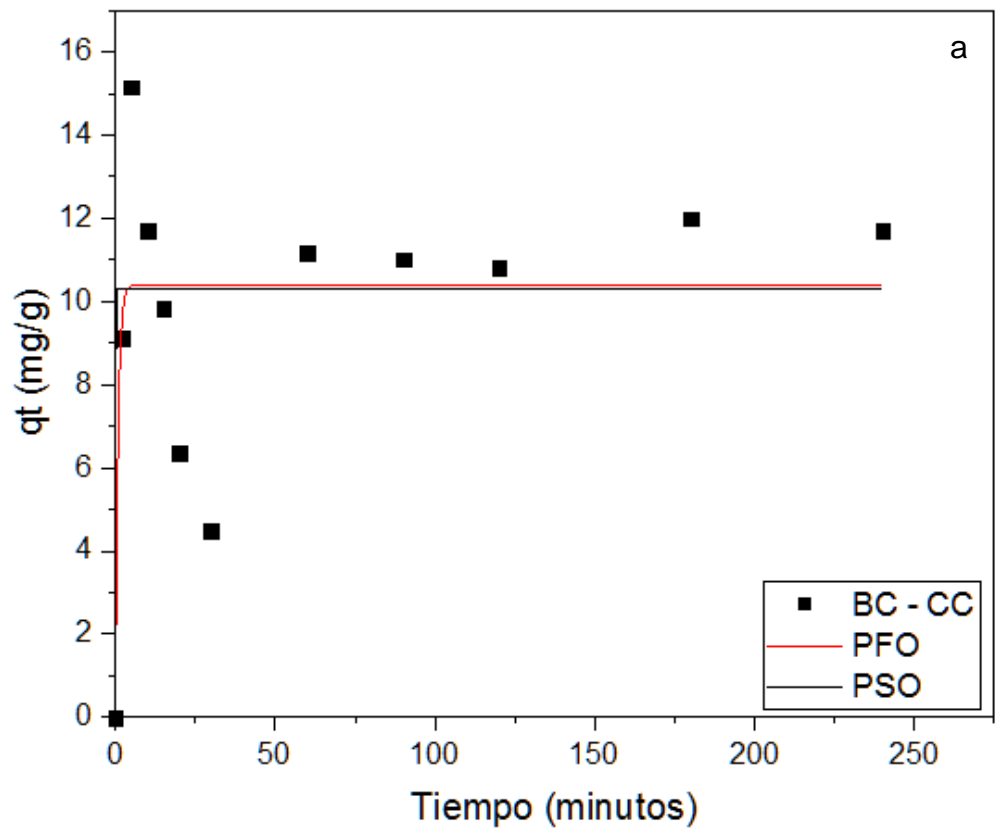


Figura 20. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando BC-CC (a) y BC-TH-CC (b).

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de biocarbón sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,547 y 0,540 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 8,159 y 8,276 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PFO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 10,394 mg/g, en cambio cuando se realizaron las pruebas del biocarbón con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,461 y 0,546 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 6,499 y 5,479 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 8,535 mg/g.

Se observa que el biocarbón sin tratamiento hidrotermal obtuvo una mayor capacidad de adsorción con un valor de 10,394 mg/g en comparación a lo obtenido con el tratamiento hidrotermal de 8,535 mg/g, esto puede deberse al menor contenido de ceniza de BC – CC, además de tener una mayor área superficial y un volumen mayor de poros totales a comparación del BC – TH – CC.

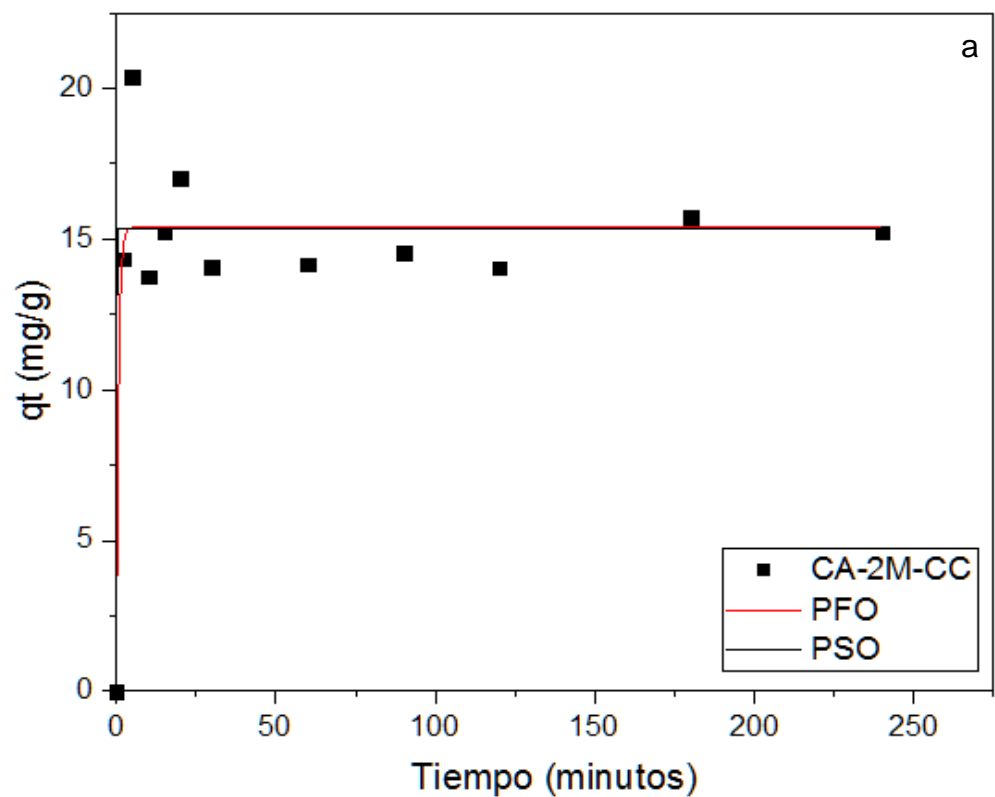
Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 2 M de H_3PO_4 .

En la tabla 24 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno.

Tabla 24. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón

activado a base de cáscara de cacao a 2 M de H_3PO_4
sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA-2M-CC	CA-2M-TH-CC
Pseudo	q_e (mg/g)	15,398	12,219
First	K_1 (min^{-1})	1,423	1,405
Order	X^2	3,644	4,883
(PFO)	R^2	0,856	0,735
Pseudo	q_e (mg/g)	15,317	12,197
Second	K_1 (min^{-1})	1,202	1,999
Order	X^2	3,734	4,920
(PSO)	R^2	0,852	0,733



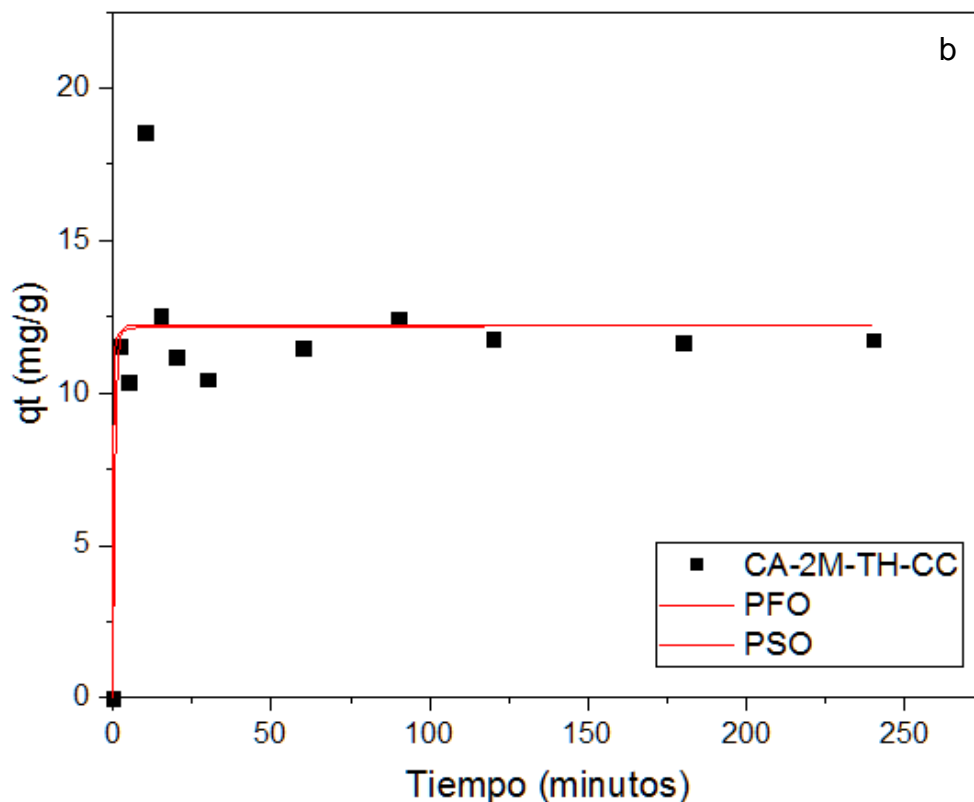


Figura 21. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando CA-2M-CC (a) y CA-2M-TH-CC (b).

Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotérmal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,735 y 0,733 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 4,883 y 4,920 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PFO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 12,219 mg/g.

Se observa que el CA – 2M – CC tiene la mayor capacidad de adsorción con un valor de 15,398 mg/g, esto puede deberse a que en el tratamiento hidrotérmal el área superficial del carbón activado incremento en 11,7 m^2/g en comparación al carbón activado sin tratamiento hidrotérmal, además de poseer el doble de volumen de poros.

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 5 M de H₃PO₄.

En la tabla 25 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno.

Tabla 25. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de raquis de banana a 5 M de H₃PO₄ sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA – 5M -CC	CA – 5M –TH – CC
Pseudo	q _e (mg/g)	21,556	21,834
First	K ₁ (min ⁻¹)	0,1128	0,154
Order	X ²	17,072	11,829
(PFO)	R ²	0,684	0,803
Pseudo	q _e (mg/g)	22,485	23,651
*Second	K ₁ (min ⁻¹)	0,010	0,009
Order	X ²	10,816	6,690
(PSO)	R ²	0,799	0,888

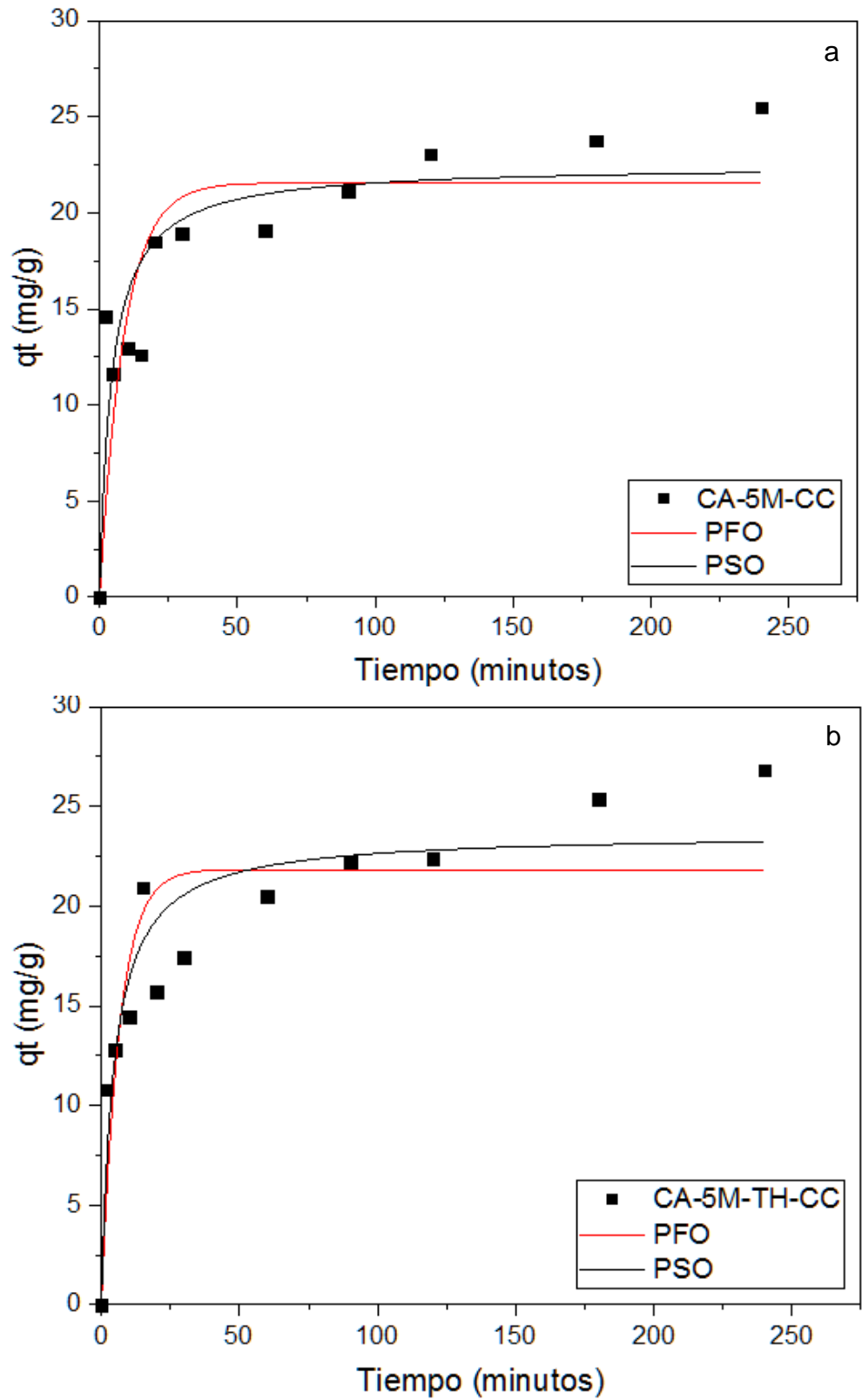


Figura 22. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de

cáscara de cacao a 5 M de H₃PO₄ sin/con tratamiento hidrotermal.

En figura 22 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando carbón activado a 5 M de H₃PO₄ a base de cascara de cacao sin tratamiento hidrotermal (CA – 5M – CC) y con este (CA – 5M – TH - CC) a una concentración de 20 ppm.

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de carbón activado sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,684 y 0,799 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 17,072 y 10,816 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 22,485 mg/g.

Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,803 y 0,888 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 11,829 y 6,690 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO al que más se ajusta la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 23,651 mg/g.

Se observa que el CA – 5M – TH – CC tiene la mayor capacidad de adsorción con un valor de 23,651 mg/g, esto puede deberse a que en el tratamiento hidrotermal el área superficial del carbón activado incremento a 12,7 m²/g en comparación al carbón activado sin tratamiento hidrotermal, además de poseer el doble de volumen de poros, de manera genera se observa que el CA – 5M – TH – CC tiene la mayor capacidad de adsorción en comparación a todos los materiales adsorbentes a base de cascara de cacao, además ha obtenido el menor contenido de humedad y mayor contenido de ceniza.

4.3.3. Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando biocarbón

En la tabla 26 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno

En la figura 23 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando biocarbón a base de cascarilla de arroz sin tratamiento mal (BC – CA) y con este (BC – TH – CA) a una concentración de 20 ppm.

Tabla 26. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando biocarbón a base de cascarilla de arroz sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	BC - CA	BC – TH - CA
Pseudo	q_e (mg/g)	13,927	6,822
First	K_1 (min^{-1})	0,307	0,159
Order	X^2	10,481	3,503
(PFO)	R^2	0,63991	0,509
Pseudo	q_e (mg/g)	15,377	6,942
Second	K_1 (min^{-1})	0,023	0,063
Order	X^2	8,255	2,933
(PSO)	R^2	0,716	0,589

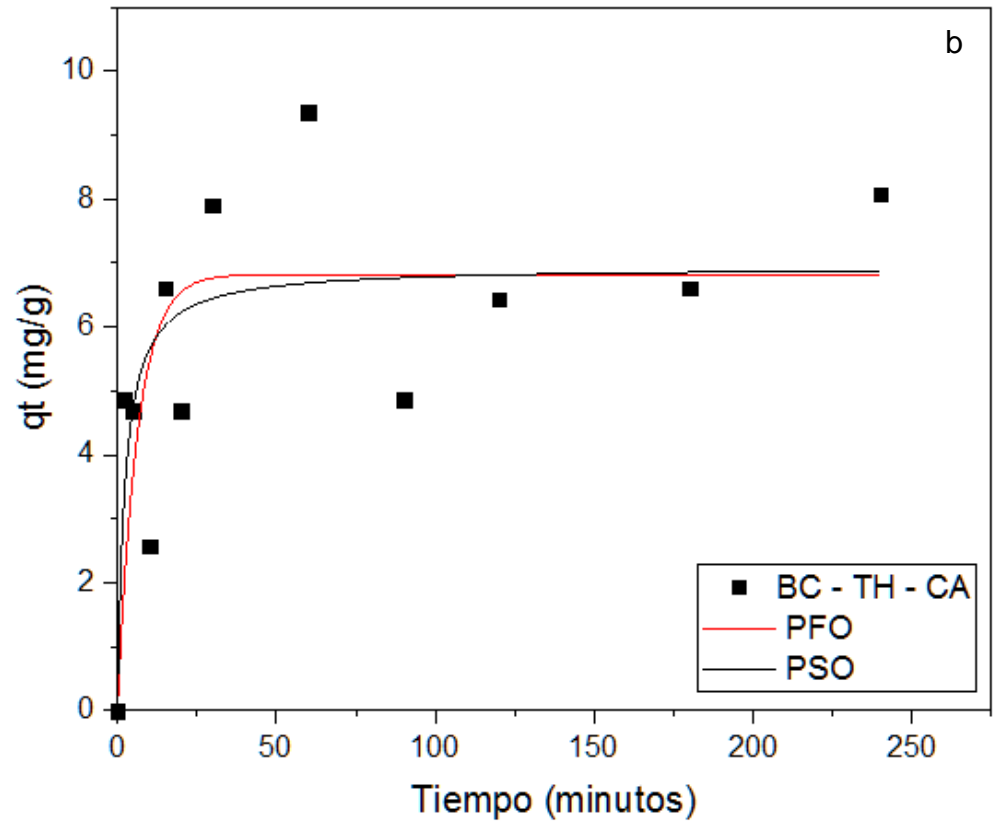
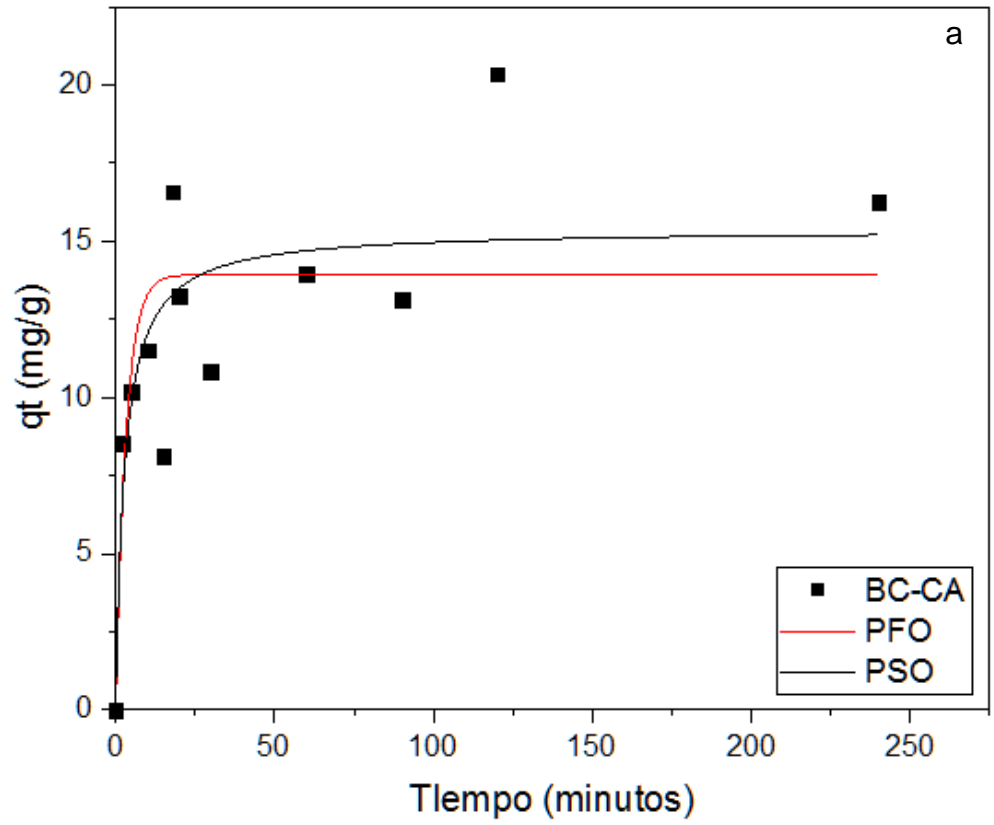


Figura 23. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando BC-CA (a) y BC-TH-CA (b).

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de biocarbón sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,639 y 0,716 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 10,481 y 8,255 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 15,377 mg/g.

Cuando se realizaron las pruebas del biocarbón con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,509 y 0,589 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 3,503 y 2,933 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 6.942 mg/g.

Siendo el BC – CC el que demostró una mayor capacidad de adsorción con un valor de 15,377 mg/g, siendo más que el doble de lo que obtuvo el BC – TH – CC, a pesar de que el BC – CA tiene un área superficial ligeramente menor al BC – TH – CC, por otro lado, en el contenido de humedad del BC – CC es bajo con un valor de 2,54%.

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 2 M de H_3PO_4 .

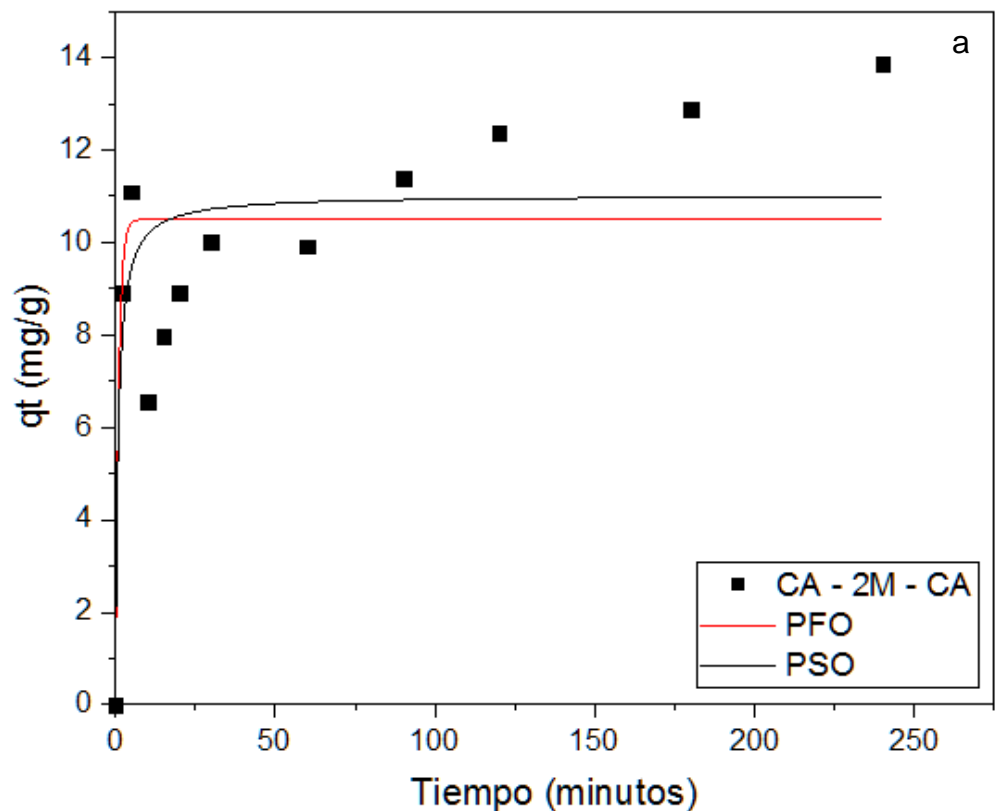
Tabla 27. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 2 M de H_3PO_4 sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA-2M-CA	CA-2M-TH-CA
<i>Pseudo</i>	q_e (mg/g)	10,496	14,568
<i>First</i>	K_1 (min^{-1})	0,973	0,079
<i>Order</i>	X^2	4,678	11,808
(PFO)	R^2	0,682	0,608

<i>Pseudo</i>	q_e (mg/g)	11,019	15,891
<i>Second</i>	K_1 (min^{-1})	0,108	0,007
<i>Order</i>	X^2	4,159	8,351
(PSO)	R^2	0,717	0,723

En la tabla 27 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno.

En la figura 24 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando carbón activado a 2 M de H_3PO_4 a base de cascarilla de arroz sin tratamiento hidrotermal (CA – 2M – CA) y con este (CA – 2M – TH – CA) a una concentración de 20 ppm.



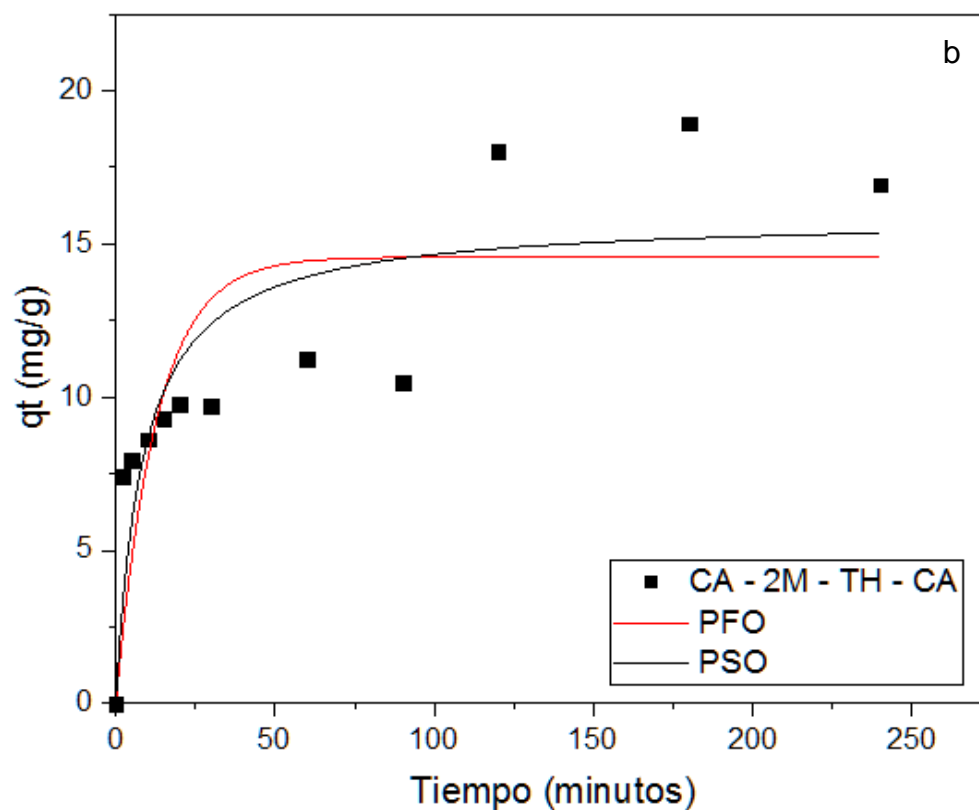


Figura 24. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando CA-2M-CA (a) y CA-2M-TH-CA (b).

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de carbón activado sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,682 y 0,717 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 4,678 y 4,159 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 11,012 mg/g.

Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,608 y 0,723 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 11,808 y 8,350 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 15,891 mg/g.

En el caso del carbón activado a 2M de H₃PO₄ el mejor material adsorbente para la remoción de azul de metileno resulto el material con el tratamiento hidrotermal con una capacidad de adsorción máxima de 15,891 mg/g a diferencia de su contraparte sin tratamiento hidrotermal con un valor de 11,012 mg/g, esto podría deberse al aumento de área superficial que sufrió el material después de ser sometido al tratamiento hidrotermal además de la reducción del contenido de humedad.

Cinética de adsorción del colorante Azul de Metileno usando carbón activado a 5 M de H₃PO₄.

En la tabla 28 se muestran los parámetros obtenidos de los modelos matemáticos no lineales PFO y PSO para determinar el modelo que más se ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno.

Tabla 28. Modelo matemático de cinética de adsorción del colorante azul de metileno (20 ppm) usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 2 M de H₃PO₄ sin/con tratamiento hidrotermal.

Modelo	Parámetro	CA-5M-CA	CA – 5M – TH - CA
Pseudo	q _e (mg/g)	14,221	12,075
First	K ₁ (min ⁻¹)	0,122	0,102
Order	X ²	7,975	7,879
(PFO)	R ²	0,704	0,575
Pseudo	q _e (mg/g)	15,248	12,786
Second	K ₁ (min ⁻¹)	0,013	0,015
Order	X ²	5,029	5,160
(PSO)	R ²	0,814	0,721

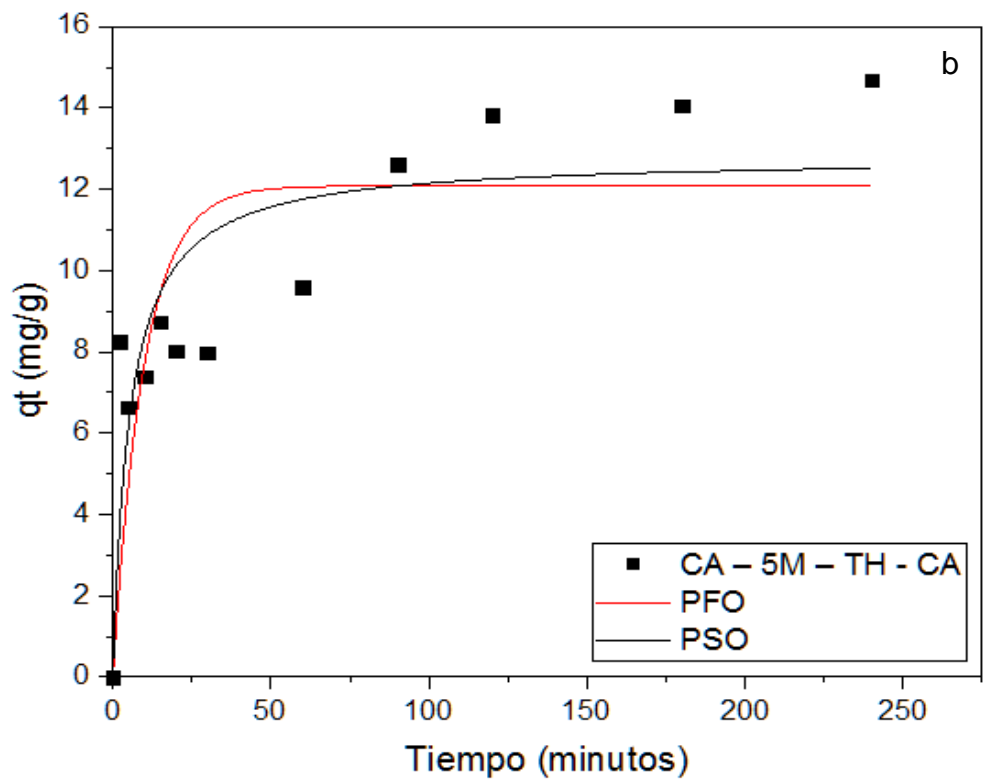
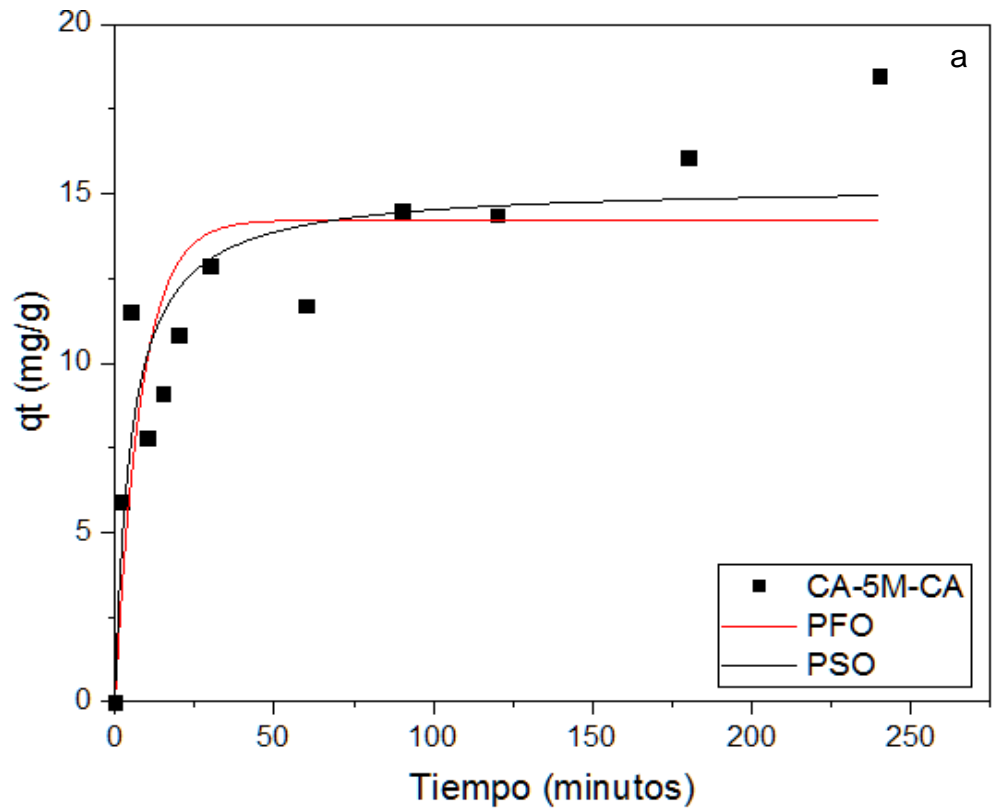


Figura 25. Curva de cinética de adsorción del colorante azul de metileno a 20 ppm usando carbón activado a base de cascarilla de arroz a 5 M de H_3PO_4 sin/con tratamiento hidrotermal.

En la figura 25 se muestran las curvas de ajuste de los modelos de Pseudo Primer Orden (PFO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) para los datos de cinética de adsorción del azul de metileno usando carbón activado a 5 M de H_3PO_4 a base de cascarilla de arroz sin tratamiento hidrotermal (CA – 5M – CA) y con este (CA – 5M – TH - CA) a una concentración de 20 ppm.

Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de carbón activado sin tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,704 y 0,814 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 7,975 y 5,029 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 15,248 mg/g.

Cuando se realizaron las pruebas con el carbón activado con tratamiento hidrotermal se obtuvieron valores de coeficiente de correlación (R^2) de 0,575 y 0,721 y valores de estadístico chi-cuadrado (X^2) de 7,879 y 5,160 para los modelos de PFO y PSO respectivamente. Siendo el modelo no lineal PSO el que más se ajusta a la cinética de adsorción con una capacidad máxima de adsorción de 12,786 mg/g.

En el caso del carbón activado a 5M de H_3PO_4 el mejor material adsorbente para la remoción de azul de metileno resulto el material sin el tratamiento hidrotermal con una capacidad de adsorción máxima de 15,248 mg/g a diferencia de su contraparte con tratamiento hidrotermal con un valor de 12,075 mg/g, esto podría deberse al aumento de área superficial que sufrió el material después de ser sometido al tratamiento hidrotermal además de la reducción considerable del contenido de humedad.

En general para el caso de los materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz, el mejor resultado de capacidad máxima de adsorción fue para el carbón activado a 2M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal con un valor de 15,891 mg/g, sin embargo,

no es una diferencia muy significativa en comparación al biocarbón con tratamiento hidrotermal con un valor de 15,377 mg/g y al carbón activado a 2M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal con un valor de 15,248 mg/g. Sin embargo, estos resultados son bajos en comparación a los materiales adsorbentes de raquis de banano y cascara de cacao una posible razón para la baja capacidad de adsorción se debe a su falta de grupos funcionales superficiales ($2346\text{--}2347\text{ cm}^{-1}$ y $1429\text{--}1434\text{ cm}^{-1}$, que corresponden a flexión y estiramiento de doble enlace CO y C-H) y presencia de impurezas (Lang et al., 2021a)

4.4. Discusión

Se produjeron biocarbón y carbón activado a base de raquis de banano, cascara de cacao y cascarilla de arroz, estos se sometieron a un tratamiento hidrotermal. Todos los materiales adsorbentes se caracterizaron y se sometieron a una prueba de cinética de adsorción para evaluar su efectividad.

Todos los biocarbón presentaron un color negro brillante, y una textura fina con granulometría irregular, un aspecto similar a lo encontrado por (Gonzaga et al., 2021; Yadav et al., 2021), sin embargo, al ser sometidos al tratamiento hidrotermal presenta un color negro más brillante y una textura más suave en comparación a sus antecesores, esto podría deberse al ablandamiento e hinchazón de la lignina (Rodríguez Correa et al., 2019). Por otro lado, en el caso de los carbones activado se observa que cuando se activan con una solución de H_3PO_4 se observan con una granulometría más fina y un aspecto blanquecino debido a la disposición del H_3PO_4 en la superficie (Rojas-Morales et al., 2016), cuando es sometido al tratamiento hidrotermal se observó una textura más suave y un color negro más brillante con pequeñas manchas blancas.

Con referencia a la parte líquida de la muestra obtenido del proceso hidrotermal se observó que la muestra líquida de carbones activados es más viscosa en comparación con las muestras líquidas de los biocarbones, además de sedimentar con mayor rapidez y al estar en

refrigeración se congelan, mientras que las muestras de biocarbón mantienen su forma líquida.

Con respecto al rendimiento encontrado, el biocarbón a base de raquis de banano fue el que obtuvo un valor más alto (48%) debido a la temperatura de pirolisis (Zhu et al., 2019), en el caso de la cascarilla de arroz obtienen un mejor rendimiento a una temperatura más baja (Kalderis et al., 2014), por otro lado, en el caso de la cascara de cacao se obtiene un mejor rendimiento cuando la materia prima es digerida (Ghysels et al., 2020). En el caso de los carbones activado, el que obtuvo el mejor rendimiento fue el carbón activado a 2M de H_3PO_4 base de cascara de cacao con un valor de 62%, además (Villota et al., 2019) reporta que el H_3PO_4 es un gran agente activante para materiales adsorbentes del cacao. Por otro lado, en el caso de la cascarilla de arroz (Arévalo & Reátegui, 2020) reporta que la concentración de activante (H_3PO_4) influye bastante en el rendimiento del biocarbón.

Con respecto al contenido de humedad encontrado, todos los materiales adsorbentes obtuvieron porcentajes de humedad bajos, sin embargo, los producidos a base de raquis de banano ostentan los más altos contenido de humedad (4,3% BC-RB y 12,9% CA-5M-RB) suponiendo una posibilidad de retener agua (E. Herrera et al., 2021), además en todos los casos se observa una disminución considerable en el contenido de humedad después de ser sometidos al tratamiento hidrotermal, esto coincide con lo reportado por (S. Wu et al., 2018) donde observa que el tratamiento hidrotermal ayuda en la reducción del contenido de humedad, además, esto es beneficioso ya que diversas investigación reportan que un bajo contenido de humedad ayuda a la adsorción de contaminantes (Cheng et al., 2021).

Con respecto al contenido de ceniza encontrado, el biocarbón a base de cascarilla de arroz obtuvo el valor más elevado del contenido de ceniza (26,4%) seguido del biocarbón a base de raquis de banano (23,3%), en caso de los carbones activados, el que obtuvo el mayor valor en contenido de ceniza fue el carbón activado a 5M de H_3PO_4 a base de raquis de

banano (28%), en general se observa que los materiales adsorbentes a base de raquis de banano presentan un alto contenido de ceniza, este resultado se asemeja a lo encontrado por (Lapo et al., 2020). Además, todos los materiales al ser sometidos al tratamiento hidrotérmal aumentaron el contenido de ceniza que poseían (Lapo et al., 2020), esto se debe a la disminución del material volátil (Liu et al., 2018), mejorando así la capacidad de adsorción de los materiales adsorbentes (D. Zhou et al., 2016).

Con respecto al pH carga cero se encontró, en la totalidad de los casos, los valores de pH de la solución durante los estudios de adsorción en equilibrio o cinética inferiores a pH_{PZC} hacen que la superficie del adsorbente sea positiva (Muñiz et al., 2009). En este caso, esta situación se encuentra favorecida, por atracción electrostática (Vyavahare et al., 2019), la adsorción de aniones gracias a las fuerzas de atracción entre la carga opuesta del adsorbato (con carga negativa) y el adsorbente (con carga positiva). En el caso del pH superficial se sabe que, dependiendo del pH del centro la carga superficial del material varía. Para pH mayores al pH_{PZC} , prevalece una carga negativa y a menores prevalece una carga positiva (Rimaycuna Ramírez, 2020).

En el caso del análisis de grupos funcionales en todos los materiales adsorbentes se observan picos en los números de onda 2361 cm^{-1} el cual pertenece a la vibración de estiramiento $C\equiv C$ del grupo alquino (Sanchora et al., 2020) y 1513 cm^{-1} donde se logra observar el estiramiento de anillo aromático de origen $C=C-C$ (Y. T. Tan et al., 2020). Por otro lado, las en los materiales líquidos obtenidos después de tratamiento hidrotérmal se observan picos en la onda 1647 cm^{-1} donde se logra observar el estiramiento $C=C$ del grupo alqueno, dando a entender que el estiramiento $C=C$ del grupo alqueno se formaría durante el tratamiento hidrotérmal.

En el caso de la porosidad, se observó que el biocarbón a base de cascara de cacao tiene un mayor volumen de poro ($0,02\text{ m}^3/\text{g}_{liq}$), sin embargo, después de ser sometidos al tratamiento hidrotérmal este valor disminuye

a la mitad, para el caso del resto de biocarbones no se encontró variación, por otro lado, en el caso de los carbones activados, el carbón activado a 2M de H_3PO_4 a base de raquis ostenta el mayor volumen de poro con un valor de $(0,03 \text{ m}^3/g_{liq})$, sin embargo al ser sometido al tratamiento hidrotermal este valor disminuye a $0,01 \text{ m}^3/g_{liq}$ esto podría deberse a las condiciones del tratamiento hidrotermal (Y. Lu et al., 2020). Por otro lado, los carbones activados a base de cascara de cacao aumentaron su volumen de poro con el tratamiento hidrotermal, esto podría deberse al contenido de lignina de la materia prima (Wang et al., 2019). Mientras que en los materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz todos ostentan el mismo volumen de poro $0,01 \text{ m}^3/g_{liq}$. Sin embargo, en general todos los materiales adsorbentes los volúmenes de poro se encuentran muy por debajo a lo reportado por otras investigaciones (Lang et al., 2021a; Silva et al., 2021).

En el caso del área superficial, el biocarbón a base de cascara de cacao obtuvo la mayor área superficial ($30,7 \text{ m}^2/g$), sin embargo, tanto como en este como en el biocarbón a base de raquis de banano disminuyó el área superficial al ser sometido al tratamiento hidrotermal, esto podría deberse a aumento de la cristalinidad debido al tiempo del tratamiento hidrotermal (Ochoa, 2020), caso contrario a lo ocurrido con el biocarbón a base de cascarilla de arroz donde el área superficial aumento después del tratamiento hidrotermal de igual manera lo reporta (Présiga-López, 2021). Por otro lado, en el caso de los carbones activado, el que ostenta la mayor área superficial es el carbón activado a 2M de H_3PO_4 a base de raquis de banano con un área de $41,3 \text{ m}^2/g$, además en el caso de todos los carbones activados aumentaron su área superficial después de ser sometidos al tratamiento hidrotermal, esto se asemeja a lo reportado por (Selmi et al., 2018).

En el caso de la adsorción de azul de metileno, en el caso de los biocarbones, el biocarbón a base de raquis banano fue el que mejor eficiencia tiene al momento de adsorber azul de metileno con una capacidad máxima de adsorción de $31,6 \text{ mg/g}$ ajustándose al modelo matemático no lineal de PFO, este resultado se asemeja a lo encontrado

por (Lang et al., 2021) quedando demostrado la alta capacidad de adsorción del biocarbón a base de raquis de banano. Sin embargo, al momento de someter los biocarbones al tratamiento hidrotermal la capacidad de adsorción de estos disminuye, en la investigación de (J. Wu et al., 2020) reporta que la disminución de la capacidad de adsorción de los materiales sometidos al tratamiento hidrotermal podría deberse a la carga descontaminante. De igual manera, con respecto a los carbones activados a 5M de H_3PO_4 cuando se someten al tratamiento hidrotermal disminuye su capacidad de adsorción del azul de metileno, esto podría deberse a la concentración del activante como lo reporta (Xing et al., 2019b) debido a que en su investigación con una concentración menor de H_3PO_4 obtiene una mejor eficiencia con el tratamiento hidrotermal.

Por otro lado, cuando se analiza la capacidad de adsorción de los materiales adsorbente Se evidencia que el CA – 5M – RB tiene una capacidad máxima de adsorción de 32,379 mg/g siendo una adsorción mayor que el carbón activado con tratamiento hidrotermal, obteniendo la mayor capacidad de adsorción a comparación del resto de materiales carbonosos, demostrando que el carbón activado a base de raquis de banano es un gran material para la adsorción del azul de metileno (Moubarak et al., 2018; Phungo, 2020).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En el caso de los materiales adsorbentes a base de raquis de banano, el carbón activado a 5M de H_3PO_4 sin tratamiento hidrotermal resultó con la mayor capacidad de adsorción de azul de metileno con un valor de 32,38 mg/g, siendo este el de mayor capacidad de adsorción a diferencia del resto de residuos agroindustriales trabajados, el carbón activado a 5M de H_3PO_4 obtuvo un rendimiento del 38%, además un contenido de humedad de 12,90% y un contenido de ceniza del 28,34%, con respecto al pH_{PzC} obtuvo un valor de 7,29 y por último el carbón activado a 5M de H_3PO_4 obtuvo 26,8 m^2/g de área superficial y 0,02 m^3/g_{liq} .

En el caso de los materiales adsorbentes a base de cascara de cacao, el carbón activado a 5M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal resulto con la mayor capacidad de adsorción de azul de metileno con un valor de 23,651 mg/g, además el carbón activado a 5M de H_3PO_4 obtuvo un rendimiento del 39,3%, además un contenido de humedad de 1,17% y un contenido de ceniza del 28,26%, con respecto al pH_{PzC} obtuvo un valor de 5,06 y por último el carbón activado a 5M de H_3PO_4 obtuvo 12,7 m^2/g de área superficial y 0,02 m^3/g_{liq} .

En el caso de los materiales adsorbentes a base de cascarilla de arroz, el carbón activado a 2M de H_3PO_4 con tratamiento hidrotermal resulto con la mayor capacidad de adsorción de azul de metileno con un valor de 15,891 mg/g, además el carbón activado a 2M de H_3PO_4 obtuvo un rendimiento del 39%, además un contenido de humedad de 1,25% y un contenido de ceniza del 23,46%, con respecto al pH_{PzC} obtuvo un valor de 3,40 y por último el carbón activado a 2M de H_3PO_4 obtuvo 25,7 m^2/g de área superficial y 0,01 m^3/g_{liq} .

En general el carbón activado de los 3 residuos agroindustriales tratados obtuvo mejores resultados en la cinética de adsorción del azul de metileno, en el caso del raquis de banano y cascara de cacao funciona mejor cuando el carbón es activado con 5M de H_3PO_4 en cambio la cascarilla de arroz funciona mejor cuando el carbón es activado con 2M

de H_3PO_4 . Con respecto al tratamiento hidrotermal mejora las propiedades del material adsorbente en el caso de la cascara de cacao y cascarilla de arroz, en el caso del raquis de banano se obtiene mejores resultados sin el tratamiento hidrotermal.

Las muestras líquidas obtenidas después del proceso hidrotermal se caracterizaron mediante FTIR y en todas las muestras líquidas se observan picos en la onda 1647 cm^{-1} donde se logra observar el estiramiento C=C del grupo alquélino, dando a entender que el estiramiento C=C del grupo alquélino se formaría durante el tratamiento hidrotermal. Además, en las muestras de la fase líquida concentrada de los carbones activados aparecen picos entre los rangos de 1162 cm^{-1} y 998 cm^{-1} , se observa una mayor elongación lo que podría corresponder al estiramiento del carbohidrato con $-\text{CO}$.

5.2. Recomendaciones

- En el caso de la cascarilla de arroz se recomienda probar con una temperatura de carbonización menor a lo probado en esta investigación.
- Se recomienda probar con otro tipo de agente activante, para observar si existe una mejora en las características de los productos obtenidos.
- Se recomienda hacer pruebas de adsorción de contaminantes empleando la fase sólida obtenida tanto antes como después del tratamiento hidrotermal, para deducir cual tiene una mayor eficiencia.
- Se recomienda hacer pruebas de remoción de sustancias usando la fase líquida obtenida después del proceso hidrotermal.
- Se recomienda que las muestras de la fase líquida obtenida después del proceso hidrotermal sean sometidas a demás pruebas como por ejemplo una corrida por el espectro Uv-Vis para la evaluación de macromoléculas o micro moléculas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilera Torre, B. (2020). *Fraccionamiento hidrotermal de zanahoria en planta piloto y separación por membranas de ultrafiltración*.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Ahmed, A., Kurian, J., & Raghavan, V. (2016). Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review. *Environmental Reviews*, 24(4), 495–502. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0008>
- Ao, W., Fu, J., Mao, X., Kang, Q., Ran, C., Liu, Y., Zhang, H., Gao, Z., Li, J., Liu, G., & Dai, J. (2018). Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 958–979. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.051>
- Arévalo, F. H., & Reátegui, K. (2020). Calidad y rendimiento del carbón activado de la cáscara del fruto de calabaza (*Cucurbita ficifolia*) obtenido por método químico. *Revista Forestal Del Perú*, 35(1), 21. <https://doi.org/10.21704/rfp.v35i1.1473>
- Arias, X. C., & Becerra, J. V. (2020). Análisis de los factores de producción y comercialización para el crecimiento agroindustrial en el Perú. *Universidad Católica San Pablo*.
- ASTM. (n.d.). Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon. *In Standard Test Method, Vol. D-286*.
- ASTM International. (2004). Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon. *ASTM Standards*, 15(1), 1–6.
- Avalos, A., & Torres, I. (2018). Modelo de negocio para la producción y comercialización de envases biodegradables a base de cascarilla de arroz. *Universidad De Piura*, 215.
- Bachmann, H. J., Bucheli, T. D., Dieguez-Alonso, A., Fabbri, D., Knicker, H., Schmidt, H. P., Ulbricht, A., Becker, R., Buscaroli, A., Buerge, D., Cross, A., Dickinson, D., Enders, A., Esteves, V. I., Evangelou, M. W. H., Fellet, G., Friedrich, K., Gasco Guerrero, G., Glaser, B., ... Zehetner, F. (2016). Toward the Standardization of Biochar Analysis: The COST Action TD1107 Interlaboratory Comparison. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(2), 513–527. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05055>
- Barana, D., Salanti, A., Orlandi, M., Ali, D. S., & Zoia, L. (2016). Biorefinery process for the simultaneous recovery of lignin, hemicelluloses, cellulose nanocrystals and silica from rice husk and *Arundo donax*. *Industrial Crops and Products*, 86, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.029>

- Beesigamukama, D., Mochoge, B., Korir, N. K., Fiaboe, K. K. M., Nakimbugwe, D., Khamis, F. M., Dubois, T., Subramanian, S., Wangu, M. M., Ekesi, S., & Tanga, C. M. (2020). Biochar and gypsum amendment of agro-industrial waste for enhanced black soldier fly larval biomass and quality frass fertilizer. *PLOS ONE*, *15*(8), e0238154. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238154>
- Bibaj, E., Lysigaki, K., Nolan, J. W., Seyedsalehi, M., Deliyanni, E. A., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2019). Activated carbons from banana peels for the removal of nickel ions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(2), 667–680. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1676-0>
- Bone Lemos, N. J., & López Villalta, C. I. (2021). *Evaluación de residuos agroindustriales de la empresa procesadora de frutas Profrutas CIA Ltda para su aprovechamiento integral*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química.
- Burgos Campuzan, G. E., & Jaramillo Quiroz, J. L. (2015). Aprovechamiento de los residuos de cacao y coco para la obtención de carbón activado, en el cantón Milagro, provincia del Guayas. In *Universidad de Guayaquil*.
- Cao, X., & Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, *101*(14), 5222–5228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>
- Cardoen, D., Joshi, P., Diels, L., Sarma, P. M., & Pant, D. (2015). Agriculture biomass in India: Part 1. Estimation and characterization. *Resources, Conservation and Recycling*, *102*, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.003>
- Carrillo Quijano, C. (2013). Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz - una revisión. *Scientia et Technica*, *18*(2), 422–428. <https://doi.org/10.22517/23447214.7855>
- Cayo Reinoso, E. L. (2018). Obtención De Un Biocombustible Sólido Por Torrefacción Húmeda a Partir De La Cáscara De La Mazorca De Cacao Para La Generación De Energía. In *Escuela Politécnica Nacional*. Quito, 2018.
- Cerro, G. C., La Cotera, C. C., & Aguirre, D. (2015). Producción y caracterización de carbones activados a partir de residuos agroindustriales. *Manglar*, *10*(2), 17–25.
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 40, pp. 1–15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chen, X., Chen, G., Chen, L., Chen, Y., Lehmann, J., McBride, M. B., & Hay, A. G. (2011). Adsorption of copper and zinc by biochars produced from

- pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.078>
- Cheng, N., Wang, B., Wu, P., Lee, X., Xing, Y., Chen, M., & Gao, B. (2021). Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, 273, 116448. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116448>
- Condori, M. (2018). *Obtencion de carbon activado a partir de cascarilla de arroz (oryza sativa) modificado quimicamente para la remocion de Plomo y Arsenico presentes en el agua*.
- Cruz, G. J. F., Matějová, L., Pirilä, M., Ainassaari, K., Canepa, C. A., Solis, J., Cruz, J. F., Šolcová, O., & Keiski, R. L. (2015a). Erratum: A comparative study on activated carbons derived from a broad range of agro-industrial wastes in removal of large-molecular-size organic pollutants in aqueous phase (Water, Air, and Soil Pollution). In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 226, Issue 11, pp. 1–15). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2540-1>
- Cruz, G. J. F., Matějová, L., Pirilä, M., Ainassaari, K., Canepa, C. A., Solis, J., Cruz, J. F., Šolcová, O., & Keiski, R. L. (2015b). Erratum: A comparative study on activated carbons derived from a broad range of agro-industrial wastes in removal of large-molecular-size organic pollutants in aqueous phase (Water, Air, and Soil Pollution). In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 226, Issue 11, pp. 1–15). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2540-1>
- Cui, X., Antonietti, M., & Yu, S. H. (2006). Structural effects of iron oxide nanoparticles and iron ions on the hydrothermal carbonization of starch and rice carbohydrates. *Small*. <https://doi.org/10.1002/sml.200600047>
- Delgado, E. R. (2019). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de carbono a partir de una fuente de celulosa de algodón*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Deng, H., Lu, J., Li, G., Zhang, G., & Wang, X. (2011). Adsorption of methylene blue on adsorbent materials produced from cotton stalk. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.013>
- Elías Silupu, J. W., Alcántara Revilla, A. R., Silva Villanueva, J. L., & Neciosup Prieto, M. E. (2020). Reutilización de residuos agroindustriales, cáscara de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) en la fabricación de fibras aglomeradas por buenas prácticas ambientales. *SENDAS*, 1(3), 21. <https://doi.org/10.47192/rcs.v1i3.42>
- Ensuncho, A. E., Robles, J. R., & Carriazo, J. G. (2015). Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 81(2), 135–147.

- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367–382.
- Espinoza Tapia, J. C., LeBorgne, S., Olivares Hernández, R., Hernández Guerrero, M., González Reyes, L., & Viguera Ramírez, J. G. (2020). Validación de método analítico para la cuantificación de compuestos de fermentación por HPLC–RI–UV. *Revista Tendencias En Docencia e Investigación En Química. Año 6, Número 6 (Enero-Diciembre de 2020)*. ISSN: 2448-6663, 6(6), 2020. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Fang, J., Zhan, L., Ok, Y. S., & Gao, B. (2018). Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.08.026>
- Florian, T. D. M., Villani, N., Aguedo, M., Jacquet, N., Thomas, H. G., Gerin, P., Magali, D., & Richel, A. (2019). Chemical composition analysis and structural features of banana rachis lignin extracted by two organosolv methods. *Industrial Crops and Products*, 132, 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.022>
- Franks, G. V., & Meagher, L. (2003). The isoelectric points of sapphire crystals and alpha-alumina powder. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 214(1–3), 99–110. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00366-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00366-7)
- Funar-Timofei, S., Fabian, W. M. F., Kurunczi, L., Goodarzi, M., Ali, S. T., & Heyden, Y. Vander. (2012). Modelling heterocyclic azo dye affinities for cellulose fibres by computational approaches. *Dyes and Pigments*, 94(2), 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.01.015>
- Gai, C., Guo, Y., Peng, N., Liu, T., & Liu, Z. (2016). N-Doped biochar derived from co-hydrothermal carbonization of rice husk and *Chlorella pyrenoidosa* for enhancing copper ion adsorption. *RSC Advances*, 6(59), 53713–53722. <https://doi.org/10.1039/C6RA09270E>
- García Criollo, M. L. (2021). Programa de sensibilización para mejorar el conocimiento en la producción de banano orgánico, Distrito de San Juan de la Virgen, Tumbes, 2020. *Repositorio Institucional - UCV*.
- Ghysels, S., Acosta, N., Estrada, A., Pala, M., de Vrieze, J., Ronsse, F., & Rabaey, K. (2020). Integrating anaerobic digestion and slow pyrolysis improves the product portfolio of a cocoa waste biorefinery. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(7), 3712–3725. <https://doi.org/10.1039/D0SE00689K>
- Gonzaga, A., Rimaycuna, J., Cruz, G. J. F., Herrera, E. L., Gómez, M. M., Solís, J. L., Cruz, J. F., & Keiski, R. L. (2021). Remoción de plomo presente en soluciones acuosas utilizando biocarbón producido a base de

coronta de maíz. *Manglar*, 18(1), 35–43.
<https://doi.org/10.17268/MANGLAR.2021.005>

Guachi Cabrera, P. E. (2019). Obtención de carbón mediante Carbonización Hidrotermal utilizando bagazo de caña. In *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR* (Vol. 52, Issue 1). Quito: UCE.

Güemes-Vera, N., Ríos-Pérez, F., Soto Simental, S., Quintero Lira, A., & Piloni Martini, J. (2020). Harina de cáscara de vaina de cacao: Una opción para el aprovechamiento de residuos agroindustriales. *Boletín de Ciencias Agropecuarias Del ICAP*, 6(11), 5–7.
<https://doi.org/10.29057/icap.v6i11.5322>

Guerra, P. (2014). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 101.

Gutiérrez, J. G., Aguilera, L. I., & Gonzáles, C. E. (2017). Agroecología y sustentabilidad. In *Convergencia* (Vol. 15, Issue 46, pp. 51–87).

Heidari, M., Dutta, A., Acharya, B., & Mahmud, S. (2019). A review of the current knowledge and challenges of hydrothermal carbonization for biomass conversion. *Journal of the Energy Institute*, 92(6), 1779–1799.
<https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2018.12.003>

Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters* 2020 18:2, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/S10311-019-00955-0>

Hernández-Rodríguez, M., Otero-Calvis, A., Falcón-Hernández, J., & Yperman, Yan. (2017). Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO₃. *Revista Cubana de Química*, 29(1), 26–38.

Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M., Keiski, R., & Cruz, G. (2021). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577.

Herrera, E. L., Feijoo, C. Y., Alfaro, R., Solís, J. L., Mónica, ;, Gómez, M., Riitta, ;, Keiski, L., & Cruz, G. J. F. (2018). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2018.04.13>

Hoekman, S. K., Broch, A., & Robbins, C. (2011). Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass. *Energy and Fuels*.
<https://doi.org/10.1021/ef101745n>

- Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S.-H., Antonietti, M., & Titirici, M.-M. (2010). Engineering Carbon Materials from the Hydrothermal Carbonization Process of Biomass. *Advanced Materials*, 22(7), 813–828. <https://doi.org/10.1002/adma.200902812>
- Jung, M.-W., Ahn, K.-H., Lee, Y., Kim, K.-P., Rhee, J.-S., Tae Park, J., & Paeng, K.-J. (2001). Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC). *Microchemical Journal*, 70(2), 123–131. [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(01\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(01)00109-6)
- Kalaivani, S. S., Vidhyadevi, T., Murugesan, A., Baskaralingam, P., Anuradha, C. D., Ravikumar, L., & Sivanesan, S. (2014). Equilibrium and kinetic studies on the adsorption of Ni(II) ion from an aqueous solution using activated carbon prepared from Theobroma cacao (cocoa) shell. *Desalination and Water Treatment*, 54(6), 1–13. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.888678>
- Kalderis, D., Kotti, M. S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014). Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of rice husk. *Solid Earth*, 5(1), 477–483. <https://doi.org/10.5194/se-5-477-2014>
- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Kannan, S., Burelle, I., Orsat, V., & Vijaya Raghavan, G. S. (2020). Characterization of Bio-crude Liquor and Bio-oil Produced by Hydrothermal Carbonization of Seafood Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3553–3565. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00704-y>
- Karim, A., Kumar, M., Mohapatra, S., Panda, C., & Singh, A. (2015). Banana Peduncle Biochar: Characteristics and Adsorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.9734/IRJPAC/2015/16163>
- Kennedy, L. J., Vijaya, J. J., & Sekaran, G. (2004). Effect of Two-Stage Process on the Preparation and Characterization of Porous Carbon Composite from Rice Husk by Phosphoric Acid Activation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(8), 1832–1838. <https://doi.org/10.1021/ie034093f>
- Lam, E. (2020). *Producción potencial de bio oil y biochar por pirólisis de residuos de banana y arroz*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Lang, J., Matějová, L., Cuentas-Gallegos, A. K., Lobato-Peralta, D. R., Ainassaari, K., Gómez, M. M., Solís, J. L., Mondal, D., Keiski, R. L., & Cruz, G. J. F. (2021). Evaluation and selection of biochars and hydrochars derived from agricultural wastes for the use as adsorbent and

- energy storage materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105979. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105979>
- Lapo, B., Bou, J. J., Hoyo, J., Carrillo, M., Peña, K., Tzanov, T., & Sastre, A. M. (2020). A potential lignocellulosic biomass based on banana waste for critical rare earths recovery from aqueous solutions. *Environmental Pollution*, 264, 114409. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114409>
- Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K. S., Yang, W., Park, Y. K., Jung, J., & Hyun, S. (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, 148, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.135>
- Leng, L., Li, H., Yuan, X., Zhou, W., & Huang, H. (2018). Bio-oil upgrading by emulsification/microemulsification: A review. *Energy*, 161, 214–232. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.07.117>
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of The Total Environment*, 763, 144204. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144204>
- Leng, L., Zhang, W., Peng, H., Li, H., Jiang, S., & Huang, H. (2020). Nitrogen in bio-oil produced from hydrothermal liquefaction of biomass: A review. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126030. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126030>
- Li, R., Wang, J. J., Zhang, Z., Awasthi, M. K., Du, D., Dang, P., Huang, Q., Zhang, Y., & Wang, L. (2018). Recovery of phosphate and dissolved organic matter from aqueous solution using a novel CaO-MgO hybrid carbon composite and its feasibility in phosphorus recycling. *Science of The Total Environment*, 642, 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.092>
- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E. G., & Luizão, F. J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
- Liang, J., Shan, G., & Sun, Y. (2021). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110707. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110707>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., & others. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106.

- Liu, X., Wu, X., & Wang, J. (2018). Substantial upgrading of a high-ash lignite by hydrothermal treatment followed by Ca(OH)₂ digestion/acid leaching. *Fuel*, 222, 269–277. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.02.034>
- Lu, F., Rodriguez-Garcia, J., Van Damme, I., Westwood, N. J., Shaw, L., Robinson, J. S., Warren, G., Chatzifragkou, A., McQueen Mason, S., Gomez, L., Faas, L., Balcombe, K., Srinivasan, C., Picchioni, F., Hadley, P., & Charalampopoulos, D. (2018). Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 14, pp. 80–88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
- Lu, Y., Ou, X., Wang, W., Fan, J., & Lv, K. (2020). Fabrication of TiO₂ nanofiber assembly from nanosheets (TiO₂-NFs-NSs) by electrospinning-hydrothermal method for improved photoreactivity. *Chinese Journal of Catalysis*, 41(1), 209–218. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63470-4](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63470-4)
- Lu, Y., & Savage, P. E. (2015). Supercritical water gasification of lipid-extracted hydrochar to recover energy and nutrients. *Journal of Supercritical Fluids*, 99, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.01.019>
- Ma, Q., Yu, Y., Sindoro, M., Fane, A. G., Wang, R., & Zhang, H. (2017). Carbon-Based Functional Materials Derived from Waste for Water Remediation and Energy Storage. In *Advanced Materials* (Vol. 29, Issue 13, p. 1605361). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/adma.201605361>
- Macías, G. (2021). *Aprovechamiento de residuos de cáscara de cacao en la obtención de carbón activado para ser usado como medio filtrante*. Quevedo: UTEQ.
- Manyà, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 46, Issue 15, pp. 7939–7954). ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/es301029g>
- Martinez de Yuzo, A. A. (2015). *Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulosicos para la adsorcion y recuperacion de tolueno y n-hexano*. 32.
- Martinez, J., & Gonzalez, A. (2019). *Obtención y evaluación de carbón activado a partir de raquis de plátano en impurezas de aguas residuales*.
- Mbarki, F., Selmi, T., Kesraoui, A., & Seffen, M. (2022). Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H₃PO₄, ZnCl₂ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*, 178, 114546. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.114546>

- Mendoza, J. D. (2018). Obtención de materiales carbonosos y furanos a partir de Bagazo de agave por carbonización hidrotérmica. In *Centro de Investigación en Materiales Avanzados* (Vol. 10, Issue 2). CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS.
- Moubarak, F., Atmani, R., Elkouali, M., Talbi, M., Gondaf, Y., & Amardo, N. (2018). Adsorption of methylene blue in solution on activated carbon based of banana peels residue. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 9(10), 617–622.
https://www.researchgate.net/profile/Moubarak-Faical/publication/328783332_Adsorption_of_methylene_blue_in_solution_on_activated_carbon_based_of_banana_peels_residue/links/5bea845792851c6b27ba553e/Adsorption-of-methylene-blue-in-solution-on-activated-carb
- Muniandy, L., Adam, F., Mohamed, A. R., & Ng, E. P. (2014). The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. *Microporous and Mesoporous Materials*, 197, 316–323.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.06.020>
- Muñiz, G., Fierro, V., Celzard, A., Furdin, G., Gonzalez-Sánchez, G., & Ballinas, M. L. (2009). Synthesis, characterization and performance in arsenic removal of iron-doped activated carbons prepared by impregnation with Fe(III) and Fe(II). *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.074>
- Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2016). Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. In *Waste and Biomass Valorization* (Vol. 7, Issue 2, pp. 201–235). Springer.
<https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>
- Ochoa, J. V. (2020). *Obtención de carbón activado mediante carbonización hidrotermal a partir de biomasa residual*.
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22290>
- Onay, O. (2007). Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 88(5), 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.001>
- Parshetti, G. K., Kent Hoekman, S., & Balasubramanian, R. (2013). Chemical, structural and combustion characteristics of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology*, 135, 683–689.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.042>

- Phungo, M. (2020). *Formulation and characterisation of banana rachis derived composites and its application in adsorption of dyes*.
<https://univendspace.univen.ac.za/handle/11602/1657>
- Prado, B. C. (2021). *EL FINANCIAMIENTO Y CRECIMIENTO EMPRESARIAL DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL-PRODUCTORES DE CAFÉ Y CACAO EN LA PROVINCIA DE LEONCIO*.
- Prasannamedha, G., Kumar, P. S., Mehala, R., Sharumitha, T. J., & Surendhar, D. (2021). Enhanced adsorptive removal of sulfamethoxazole from water using biochar derived from hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124825.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124825>
- Présiga-López, D. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revistas.Uis.Edu.Co*.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/11164>
- Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 121–134.
<https://doi.org/10.18273/REVUIN.V20N1-2021011>
- Qu, W., Yuan, T., Yin, G., Xu, S., Zhang, Q., & Su, H. (2019). Effect of properties of activated carbon on malachite green adsorption. *Fuel*, 249, 45–53. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.03.058>
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
- Regmi, P., Garcia Moscoso, J. L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., & Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of Environmental Management*.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.047>
- Retto, P. I. (2019). Potencial energético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos en el Perú. In *Universidad Nacional de Trujillo*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Rillig, M. C., Wagner, M., Salem, M., Antunes, P. M., George, C., Ramke, H. G., Titirici, M. M., & Antonietti, M. (2010). Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Applied Soil Ecology*.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.04.011>
- Rimaycuna Ramírez, J. H. (2020). *Utilización de biocarbón de raquis de banano funcionalizado con nanopartículas de óxido de zinc para el tratamiento de aguas*. Universidad Nacional de Piura.

- Rodriguez Correa, C., Hehr, T., Voglhuber-Slavinsky, A., Rauscher, Y., & Kruse, A. (2019). Pyrolysis vs. hydrothermal carbonization: Understanding the effect of biomass structural components and inorganic compounds on the char properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *140*, 137–147. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.03.007>
- Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C., & Colina-Andrade, G. de J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *17*(4), 453–462. <https://doi.org/10.1016/J.RIIT.2016.11.005>
- Ruiz Perez, K. E. (2019). El biocarbón y su uso en la recuperación de suelos áridos [Universidad Científica del Sur]. In *Universidad Científica del Sur*. <https://doi.org/10.21142/TB.2020.XXXX>
- Salinas, L. P., & Vargas, L. U. Z. Y. (2012). Adsorbentes a Base De Cascarilla Curtiembres Rice Husk-Based Adsorbents in the Removal of Chromium From Tanning Industry Effluents Adsorbentes a Base De Casca De Arroz. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *10*(1), 146–156.
- Sanchez, Y. (2014). *Propuesta de elaboración y comercialización de filtros adsorbentes para aguas contaminadas a partir de la cáscara de la mazorca de cacao como adsorbente en la ciudad de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas.
- Sanchora, P., Pandey, D. K., Kagdada, H. L., Materny, A., & Singh, D. K. (2020). Impact of alkyl chain length and water on the structure and properties of 1-alkyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquids. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *22*(31), 17687–17704. <https://doi.org/10.1039/D0CP01686A>
- Sanjinez Salazar, F. (2019). *Sustentabilidad del agroecosistema del cultivo de arroz (Oryza sativa L.) en Tumbes, Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Sapaico Castañeda, Y. M., Vásquez Reyna, D. M., & Vilcapoma Torres, T. M. (2018). *Planeamiento estratégico para la región Tumbes*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Sarmiento Fadul, M. F. (2021). *Carbón activado en productos de higiene dental* [Universidad de Guayaquil. Facultad Piloto de Odontología]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/56145>
- Selmi, T., Sanchez-Sanchez, A., Gadonneix, P., Jagiello, J., Seffen, M., Sammouda, H., Celzard, A., & Fierro, V. (2018). Tetracycline removal with activated carbons produced by hydrothermal carbonisation of Agave americana fibres and mimosa tannin. *Industrial Crops and Products*, *115*, 146–157. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.02.005>

- Sharma, A., Kyotani, T., & Tomita, A. (2000). Comparison of structural parameters of PF carbon from XRD and HRTEM techniques. *Carbon*, 38(14), 1977–1984. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00045-2)
- Silva, M. C., Spessato, L., Silva, T. L., Lopes, G. K. P., Zanella, H. G., Yokoyama, J. T. C., Cazetta, A. L., & Almeida, V. C. (2021). H₃PO₄-activated carbon fibers of high surface area from banana tree pseudo-stem fibers: Adsorption studies of methylene blue dye in batch and fixed bed systems. *Journal of Molecular Liquids*, 324, 114771. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2020.114771>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. In *Advances in Agronomy* (Vol. 105, Issue 1, pp. 47–82). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Solís-Fuentes, J. A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R. C., & del Carmen Durán-de-Bazúa, M. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 27(1), 36–48.
- Suárez Ramos, D., & Villegas Silva, E. F. (2018). EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DEL CARBÓN OBTENIDO DEL MESOCARPIO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) MODIFICADO POR ULTRASONIDO. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 85(2), 216–230. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i2.79>
- Susanti, R. F., Wiratmadja, R. G. R., Kristianto, H., Arie, A. A., & Nugroho, A. (2022). Synthesis of high surface area activated carbon derived from cocoa pods husk by hydrothermal carbonization and chemical activation using zinc chloride as activating agent. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.042>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. In *Chemosphere* (Vol. 125, pp. 70–85). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Tan, Y. T., Chua, A. S. M., & Ngoh, G. C. (2020). Evaluation on the properties of deep eutectic solvent-extracted lignin for potential aromatic bio-products conversion. *Industrial Crops and Products*, 154, 112729. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112729>
- Tareq, R., Akter, N., & Azam, M. S. (2018). Biochars and biochar composites: Low-cost adsorbents for environmental remediation. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications* (pp. 169–209). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8>
- Tareq, R., Akter, N., & Azam, M. S. (2019). Biochars and Biochar Composites. In *Biochar from Biomass and Waste* (pp. 169–209). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8>

- Tarley, C. R. T., & Arruda, M. A. Z. (2004). Biosorption of heavy metals using rice milling by-products. Characterisation and application for removal of metals from aqueous effluents. *Chemosphere*, *54*(7), 987–995.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.09.001>
- Tchuifon, D. R., Anagho, S. G., Njanja, E., Ghogomu, J. N., Ndifor-Angwafor, N. G., Kamgaing, T., & others. (2014). Equilibrium and kinetic modelling of methyl orange adsorption from aqueous solution using rice husk and egussi peeling. *International Journal of Chemical Sciences*, *12*(3), 741–761.
- Titirici, M.-M., White, R. J., Falco, C., & Sevilla, M. (2012). Black perspectives for a green future: hydrothermal carbons for environment protection and energy storage. *Energy & Environmental Science*, *5*(5), 6796–6822.
- Tran, H. N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H.-P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, *120*, 88–116.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>
- Valverde G., A., Sarria López, B., & Monteagudo Yanes, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia Et Technica*, *13*(37), 255–260.
<https://doi.org/10.22517/23447214.4055>
- Veliz Pérez, A. L. (2021). *Aprovechamiento de la biomasa derivada de los tallos de banano (Musa paradisiaca, L.) y palma africana (Elaeis guineensis, Jacq) en la elaboración de aglomerados para producción de planchas de uso múltiples*. <https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Vidal, M. v, Rodríguez Suarez, A., Barrios, K. M., Ocampo Pérez, J., & Lara, W. B. (2018). Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión. *Scientia et Technica, ISSN 0122-1701, Vol. 23, Nº. 3, 2018, Págs. 411-419, 23*(3), 411–419.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6760221&info=resumen&idioma=SPA>
- Villota, S. M., Lei, H., Villota, E., Qian, M., Lavarias, J., Taylan, V., Agulto, I., Mateo, W., Valentin, M., & Denson, M. (2019). Microwave-Assisted Activation of Waste Cocoa Pod Husk by H₃PO₄ and KOH - Comparative Insight into Textural Properties and Pore Development. *ACS Omega*, *4*(4), 7088–7095.
https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.8B03514/SUPPL_FILE/AO8B03514_SI_001.PDF
- Vyavahare, G., Jadhav, P., Jadhav, J., Patil, R., Aware, C., Patil, D., Gophane, A., Yang, Y.-H., & Gurav, R. (2019). Strategies for crystal violet dye sorption on biochar derived from mango leaves and evaluation of residual dye toxicity. *Journal of Cleaner Production*, *207*, 296–305.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.193>

- Wang, Z. W., Zhu, M. Q., Li, M. F., Wei, Q., & Sun, R. C. (2019). Effects of hydrothermal treatment on enhancing enzymatic hydrolysis of rapeseed straw. *Renewable Energy*, *134*, 446–452.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.11.019>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, *217*, 240–261.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.12.054>
- Wu, J., Yang, J., Huang, G., Xu, C., & Lin, B. (2020). Hydrothermal carbonization synthesis of cassava slag biochar with excellent adsorption performance for Rhodamine B. *Journal of Cleaner Production*, *251*, 119717. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119717>
- Wu, S., Zhang, S., Wang, C., Mu, C., & Huang, X. (2018). High-strength charcoal briquette preparation from hydrothermal pretreated biomass wastes. *Fuel Processing Technology*, *171*, 293–300.
<https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2017.11.025>
- Xie, R., Qu, B., & Hu, K. (2001). Dynamic FTIR studies of thermo-oxidation of expandable graphite-based halogen-free flame retardant LLDPE blends. *Polymer Degradation and Stability*, *72*(2), 313–321.
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00026-X)
- Xing, X., Jiang, W., Li, S., Zhang, X., & Wang, W. (2019a). Preparation and analysis of straw activated carbon synergetic catalyzed by ZnCl₂-H₃PO₄ through hydrothermal carbonization combined with ultrasonic assisted immersion pyrolysis. *Waste Management*, *89*, 64–72.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.04.002>
- Xing, X., Jiang, W., Li, S., Zhang, X., & Wang, W. (2019b). Preparation and analysis of straw activated carbon synergetic catalyzed by ZnCl₂-H₃PO₄ through hydrothermal carbonization combined with ultrasonic assisted immersion pyrolysis. *Waste Management*, *89*, 64–72.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.04.002>
- Xu, R. kou, Xiao, S. cheng, Yuan, J. hua, & Zhao, A. zhen. (2011). Adsorption of methyl violet from aqueous solutions by the biochars derived from crop residues. *Bioresource Technology*, *102*(22), 10293–10298.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.089>
- Yadav, V. K., Gnanamoorthy, G., Cabral-Pinto, M. M. S., Alam, J., Ahamed, M., Gupta, N., Singh, B., Choudhary, N., Inwati, G. K., & Yadav, K. K. (2021). Variations and similarities in structural, chemical, and elemental properties on the ashes derived from the coal due to their combustion in open and controlled manner. *Environmental Science and Pollution Research* *2021* 28:25, *28*(25), 32609–32625.
<https://doi.org/10.1007/S11356-021-12989-5>
- Yargicoglu, E. N., Sadasivam, B. Y., Reddy, K. R., & Spokas, K. (2015). Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars.

Waste Management, 36, 256–268.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.029>

- Yu, L., Falco, C., Weber, J., White, R. J., Howe, J. Y., & Titirici, M.-M. (2012). Carbohydrate-Derived Hydrothermal Carbons: A Thorough Characterization Study. *Langmuir*, 28(33), 12373–12383.
<https://doi.org/10.1021/la3024277>
- Yu, Y., Qiao, N., Wang, D., Zhu, Q., Fu, F., Cao, R., Wang, R., Liu, W., & Xu, B. (2019). Fluffy honeycomb-like activated carbon from popcorn with high surface area and well-developed porosity for ultra-high efficiency adsorption of organic dyes. *Bioresource Technology*, 285, 121340.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121340>
- Zhang, J. (2019). Physical insights into kinetic models of adsorption. *Separation and Purification Technology*, 229, 115832.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115832>
- Zhou, D., Ghosh, S., Zhang, D., Liang, N., Dong, X., Wu, M., & Pan, B. (2016). Role of Ash Content in Biochar for Copper Immobilization. *https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, 33(12), 962–969.
<https://doi.org/10.1089/EES.2016.0042>
- Zhou, F., Bi, H., & Huang, F. (2021). Ultra-large Specific Surface Area Activated Carbon Synthesized from Rice Husk with High Adsorption Capacity for Methylene Blue. *Wuji Cailiao Xuebao/Journal of Inorganic Materials*, 36(8), 893–900. <https://doi.org/10.15541/jim20200632>
- Zhu, X., Li, C., Li, J., Xie, B., Lü, J., & Li, Y. (2018). Thermal treatment of biochar in the air/nitrogen atmosphere for developed mesoporosity and enhanced adsorption to tetracycline. *Bioresource Technology*, 263, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.041>
- Zhu, X., Li, Y., & Wang, X. (2019). Machine learning prediction of biochar yield and carbon contents in biochar based on biomass characteristics and pyrolysis conditions. *Bioresource Technology*, 288, 121527.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121527>

VII. ANEXOS

7.1. Tablas de adsorción de azul de metileno a una dosis de 05 G/L de material adsorbente.

Anexo 1. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Raquis de Banano.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de BC-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	16,2064246	0
2	8,75131509	14,9102191
5	7,56491024	17,2830288
10	6,30665687	19,7995355
15	6,3673862	19,6780768
20	4,18616929	24,0405107
30	4,80398148	22,8048863
60	1,49645445	29,4199404
90	0,45943297	31,4939833
120	0,09374946	32,2253503
180	0,07401498	32,2648193
240	-0,0177296	32,4483084

Anexo 2. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascara de Cacao.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de BC-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,902226	0
2	13,3381641	9,12812382
5	10,3233426	15,1577668
10	12,0469044	11,7106432
15	12,9795016	9,84544879
20	14,7177572	6,36893766
30	15,6605301	4,48339186
60	12,3201552	11,1641416
90	12,3990492	11,0063535
120	12,5036927	10,7970665
180	11,9085035	11,987445

240	12,0512788	11,7018944
-----	------------	------------

Anexo 3. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascarilla de Arroz.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de BC-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	16,8190836	0
2	12,563168	8,51183121
5	11,7204832	10,197201
10	11,0648124	11,5085426
15	12,7600792	8,11800883
20	10,1937994	13,2505686
30	11,4049625	10,8282422
60	9,84708191	13,9440035
90	10,2584925	13,1211823
120	6,64764101	20,3428853
18	8,53229578	16,5735757
240	8,69662956	16,2449082

Anexo 4. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Raquis de Banano sometido a tratamiento hidrotermal.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de BC-TH-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	14,4950002	0
2	8,60589982	11,7782008
5	8,52299218	11,9440161
10	6,82269795	15,3446046
15	5,95355843	17,0828836
20	5,78328785	17,4234248
30	3,28583111	22,4183383
60	0,96091606	27,0681683
90	0,50140944	27,9871816
120	0,12976136	28,7304778
180	-0,30089172	29,5917839
240	-0,10282474	29,19565

Anexo 5. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascara de Cacao sometido a tratamiento hidrotermal.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de BC-TH-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	14,41063	0
2	12,47774	3,865761
5	11,02045	6,780352
10	11,10634	6,608561
15	12,39185	4,037552
20	11,19072	6,439811
30	12,39185	4,037552
60	11,02045	6,780352
90	9,956708	8,907834
120	10,93298	6,955296
180	7,716168	13,38891
240	9,956708	8,907834

Anexo 6. Datos de adsorción de azul de metileno con biocarbón de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento hidrotermal.

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0.5G/L de BC-TH-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	12,3043777	0
2	9,86923649	4,87028244
5	9,95670811	4,6953392
10	11,0204489	2,56785759
15	9,00009697	6,60856148
20	9,95670811	4,6953392
30	8,3527216	7,90331223
60	7,62869656	9,35136231
90	9,86923649	4,87028244
120	9,08756859	6,43361824
180	9,00009697	6,60856148
240	8,26524998	8,07825547

*Anexo 7. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Raquis de Banano.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0.5 g/L de CA-2M-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	18,4945006	0
2	9,10887517	18,7712508
5	12,1707146	12,647572
10	11,5313096	13,9263818
15	10,7827097	15,4235818
20	10,7911167	15,4067678
30	11,3293218	14,3303576
60	8,96581044	19,0573802
90	11,9924499	13,0041014
120	5,96402565	25,0609498
180	9,69321272	17,6025757
240	12,2763486	12,4363039

*Anexo 8. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascara de Cacao.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-2M-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	18,8630113	0
2	11,6974027	14,3312172
5	8,66627422	20,3934741
10	11,9911127	13,7437972
15	11,2555826	15,2148572
20	10,3592347	17,0075531
30	11,818234	14,0895546
60	11,7843967	14,1572291
90	11,5893893	14,5472439
120	11,8430646	14,0398934
180	10,9962653	15,733492
240	11,2560706	15,2138812

*Anexo 9. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascarilla de Arroz.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-2M-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	18,790643	0
2	14,3339797	8,91332659
5	13,2458058	11,0896745
10	15,5092493	6,56278744
15	14,8058084	7,96966929
20	14,336255	8,90877615
30	13,7905929	10,0001002
60	13,8356798	9,90992652
90	13,0920977	11,3970907
120	12,605019	12,371248
180	12,355037	12,871212
240	11,8544368	13,8724125

*Anexo 10. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Raquis de Banano sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-2M-TH-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,1818255	0
2	10,8946866	12,5742778
5	11,6572229	11,0492051
10	11,0096485	12,3443539
15	9,88607468	14,5915015
20	10,3634531	13,6367447
30	4,83479955	24,6940518
60	9,88596244	14,591726
90	9,23704837	15,8895542
120	8,73731883	16,8890133
180	7,5770856	19,2094797
240	5,05358205	24,2564868

*Anexo 11. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascara de Cacao sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-2M-TH-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,4725596	0
2	11,696823	11,5514733
5	12,2878485	10,3694223
10	8,20772633	18,5296666
15	11,2102649	12,5245895
20	11,8852461	11,174627
30	12,2457148	10,4536896
60	11,7333758	11,4783676
90	11,2680044	12,4091105
120	11,5851779	11,7747634
180	11,6379233	11,6692728
240	11,6035614	11,7379964

*Anexo 12. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-2M-TH-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	18,1808147	0
2	14,4696038	7,42242183
5	14,2121873	7,93725486
10	13,874013	8,61360348
15	13,5259519	9,30972569
20	13,2991335	9,76336256
30	13,3160831	9,72946336
60	12,564171	11,2332876
90	12,9359855	10,4896584
120	9,16365406	18,0343213
180	8,71255503	18,9365194
240	9,71564829	16,9303329

*Anexo 13. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
5M de H₃PO₄ de Raquis de Banano.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	18,2551464	0
2	9,74981597	17,0106609
5	8,24286673	20,0245594
10	6,18232353	24,1456458
15	5,56424479	25,3818033
20	5,78545431	24,9393843
30	4,85473139	26,8008301
60	3,38150621	29,7472805
90	2,48634972	31,5375934
120	1,78740284	32,9354872
180	1,2767743	33,9567443
240	0,5865111	35,3372707

*Anexo 14. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
5M de H₃PO₄ de Cascara de Cacao.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	16,8768876	0
2	9,58376203	14,5862512
5	11,0733872	11,6070009
10	10,4089031	12,9359691
15	10,5812187	12,5913378
20	7,63617607	18,4814231
30	7,42075155	18,9122722
60	7,34149875	19,0707778
90	6,32719375	21,0993878
120	5,35245091	23,0488735
180	5,00070143	23,7523724
240	4,13913733	25,4755006

*Anexo 15. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
5M de H₃PO₄ de Cascarilla de Arroz.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	16,9410787	0
2	13,9793269	5,92350372
5	11,1916091	11,4989392
10	13,0531215	7,77591452
15	12,3883152	9,10552702
20	11,5238292	10,834499
30	10,5104714	12,8612147
60	11,0967796	11,6885983
90	9,69217631	14,4978048
120	9,76056062	14,3610362
180	8,90980703	16,0625434
240	7,70468899	18,4727795

*Anexo 16. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
5M de H₃PO₄ de Raquis de Banano sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-TH-RB		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,7255533	0
2	9,93638333	15,57834
5	8,17377296	19,1035607
10	7,23602767	20,9790513
15	5,25537635	24,9403539
20	5,92559961	23,5999074
30	5,63663766	24,1778313
60	4,10331717	27,2444723
90	2,65119584	30,148715
120	2,05511409	31,3408785
180	1,19802095	33,0550647
240	0,86366066	33,7237853

*Anexo 17. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascara de Cacao sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-TH-CC		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,6862196	0
2	12,2930692	10,7863008
5	11,3010826	12,770274
10	10,4546156	14,4632081
15	7,21954238	20,9333545
20	9,83830506	15,6958291
30	8,97944801	17,4135432
60	7,43352935	20,5053806
90	6,57318805	22,2260631
120	6,49485773	22,3827238
180	5,01343342	25,3455724
240	4,28035076	26,8117377

*Anexo 18. Datos de adsorción de azul de metileno con carbón activado
2M de H₃PO₄ de Cascarilla de Arroz sometido a tratamiento
hidrotermal.*

Adsorción de Azul de Metileno con dosis de 0,5 g/L de CA-5M-TH-CA		
Tiempo (min)	Concentración	Adsorción
0	17,8127079	0
2	13,6891929	8,24703013
5	14,4987753	6,62786532
10	14,1201092	7,38519756
15	13,4471017	8,73121249
20	13,8031479	8,01911999
30	13,8220018	7,98141226
60	13,0113488	9,60271821
90	11,5059866	12,6134426
120	10,898519	13,8283778
180	10,7864269	14,0525621
240	10,4716668	14,6820822

7.2. Panel fotográfico



Anexo 19. Recolección de muestras de raquis de banano (a) y cascara de cacao (b).



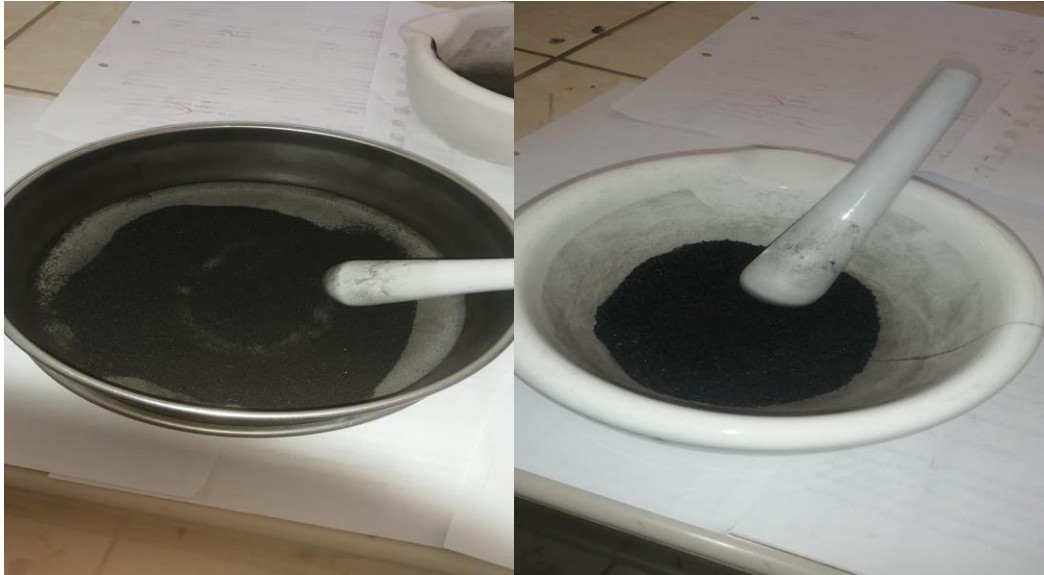
Anexo 20. Secado de muestra post lavado (a) estufa Memmert SNB 400 (b).



Anexo 21. Tamizado de materia prima a un diámetro de 1.5mm.



Anexo 22. Colocación de materia prima en horno tubular a una temperatura de 600°C por un periodo de 2 horas.



Anexo 23. Material obtenido y tamizado.



Anexo 24. Lavado y secado de material obtenido.



Anexo 25. Pesado de materiales para ser sometidos a tratamiento hidrotermal.



Anexo 26. Fase líquida y sólida obtenida después del tratamiento hidrotermal.



Anexo 27. Pesado y secado de material obtenido, para la determinación de su contenido de humedad y porcentaje de cenizas.



Anexo 28. Ajuste de pH en rangos de 3 hasta 10 para posteriormente determinar el pH de carga cero.



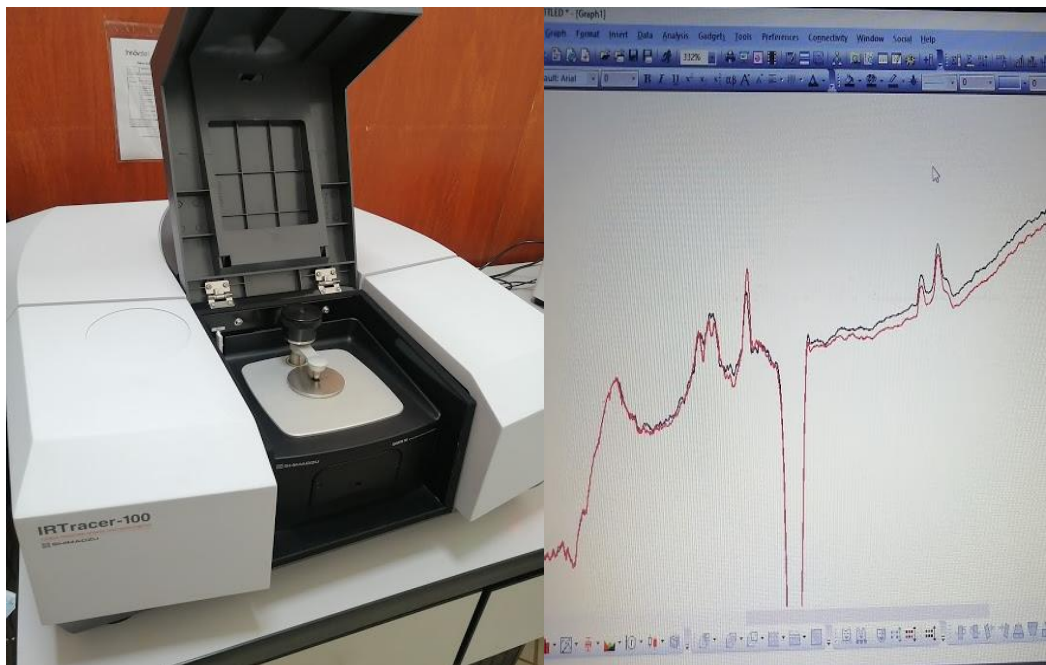
Anexo 29. Analizador de área superficial NOVAtouch LX⁴,



Anexo 30. Cinética de adsorción de azul de metileno 20ppm, con dosis de adsorbente de 0,5 g/L.



Anexo 31. Proceso de filtrado de muestras para realizar lectura en el espectrofotómetro uv-vis.



Anexo 32. Analizador de espectros infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) IRTracer-100.



Anexo 33. Concentración de muestras en fase líquida, para posteriormente realizar su lectura en el analizador de espectros.