

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**Diseño de un Filtro de Carbón Activado para el  
Aprovechamiento del Endocarpio de *Acrocomia* spp (Coyol)  
procedente de la Asociación Agropecuaria de Lajas.**

Informe de Proyecto de Graduación sometido a consideración de la Escuela de  
Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en  
Ingeniería Química.

**Daniel Díaz Rodríguez**

Carné: B52402

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2023



## Tribunal Examinador

---

Proyecto de Graduación sometido a consideración ante la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Sustentante:



Daniel Díaz Rodríguez

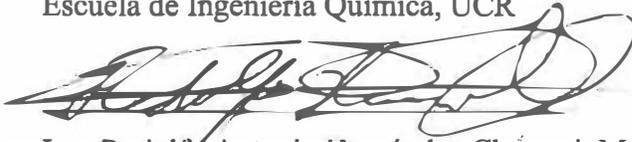
Aprobado por:



Ing. Paula Solano Sánchez, M.Sc

Escuela de Ingeniería Química, UCR

Presidenta del Tribunal



Ing. Rodolfo Antonio Hernández Cháverri, M. Eng.

Cátedra de Ciencias Químicas para Ingenierías, UNED

Director del Proyecto



Ing. Natalia Montero Rambla, Licda.

Escuela de Ingeniería Química, UCR

Asesora del Proyecto



Ing. Sol de María Jiménez González, Licda.

Cátedra de Ciencias Químicas para Ingenierías, UNED

Asesora del Proyecto



Ing. Rene Mora Casal, PhD.

Escuela de Ingeniería Química, UCR

Persona Invitada

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



## **Dedicatoria**

---

Dedico esta tesis a mi madre, Catalina Rodríguez Alfaro, por su incondicional acompañamiento durante toda mi formación educativa, por todos los días en donde mantuvo dos trabajos para permitirme egresarme de los mejores colegios y acceder siempre a la mejor educación. Por todas las noches, en las cuales se sentó a mi lado y me ayudó a formarme como estudiante durante mi etapa de escuela y colegio; para pasar luego a brindarme un abrazo o una taza de café durante mi universidad.

A mi hermano Andrés Díaz, por todos los momentos en los cuales me apoyo tanto en mi formación profesional como en mi formación como persona, en donde su apoyo fue incondicional y persiste.

Y por último a mi abuelo Rafael Rodríguez el cual siempre fue un ejemplo a seguir de la perseverancia y esfuerzo para salir adelante como persona y sobre todo en el ámbito profesional.



## Agradecimientos

---

Le agradezco infinitamente al Universo por las condiciones que me ha facilitado para llegar a la etapa de conclusión de este proyecto y con la emoción por las oportunidades que brindará.

A mi madre y hermano por el apoyo, consejo y acompañamiento incondicional. A mis amigas Kimberly Campos, Lucía Rodríguez, Melissa Arias y Viviana Wittman por tantos años de amistad incondicional, por escucharme, apoyarme, acompañarme y darme siempre ese empujón para seguir adelante.

Al equipo de trabajo de este proyecto, el Ing. Rodolfo Hernández Chaverri, M.Eng por confiar en mí para desarrollar este proyecto y brindarme siempre una respuesta certera ante mis dudas y consejo en los momentos más pesados de este proceso. A la Ing. Natalia Montero por su incontable apoyo, guía y acompañamiento para la realización de este proyecto. A la Ing. Sol Jiménez por su acompañamiento en conocimientos nuevos para mí y disposición inmediata para ayudar.

Al Dr. Maynor Vargas, por su guía en los procedimientos y metodologías de laboratorio, así como su disposición a permitirme realizar partes de la tesis en su laboratorio. A la M.Sc.en Ing. Hazel Aragón, por su anuencia, apoyo y participación en el proceso de tesis. Al Dr. Javier Rodríguez por brindarme siempre una mano en todo el proceso de tesis indistintamente de la hora y del día de la semana.

A M.Sc Eduard Rios, por su guía en los procesos de laboratorio, su apoyo en la revisión de los procedimientos y enseñanzas en el área de química analítica; así como su apoyo incondicional y soporte durante estos dos años de tesis.

Y a M.Sc Melissa Céspedes y M.Sc Rodrigo Mendez mis dos jefaturas las cuales me apoyaron y brindaron el tiempo requerido para la elaboración de la tesis.



## Resumen

---

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar un filtro de carbón activado empleando como materia prima el endocarpio de *Acrocomia* spp el corresponde a un residuo del proceso de la extracción de aceite proveniente de la asociación agropecuaria de Lajas (Agrolajas). Para llevarlo a cabo se procedió con la identificación y caracterización del endocarpio de *Acrocomia*. Los frutos fueron trasladados al Laboratorio de ingeniería donde se limpiaron y se procedió con la caracterización fisicoquímica. Se procedió a la caracterización físico-química en donde se obtuvo como resultados principales que el endocarpio representa un 38.00% del fruto con un valor ( $11.59 \pm 0.75$ ) % de humedad y ( $2.01 \pm 0.28$ ) % de cenizas, adicionalmente se determinó que la muestra de endocarpio y endocarpio-mesocarpio en análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) presenta señales de  $1728.83 \text{ cm}^{-1}$  y  $1026.33 \text{ cm}^{-1}$  los cuales son picos característicos de materiales con celulosa, hemicelulosa y lignina y el contenido elemental fue para endocarpio-mesocarpio tiene porcentajes de C ( $41 \pm 3$ ) %, H ( $6.4 \pm 0.5$ ) %, O ( $41 \pm 2$ ) % y N ( $0.67 \pm 0.07$ ) %; y para el endocarpio se tiene un porcentaje de C ( $42 \pm 3$ ) %, H ( $5.1 \pm 0.7$ ) %, O ( $41 \pm 3$ ) % y N ( $0.4 \pm 0.1$ ) %. Finalizada la caracterización de las muestras se prosiguió con la fabricación del carbón activado para cada muestra de trabajo (endocarpio y endocarpio-mesocarpio), en donde se definió mediante la revisión bibliográfica la razón de impregnación (1/1 m/m), el tiempo de impregnación (24 h) y el tipo de activante ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), y para el caso de la temperatura de carbonización y el tiempo de carbonización se elaboró un diseño de experimentos  $3^2$  en donde se obtuvo como resultado condiciones de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  y 1.5 h, para la temperatura y de tiempo de carbonización, Se realizó la caracterización del carbón activado sintetizado mediante un análisis de superficie BET y se obtuvo que el carbón activado de endocarpio tiene un valor de ( $669 \pm 7$ )  $\text{m}^2/\text{g}$  y el de endocarpio-mesocarpio de ( $683 \pm 6$ )  $\text{m}^2/\text{g}$ . En el caso del FTIR se evidencia la deficiencia de grupos funcionales lo que es consistente con carbones activados. Por último, se procedió con el diseño y construcción del filtro, en donde se obtuvo que el filtro diseñado logra tiene un porcentaje de remoción mayor al 70 % para los primeros 3 ciclos, sin embargo, los valores obtenidos se encuentran por encima del valor reportado por el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales correspondiente a 5 ppm. Por lo tanto, se concluye la biomasa obtenida de endocarpio de

*Acrocomia* spp presenta características que son adecuadas para la producción de carbón activado el cual es funcional para la remoción de azul de metileno y el carbón sintetizado permite además ser empleado en el diseño del filtro. Se recomienda, estandarizar y optimizar la fabricación y diseño del filtro de carbón activado para aumentar la remoción de azul de metileno, adicionalmente, se recomienda emplear los filtros diseñados para algún otro tipo de contaminante o agua residual real, para determinar su eficacia en estas condiciones.

## Índice General

Tribunal Examinador .....	iii
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos .....	vii
Resumen.....	ix
Índice General.....	xi
Índice de Cuadros .....	xv
Índice de Figuras.....	xxiii
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo General .....	3
1.2.2 Objetivo Específicos .....	3
Capítulo 2. Fundamento Teórico .....	5
2.1 Coyol y sus Características .....	5
2.2. Endocarpio de Coyol.....	9
2.3. Carbón Activado .....	10
2.3.1. Activación Física .....	12
2.3.3. Activación Química .....	15
2.4. Adsorción.....	19
2.4.1. Modelo de Langmuir.....	19
2.4.2. Modelo de Freundlich .....	20
2.4.3. Modelo de BET .....	21
2.5. Técnicas de caracterización .....	21
2.5.1. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	21
2.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	22
2.5.3. Análisis Termogravimétrico (TGA) .....	22
2.5.4. Análisis de rayos X de dispersión de energía (EDS) .....	23

2.6. Filtración .....	23
2.6.1. Fenómenos que ocurren en un proceso de filtración.....	24
2.6.1. Filtración de Lecho profundo .....	26
2.6.2. Filtros de Carbón Activado.....	27
2.6.3. Parámetros para el diseño de filtros de carbón activado.....	27
CAPITULO 3. Caracterización Físico-química del Endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp.....	29
3.1 Metodología.....	29
3.1.1 Materiales y Equipos .....	29
3.1.2 Determinación de características morfológicas.....	31
3.1.3 Determinación de materia seca, cenizas y humedad. ....	32
3.1.4 Molienda y determinación de tamaño de partícula. ....	34
3.1.5 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).....	35
3.1.6 Calor de combustión.....	36
3.1.7 Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) ..	36
3.1.8 Análisis termogravimétrico (TGA) .....	36
3.1.9 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS).....	37
3.1.11 Curvas de Secado .....	37
3.2 Resultados y Discusión .....	38
3.2.1 Características morfológicas .....	38
3.2.2 Determinación de materia seca, cenizas y humedad. ....	41
3.3.3 Molienda y determinación de tamaño de partícula. ....	42
3.3.4 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).....	44
CAPITULO 4. Producción de carbón activado a partir de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp .....	57
4.1 Materiales y Métodos .....	57
4.1.1 Materiales y Equipos .....	57

4.2. Producción de carbón.....	57
4.1.1 Fabricación de carbón activado.....	57
4.2.2 Curva de calibración .....	61
4.3. Pruebas de caracterización del carbón activado producido .....	62
4.3.1 Porcentaje de Humedad del carbón activado. ....	62
4.3.2 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	62
4.3.3 Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplado con EDS.....	63
4.3.4 Análisis de área superficial BET.....	63
4.3.5 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS) .....	63
4.4 Resultados y Discusión .....	64
4.4.1 Resultados obtenidos para el estudio de capacidad de adsorción y rendimiento para el carbón activado fabricado. ....	64
4.4.2 Resultados obtenidos de FTIR para los carbones activados producidos .....	75
4.4.3 Resultados obtenidos de la morfología para los carbones activados producidos (SEM).....	76
4.3.4 Análisis de área superficial BET.....	79
4.3.5 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS) .....	82
Capítulo 5. Fabricación y Evaluación del Filtro de carbón activado.....	85
5.1 Metodología para el desarrollo del filtro.....	85
5.1.1 Determinación de variables.....	85
5.1.2 Diseño del filtro .....	87
5.1.3 Evaluación del filtro.....	92
5.2 Análisis de Resultados .....	95

5.2.1 Resultados obtenidos para el tamaño de partícula.....	95
5.2.2 Resultados obtenidos para la determinación de densidad. ....	96
5.2.3 Resultados obtenidos para la isoterma de adsorción .....	96
5.2.3 Resultados obtenidos para los parámetros de diseño. ....	97
5.2.4 Resultados obtenidos para el diseño de AUTOCAD. ....	98
5.2.5 Resultados obtenidos para la configuración de filtro .....	102
5.2.6 Resultados para la evaluación de los filtros. ....	104
Conclusiones y Recomendaciones .....	107
6.1 Conclusiones .....	107
6.2 Recomendaciones .....	108
Bibliografía.....	109
Nomenclatura .....	125
Apéndices .....	127
Apéndice A. Datos Experimentales.....	127
Apéndice B. Datos Intermedios.....	149
Apéndice C. Muestra de Cálculo.....	173
Apéndice D. Matrices de condiciones para fabricación de carbón activado empleando activación física .....	179
Apéndice E. Matrices de condiciones para fabricación de carbón activado empleando activación química .....	185
Apéndice F Análisis de Varianza de Minitab.....	193
Apéndice G. Planos referentes al diseño de los filtros de carbón activado...	197

## Índice de Cuadros

---

<b>Cuadro 2.1.</b> Perfil lipídico obtenido para el coyol brasileño para las fracciones de epicarpio, mesocarpio y endosperma.....	7
<b>Cuadro 2.2.</b> Potencial calorífico para las fracciones de epicarpio, mesocarpio y endocarpio para la <i>Acrocomia</i> brasileña (César et al., 2015) .....	7
<b>Cuadro 2.3.</b> Usos para las diferentes fracciones de la <i>Acrocomia</i> (Ciconini, 2012) .....	8
<b>Cuadro 2.4.</b> Características del endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp proveniente de Brasil. (J. D. C. E. Silva et al., 1986) .....	9
<b>Cuadro 2.5.</b> Características físicas y químicas presentes en el endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp, estudiado por (Barbosa Evaristo et al., 2016). .....	9
<b>Cuadro 2.6.</b> Condiciones de fabricación de carbón activado mediante activación física para diferentes tipos de biomosas. ....	14
<b>Cuadro 2.7.</b> Condiciones de fabricación de carbón activado mediante activación química para diferentes tipos de biomosas. ....	17
<b>Cuadro 3.1.</b> Tamices empleados para la determinación de tamaño de partícula del endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp. ....	35
<b>Cuadro 3.2</b> Diámetro longitudinal y transversal para los frutos de <i>Acrocomia</i> spp.....	38
<b>Cuadro 3.3.</b> <i>Peso promedio, volumen y densidad para las muestras empleadas de frutos de Acrocomia spp</i> .....	39
<b>Cuadro 3.4</b> Fraccionamiento del fruto de <i>Acrocomia</i> spp determinando su peso promedio y el porcentaje de fracción .....	39
<b>Cuadro 3.5</b> Fraccionamiento del fruto de <i>Acrocomia</i> spp para diferentes zonas geográficas .....	40
<b>Cuadro 3.6.</b> Porcentaje de humedad, materia seca y cenizas para las diferentes fracciones de <i>Acrocomia</i> spp obtenidos en esta investigación.....	41
<b>Cuadro 3.7.</b> Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula del mezcla (endocarpio- mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp. ....	42
<b>Cuadro 3.8.</b> Calores de combustión obtenidos para las fracciones analizadas del fruto de <i>Acrocomia</i> spp .....	46

<b>Cuadro 3.9.</b> Resultados de análisis elemental realizado para dos tipos de biomasas, de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp y endocarpio con remanente de mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	52
<b>Cuadro 4.1</b> Factores y niveles a estudiar en el factorial $2^2$ y el punto central estudiado .....	59
<b>Cuadro 4.2</b> Resultados obtenidos de rendimiento, porcentaje de remoción y mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado para los carbones activados fabricados a partir de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	64
<b>Cuadro 4.3</b> Resultados para el análisis de varianza obtenido para el diseño factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por grama de carbón activado.....	65
<b>Cuadro 4.4</b> Determinación de los mg de azul de metileno adsorbidos por g de carbón activado para el análisis de varianza realizado.....	68
<b>Cuadro 4.5</b> Resultados obtenidos de rendimiento, porcentaje de remoción y mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado para los carbones activados fabricados a partir de mezcla (endocarpio -mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp. ....	70
<b>Cuadro 4.6</b> Resultados para el análisis de varianza obtenido para el factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado. ....	70
<b>Cuadro 4.7</b> Determinación de los mg de azul de metileno adsorbidos por g de carbón activado para el análisis de varianza realizado a la muestra de endocarpio - mesocarpio. ....	73
<b>Cuadro 4.8</b> Carbón sintetizado a las condiciones favorables de fabricación seleccionadas a partir del diseño factorial realizado. ....	74
<b>Cuadro 4.9.</b> Resultados de análisis elemental realizado para dos tipos de biomasas, de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp y endocarpio - mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	83
<b>Cuadro 5.1</b> Factores y niveles a estudiar en el factorial $2^2$ .....	93
<b>Cuadro 5.2.</b> Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula del carbón activado de endocarpio y endocarpio - mesocarpio. ....	95
<b>Cuadro 5.3</b> Resultados obtenidos para la densidad de los carbones activados sintetizados. ....	96

<b>Cuadro 5.4</b> Parámetros calculados para el desarrollo y construcción de un filtro de carbón activado empleando endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp.....	98
<b>Cuadro 5.5.</b> Resultados obtenidos para la el Qf de cada filtro evaluado en el diseño de factorial. ....	102
<b>Cuadro 5.6.</b> Resultados para el análisis de varianza obtenido para el factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por grama de carbón activado.....	102
<b>Cuadro 5.7.</b> Resultados obtenidos para los parámetros de operación de los filtros construidos .....	104
<b>Cuadro 5.8.</b> Resultados obtenidos para los ciclos de reutilización del filtro de carbón activado.....	105
<b>Cuadro A1.</b> Datos experimentales correspondientes al diámetro longitudinal y transversal para el fruto de <i>Acrocomia</i> spp.....	127
<b>Cuadro A2.</b> Datos experimentales correspondientes al peso del fruto de <i>Acrocomia</i> spp. ....	129
<b>Cuadro A3.</b> Datos experimentales correspondientes al fraccionamiento del fruto de <i>Acrocomia</i> spp. ....	130
<b>Cuadro A4.</b> Datos experimentales correspondientes a la determinación de cenizas para las fracciones del fruto de <i>Acrocomia</i> spp. ....	132
<b>Cuadro A5.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 1 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	133
<b>Cuadro A6.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 2 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	133
<b>Cuadro A7.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 3 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	134
<b>Cuadro A8.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 1 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	134
<b>Cuadro A9.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 2 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	135
<b>Cuadro A10.</b> Datos experimentales correspondientes a la corrida 3 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	135

<b>Cuadro A11.</b> Datos experimentales correspondientes para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de carbón activado de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	136
<b>Cuadro A12.</b> Datos experimentales correspondientes para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	136
<b>Cuadro A13.</b> Datos experimentales correspondientes para la isoterma de adsorción de azul de metileno elaborada a diferente concentraciones. ....	137
<b>Cuadro A14.</b> Datos experimentales correspondientes para la curva de calibración de azul de metileno a 675 nm. ....	138
<b>Cuadro A15.</b> Datos experimentales correspondientes para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	138
<b>Cuadro A16.</b> Datos experimentales correspondientes para la curva de secado del endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	139
<b>Cuadro A17.</b> Datos experimentales correspondientes para la curva de adsorción BET para el carbón activado de endocarpio-mesocarpio. ....	140
<b>Cuadro A18.</b> Datos experimentales correspondientes para la curva de adsorción BET para el carbón activado de endocarpio. ....	141
<b>Cuadro A19.</b> Datos experimentales correspondientes al diseño de los filtros de carbón activado. ....	142
<b>Cuadro A20.</b> Datos experimentales correspondientes al número de ciclos de reutilización del filtro para el filtro de carbón activado de endocarpio-mesocarpio. ....	143
<b>Cuadro A21.</b> Datos experimentales correspondientes al número de ciclos de reutilización del filtro para el filtro de carbón activado de endocarpio-mesocarpio. ....	143
<b>Cuadro A22.</b> Datos experimentales correspondientes a la fabricación de carbón activado a las condiciones de 500 °C y 1.5 h. ....	143
<b>Cuadro A23.</b> Datos experimentales correspondientes a las concentraciones finales obtenidas posterior a la adsorción de azul de metileno para los filtros del diseño experimental. ....	144
<b>Cuadro A24.</b> Datos experimentales correspondientes al diseño factorial empleado para la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	145
<b>Cuadro A25.</b> Datos experimentales correspondientes al diseño factorial empleado para la muestra de endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	145

<b>Cuadro A26.</b> Datos experimentales correspondientes al porcentaje de humedad del carbón activado. ....	146
<b>Cuadro A27.</b> Datos experimentales correspondientes al porcentaje de humedad de las fracciones de <i>Acrocomia</i> spp .....	147
<b>Cuadro B1.</b> Resultados obtenidos para el diámetro promedio longitudinal y transversal del fruto de <i>Acrocomia</i> spp.....	149
<b>Cuadro B2.</b> Resultados obtenidos para el volumen, peso y densidad de los frutos de <i>Acrocomia</i> spp .....	149
<b>Cuadro B3.</b> Resultados obtenidos el peso fresco de cada parte del fruto de <i>Acrocomia</i> spp.....	150
<b>Cuadro B4.</b> Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad del carbón activado sintetizado y comercial. ....	151
<b>Cuadro B5.</b> Resultados obtenidos para la corrida 1 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio. ....	151
<b>Cuadro B6.</b> Resultados obtenidos para la corrida 2 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio. ....	151
<b>Cuadro B7.</b> Resultados obtenidos para la corrida 3 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio. ....	152
<b>Cuadro B8.</b> Promedio de los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio. ....	152
<b>Cuadro B9.</b> Resultados obtenidos para la corrida 1 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.....	152
<b>Cuadro B10.</b> Resultados obtenidos para la corrida 2 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.....	153
<b>Cuadro B11.</b> Resultados obtenidos para la corrida 3 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.....	153
<b>Cuadro B12.</b> Promedio de los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.....	153
<b>Cuadro B13.</b> Resultados obtenidos para el porcentaje de cenizas para las fracciones del fruto de <i>Acrocomia</i> spp.....	154
<b>Cuadro B14.</b> Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio. ....	155

<b>Cuadro B15.</b> Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de carbón activado de endocarpio. ....	155
<b>Cuadro B16.</b> Resultados obtenidos para las isotermas de adsorción de azul de metileno empleando carbón activado sintetizado a 500 °C y 1.5 h.....	156
<b>Cuadro B17.</b> Resultados obtenidos para la adsorción de azul de metileno por g de carbón activado para los carbones sintetizados.....	156
<b>Cuadro B18.</b> Resultados obtenidos para las variables de diseño obtenidas para los filtros .....	158
<b>Cuadro B19.</b> Resultados obtenidos para las densidades de los carbones activados sintetizados .....	159
<b>Cuadro B20.</b> Resultados obtenidos para los ciclos de reutilización del filtro con mejores capacidad de remoción de mg de azul de metileno por g de carbón activado. ....	159
<b>Cuadro B21.</b> Resultados para la adsorción de azul de metileno para los filtros de carbón activado. ....	160
<b>Cuadro B22.</b> Resultados para la curva de secado del endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp..	161
<b>Cuadro B23.</b> Resultados para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp.....	164
<b>Cuadro B24.</b> Resultados obtenidos para el análisis de varianza de la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio .....	167
<b>Cuadro B25.</b> Resultados obtenidos para el análisis de varianza de la muestra de carbón activado de endocarpio.....	168
<b>Cuadro B26.</b> Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad de las fracciones.	169
<b>Cuadro B27.</b> Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp producido como carbón activado. ....	170
<b>Cuadro B28.</b> Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a endocarpio-mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp producido como carbón activado. ....	171
<b>Cuadro B29.</b> Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a los filtros de carbón activado .....	172
<b>Cuadro B30.</b> Resultados obtenidos para los filtros de carbón activado.....	172
<b>Cuadro D1.</b> Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación física .....	180

<b>Cuadro E1.</b> Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.....	186
--	-----



## Índice de Figuras

---

<b>Figura 2.1.</b> Fracciones que componen el fruto de <i>Acrocomia</i> spp. A: Epicarpio. B: Mesocarpio. C: Endocarpio. D: Endosperma. ....	6
<b>Figura 2.2.</b> Rutas de aprovechamiento de las diferentes fracciones que componen a la <i>Acrocomia</i> spp. Adaptado de (César et al., 2015). ....	8
<b>Figura 2.3.</b> Estructura del: A) Grafito, B) Carbón Activado (González Navarrete, 2017) .....	10
<b>Figura 2.4.</b> Esquema de posibles grupos funcionales presentes en el carbón activado Fuente: (Sevilla, 2011).....	11
<b>Figura 2.5.</b> Fenómenos que ocurren en la filtración Adaptado de: (Sparks & Chase, 2016). ....	25
<b>Figura 3.1</b> Muestras empleadas para la caracterización. A) Mezcla (Endocarpio-Mesocarpio). B) Endocarpio.....	30
<b>Figura 3.2</b> Diagrama para la medición de diámetros de fruta de <i>Acrocomia</i> spp.....	31
<b>Figura 3.3</b> Secciones obtenidas del fruto de <i>Acrocomia</i> spp al realizar el fraccionamiento. A) Epicarpio (Cáscara) B) Mesocarpio (Pulpa) C) Endocarpio (Carrozo) D) Endosperma (Semilla).....	32
<b>Figura 3.4.</b> Ejemplificación del proceso de determinación de materia seca y cenizas A) biomásas posteriores al proceso de determinación de materia seca B) biomásas luego del proceso de calcinación. ....	34
<b>Figura 3.5.</b> Muestras molidas. A) Endocarpio B) Mezcla (Endocarpio-mesocarpio). ..	34
<b>Figura 3.6.</b> Distribución de tamaño de partícula para las muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> . A) Fracción acumulada de endocarpio para diferentes aberturas de tamiz. B) Fracción acumulada de mezcla (endocarpio-mesocarpio) para diferentes aberturas de tamiz. ....	43
<b>Figura 3.7.</b> Espectro infrarrojo con transformada de Fourier para las biomásas de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp y mezcla (endocarpio – mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp. (Fuente: Omnic <sup>TM</sup> Specta Software).....	45
<b>Figura 3.8</b> Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de mezcla (endocarpio-mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp.....	48

<b>Figura 3.9</b> Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	49
Al realizar la comparación entre ambas estructuras se denota que el endocarpio posee una superficie más amplia y presencia de poros que la mezcla, lo que se traduce en que la muestra de estudio de endocarpio limpio posee una superficie más adecuada para el desarrollo de poros más definidos para la adsorción.....	49
<b>Figura 3.10</b> Diagrama termogravimétrico para la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	50
<b>Figura 3.11</b> Diagrama termogravimétrico para la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp. ....	51
<b>Figura 3.12</b> Curva de secado para la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	53
<b>Figura 3.13</b> Rapidez de secado para la muestra de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	54
<b>Figura 3.14</b> Curvade secado para la muestra mezcla (de endocarpio – mesocarpio) <i>Acrocomia</i> spp. ....	55
<b>Figura 3.15</b> Rapidez de secado para la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio) <i>Acrocomia</i> spp. ....	55
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de proceso de fabricación de carbón activado de <i>Acrocomia</i> spp	61
<b>Figura 4.2</b> Gráfica de efectos principales para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado. ....	66
<b>Figura 4.3</b> Gráfica de interacciones para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.....	67
<b>Figura 4.4</b> Gráfica de normalidad para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de endocarpio de <i>Acrocomia</i> .....	68
<b>Figura 4.5</b> Gráfica de supuestos de normalidad, independencia y varianza constante para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de endocarpio de <i>Acrocomia</i> .....	69
<b>Figura 4.6</b> Gráfica de efectos principales para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado. ....	71
<b>Figura 4.7</b> Gráfica de normalidad para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp .....	72

<b>Figura 4.8</b> Gráfica de supuestos de normalidad, independencia y varianza constante para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de <i>Acrocomia</i> spp.....	73
<b>Figura 4.9</b> Espectro infrarrojo con Transformada de Fourier para las muestras de carbón activado sintetizado a partir de endocarpio, mezcla (endocarpio-mesocarpio) y carbón activado comercial. ....	75
<b>Figura 4.10</b> Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de carbón sintetizado de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	77
<b>Figura 4.12</b> Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de carbón sintetizado de endocarpio - mesocarpio. ....	78
<b>Figura 4.13</b> EDS realizado a cristales presentes en el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio - mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	79
<b>Figura 4.14</b> Isotherma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	80
<b>Figura 4.15</b> Linealización mediante modelo BET de la isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp. ....	80
<b>Figura 4.16</b> Isotherma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio con remanente de mesocarpio de <i>Acrocomia</i> spp.....	81
<b>Figura 4.17</b> Linealización mediante modelo BET de la isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio con remanente de <i>Acrocomia</i> spp. ....	82
<b>Figura 5.1.</b> Diseño de soporte del medio filtrante empleado para el corte láser. ....	90
<b>Figura 5.2.</b> Diseño de piezas en AutoCAD para el filtro de carbón activado.....	90
<b>Figura 5.3.</b> Tubo de 10 cm de acrílico con soporte ensamblado. A) Tubo de acrílico B) Soporte del medio filtrante C) Modelo ensamblado. ....	91
<b>Figura 5.4.</b> Construcción del filtro de carbón activado. A) Tubo con soporte inferior y medios filtrantes. B) Tubo con soporte y acoples. C) Filtro finalizado.....	92
<b>Figura 5.5.</b> Sistema para evaluación de la capacidad de adsorción de los filtros diseñados. ....	94

<b>Figura 5.6.</b> Isoterma de Freundlich para la adsorción de azul de metileno mediante el uso de carbón activado sintetizado a 500 °C y 1.5 h. ....	97
<b>Figura 5.7.</b> Isométrico y vistas para el soporte del filtro. ....	99
<b>Figura 5.8.</b> Isométrico y vistas para el acople del filtro. ....	100
<b>Figura 5.9.</b> Isométrico y vistas para el tubo del filtro. ....	101
<b>Figura 5.10.</b> Isométrico para el filtro. ....	101
<b>Figura 5.8.</b> Gráfica de efectos principales para la maximizar la variable $Q_f$ en el análisis de experimentos correspondiente a los filtros de carbón activado. ....	103
<b>Figura 5.9.</b> Supuestos del modelo para el análisis de varianza correspondiente a los datos de adsorción de azul de metileno para los filtros. ....	104
<b>Figura F1.</b> Análisis de varianza para los filtros de diseñados de carbón activado. ....	193
<b>Figura F2.</b> Ecuación general del modelo para los filtros diseñados ....	193
<b>Figura F3.</b> Análisis de varianza para la muestra producida de carbón activado de endocarpio-mesocarpio ....	194
<b>Figura F4.</b> Ecuación general del modelo para la muestra producida de carbón activado de endocarpio-mesocarpio. ....	194
<b>Figura F5.</b> Resultados obtenidos para la deseabilidad del carbón activado de endocarpio-mesocarpio ....	194
<b>Figura F6.</b> Análisis de varianza para la muestra producida de carbón activado de endocarpio. ....	195
<b>Figura F7.</b> Ecuación general del modelo para la muestra producida de carbón activado de endocarpio. ....	195
<b>Figura F8.</b> Resultados obtenidos para la deseabilidad del carbón activado de endocarpio ....	195

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Introducción

Acorde con el Vigésimo Quinto Informe del Estado de la Nación, en Costa Rica se han incrementado los niveles de desigualdad social, los índices de pobreza y la asimetría territorial, todo lo cual tiene su origen en las altas tasas de desempleo (Consejo Nacional de Rectores [CONARE], 2019). Específicamente, esta problemática se refleja en la Región Chorotega, la cual se ubica al noreste del país y en donde se reflejó aumento en los índices de pobreza, de un 22.4 % a un 26 % para los años (2017-2018) (Consejo Nacional de Rectores, 2019) para posteriormente, tener una baja de 5.7 puntos porcentuales para el año 2019. Lamentablemente para el año 2020, los índices se elevan a un 31.7% (Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica [INEC], 2020). Esta situación provocó una desaceleración socioeconómica y un aumento en los índices de desempleo a 29.8 % para la región (INEC, 2020) causando un impacto en las actividades de la zona, que corresponden principalmente a turismo, actividades comerciales cantonales, actividades agrícolas y ganaderas, e industriales (Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica, 2020) causando un impacto en las actividades de la zona, que corresponden principalmente a turismo, actividades comerciales cantonales, actividades agrícolas y ganaderas, e industriales. Además, el informe del Programa del Estado de la Nación (2019) reveló que la Región Chorotega muestra capacidad para aumentar su actividad industrial (CONARE, 2020). Dado esto, es necesario buscar la reactivación económica de la región que permita disminuir la brecha social y, por consiguiente, se evalúan propuestas de productos que pueden cumplir con los requerimientos del mercado.

El coyol (*Acrocomia* spp) es una planta que se encuentra a lo largo del territorio nacional y, mayoritariamente, en zonas con climas tropical seco y tropical muy seco. Entre sus características podemos mencionar: contenido de ácidos grasos similar al proporcionado por la palma africana (Teixeira et al., 2017), facilidad para crecer de manera natural en el territorio costarricense, sin la intervención de agroquímicos y su alta adaptabilidad a diferentes ecosistemas, lo que permite que resista condiciones de sequías prolongadas o terrenos con baja fertilidad (de Lima et al., 2018). Dado lo anterior, cabe considerarlo como un excelente producto para cultivar en la región Chorotega,

colocándolo como un recurso sostenible para Costa Rica (Lieb et al., 2019). Entre los usos asociados en el territorio nacional se encuentra la producción de vino y alimento para cerdo; entre los usos internacionales, está la producción de aceite de consumo, cosméticos y producción de biomasa (Molina González, 2017).

Debido a las situaciones expuestas anteriormente, se pretende desarrollar en conjunto con la Asociación Agropecuaria de Lajas, el aprovechamiento del endocarpio de *Acrocomia* spp el cual corresponde a una fracción no aprovechable; esto mediante la revalorización. La estrategia de trabajo conllevó al estudio de las características físicas y químicas del endocarpio del coyol, con el fin de brindar opciones de aprovechamiento de dicha fracción y determinar su utilidad como carbón activado, para así poder emplearlo en el diseño de un filtro. Esta metodología está interrelacionada con un modelo de economía circular, el cual busca aprovechar las corrientes de materias primas y reducir la de los desechos de los procesos industriales. Todo esto se realizó con la intención de valorizar el endocarpio del coyol como un subproducto de la extracción del aceite, que permite la purificación de contaminantes presentes en el agua o en otros usos, lo cual beneficiará a las familias involucradas en el cultivo, cosecha y producción, y ayudará como una iniciativa para incrementar las posibilidades de manufactura en la Asociación Agropecuaria de Lajas. Esta iniciativa de procesar el coyol se encuentra fundamentada mediante el Decreto °N41879-MINAR, el cual promueve la explotación del coyol para la producción de biodiesel, con el objetivo de reducir la dependencia en los hidrocarburos derivados del petróleo y cumplir con las metas del Plan de Energía 2015-2030 (Declaratoria de Interés Público El Aprovechamiento del Coyol (*Acrocomia*) en La producción de biodiesel., 2019)

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo General***

Diseñar un filtro con carbón activado para el aprovechamiento del endocarpio de *Acrocomia* spp (Coyol) procedente de la Asociación Agropecuaria de Lajas

### ***1.2.2 Objetivo Específicos***

1. Caracterizar el endocarpio de la *Acrocomia* spp (Coyol) en la producción de carbón activado
2. Producir carbón activado a partir del endocarpio de la *Acrocomia* spp (Coyol).
3. Desarrollar dos filtros que utilicen carbón activado producido con endocarpio de *Acrocomia* spp (Coyol)
4. Establecer la funcionalidad de los filtros bajo condiciones de laboratorio en la remoción de azul de metileno



## Capítulo 2. Fundamento Teórico

---

Debido al aumento de contaminantes en aguas y el incremento de los desechos agroindustriales, es necesario encontrar formas de solventar estas problemáticas, por lo que la presente investigación propone como vía de mejora el uso de estos desechos agroindustriales; específicamente el de *Acrocomia* spp para la producción de carbón activado y posterior fabricación de filtros para el tratamiento de aguas contaminadas. Por lo que, a continuación, se presentan generalidades sobre la *Acrocomia* y sus fracciones, así como el fundamento sobre la fabricación de los filtros.

### 2.1 Coyol y sus Características

La *Acrocomia* spp (*Coyol*) es una palmera que se localiza en la vertiente del Pacífico (Zamora et al., 1999) específicamente en zonas como la región Chorotega (Guanacaste), región Pacífico Central, además, puede encontrarse en zonas como Región Brunca, Huetar Norte y en menor medida en zonas de la Región Central. La *Acrocomia* pertenece a la familia de las *Arecaceae* Shultz (Palmea), la cual es nativa principalmente de zonas tropicales, Centroamérica posee cerca de 150 especies con 25 géneros, de las cuales radica en importancia la *Acrocomia* con sus tres principales especies: la *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., *Acrocomia intumescens* Drude y *Acrocomia totai*. Mart (González, 2007).

Estos tipos tienen la cualidad de resistir períodos prolongados de sequías y soportar la deficiencia de nutrientes de sus sustratos. Adicionalmente presenta la característica de fomentar la regeneración de los terrenos áridos aumentando la productividad de otro tipo de cultivos cercanos (Alfaro-Solís et al., 2020). Son plantas hermafroditas (monoicas) espinosas con tallos solitarios y alturas entre los 30 cm a 15 m (Lima et al., 2018)

Su fruto se caracteriza por ser una drupa (fruto carnoso de forma redondeada que tiene en su interior una única semilla envuelta en una capa leñosa dura o hueso), con un diámetro promedio entre los 3.0 cm y los 5.0 cm. Además, el peso promedio del fruto es de 40 g (Hernández Zardón, 2016), el cual está compuesto de 4 fracciones: epicarpio,

mesocarpio, endocarpio y endosperma (semilla). En la figura 2.1 se muestra el fraccionamiento del fruto.



**Figura 2.1.** Fracciones que componen el fruto de *Acrocomia* spp. A: Epicarpio. B: Mesocarpio. C: Endocarpio. D: Endosperma.

El epicarpio de la *Acrocomia* es delgado, duro y fibroso, de un color marrón al estar madura (Hernández Zardón, 2016), el mesocarpio se caracteriza por ser dulce, fibroso y mucilaginoso con varios tipos de coloraciones (Colombo et al., 2018).

Con respecto a los porcentajes que representan las diferentes fracciones, varios autores de las regiones de Brasil y Paraguay han identificado, que depende de las condiciones climatológicas, condiciones de cosecha y cultivo, tipo de especie y características del terreno (Alfaro-Solís et al., 2020a). Por ejemplo, en peso fresco para las frutas brasileñas el epicarpio (cáscara), corresponde a un 30.5 % del fruto total y tiene un porcentaje de aceite del 3.3 %; el mesocarpio (pulpa) un 27.5 % masa y 19.2 % de aceite; el endocarpio (carozo) 34.7 % masa; y por último el endosperma con un 7.3 % masa y un 3.4 % aceite (Hernández Zardón, 2016). Por otro lado, Rodríguez Bonet et al. (2020), reportan porcentajes en peso fresco de 18.70 % para el epicarpio, 43.90 % para el mesocarpio, 27.27 % para el endocarpio y 10.13 % para el endosperma para la región de Cuba.

En el caso del perfil lipídico, no se puede especificar un único perfil ya que depende de las condiciones antes mencionadas, En el caso del coyol brasileño en el cuadro 2.1 se observa el perfil lipídico propuesto por dos autores César et al. (2015) y Hernández

Zardón (2016) en las regiones de Brasil y Cuba los cuales evidencian el porcentaje de aceite para las fracciones de epicarpio, mesocarpio y endosperma.

**Cuadro 2.1.** Perfil lipídico obtenido para el coyol brasileño para las fracciones de epicarpio, mesocarpio y endosperma.

Ácidos grasos analizados	Porcentaje de aceite en la cáscara (epicarpio) / (%)	Porcentaje de aceite en la pulpa (mesocarpio) / (%)	Porcentaje de aceite en la almendra (endosperma) / (%)	Porcentaje de aceite en la pulpa (mesocarpio) / (%)	Porcentaje de aceite en la almendra (endosperma) / (%)
	Hernández Zardón (2016)			César et al. (2015)	
Referencia					
Caprílico 8	-	-	4.9	-	6.2
Cáprico 10	-	-	42	-	5.3
Laurico 12	-	-	58.6	-	43.6
Mirístico 14	-	-	8.0	-	8.5
Palmítico 16	20.8	17.5	4.7	18.7	5.3
Palmitoleico 16:1	3.8	2.3	-	4.0	-
Esteárico 18	2.4	2.7	4.2	2.8	2.4
Oléico 18:1	62.5	65.9	12.8	53.4	25.5
Linoléico 18:2	10.5	11.6	2.6	17.7	3.3

Además, entre otras características que presenta el fruto se tiene su potencial calorífico, para las fracciones de endocarpio, epicarpio y mesocarpio de la *Acrocomia*, como se muestra en el cuadro 2.2.

**Cuadro 2.2.** Potencial calorífico para las fracciones de epicarpio, mesocarpio y endocarpio para la *Acrocomia* brasileña (César et al., 2015)

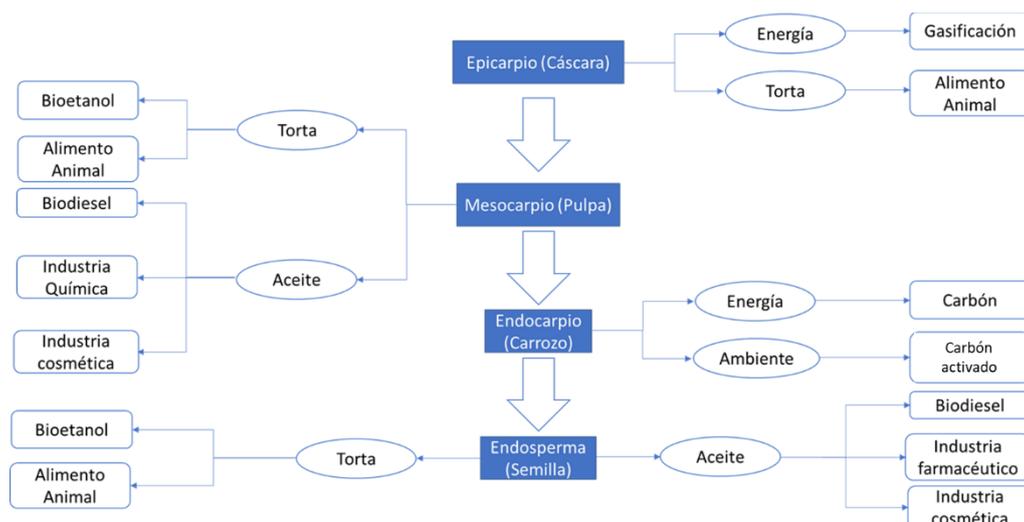
Fracción	Poder calorífico
Epicarpio	4 378 kcal/kg
Mesocarpio	3 785 kcal/kg
Endocarpio	4 379 kcal/kg

Las características antes mencionadas y las diferentes fracciones que se obtienen del fruto le permiten ser aprovechado en múltiples usos, algunos de los cuales se mencionan a continuación en el cuadro 2.3

**Cuadro 2.3.** Usos para las diferentes fracciones de la *Acrocomia* (Ciconini, 2012)

Fracción	Categoría de Uso	Finalidad
Mesocarpio	Medicinal	Fortificante
Mesocarpio	Alimento	Fruta, dulces, helados, mermelada, alimento animal y harina
Aceite de Mesocarpio	Alimento	Licor, aceite de cocina
Aceite de Mesocarpio	Cosmético	Humectante para el cabello
Aceite de Mesocarpio	Energético	Biocombustible
Endocarpio	Energético	Carbón o Biomasa
Endocarpio	Limpieza de Agua Residuales	Carbón Activado
Endosperma	Comida	Coco de consumo humano
Aceite Endosperma	Energético	Biodiesel
Aceite Endosperma	Comida	Aceite de cocina
Aceite Endosperma	Cosmético	Humectante para el cabello

A partir de lo anterior, César et al. (2015) propone varias rutas de aprovechamiento de la *Acrocomia* spp, las cuales se muestran en la figura 2.2, vale la pena resaltar el aprovechamiento del endocarpio de *Acrocomia* spp para la producción de carbón, en el cual se centra el proyecto.



**Figura 2.2.** Rutas de aprovechamiento de las diferentes fracciones que componen a la *Acrocomia* spp. Adaptado de (César et al., 2015).

Con base en las rutas de aprovechamiento mencionadas en la figura 2.2, se procede a mencionar las características que presenta el endocarpio de *Acrocomia* spp y por las cuales se considera apta para su explotación y producción en carbón.

## 2.2. Endocarpio de Coyol

Como se mencionó anteriormente, el endocarpio de coyol para frutos brasileños representa aproximadamente un 34.7 % del fruto total en base húmeda; para el caso de frutos costarricenses este porcentaje del fruto fresco difiere y presenta valores de 22.0 % para los coyoles presentes en el Coyol de Alajuela, 22.1 % para los coyoles de la zona de La Garita y 17.4 % para los de la Palma (Alfaro-Solís et al., 2020).

Por otro lado, autores como (Silva et al., 1986) indican que el endocarpio de coyol brasileño presenta las siguientes características que se muestran en el cuadro 2.4.

**Cuadro 2.4.** Características del endocarpio de *Acrocomia* spp proveniente de Brasil. (J. D. C. E. Silva et al., 1986)

Componente	Valor
Lignina	36.60 %
Cenizas	0.97 %
Extractos	10.80 %
Holocelulosa	52.60 %
Densidad	1.16 g/cm <sup>3</sup>

Además, según Barbosa Evaristo et al. (2016), indican que el endocarpio posee una densidad energética y un porcentaje de carbono fijo como los que se observan en el cuadro 2.5 que se muestra a continuación.

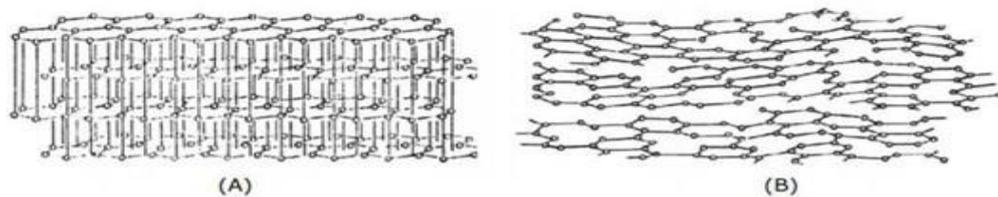
**Cuadro 2.5.** Características físicas y químicas presentes en el endocarpio de *Acrocomia* spp, estudiado por (Barbosa Evaristo et al., 2016).

Componente	Valor
Densidad Energética	3.64 GJ/m <sup>3</sup>
Carbono Fijo	21.33 %
Material Volátil	76.37 %
Cenizas	2.04 %

Debido al alto contenido de lignina y de carbono fijo presente, el endocarpio de *Acrocomia* spp presenta características que ayudan a que sea empleado para producción de biocombustible, carbón y carbón activado (León Ovelar et al., 2019). Para la ruta de aprovechamiento de endocarpio a partir de carbón, el proyecto busca producir carbón activado, es por esto por lo que en el siguiente apartado se describen las principales características que debe tener el carbón activado, sus rutas de activación y sus pruebas de caracterización.

### 2.3. Carbón Activado

El concepto de carbón activado se relaciona con un amplio número de materiales compuestos de carbonos amorfos, que poseen una alta porosidad y superficie interparticulada extendida (Bansal & Goyal, 2005). Este tiene una estructura similar a la del grafito; sin embargo, se diferencia ya que este presenta una estructura ordenada mientras que el carbón activado está constituido por una agrupación irregular de capas de carbono con espacios porosos (Luna et al., 2007). En la figura 2.3 se pueden observar las estructuras químicas y su acomodo para el grafito y el carbón activado.

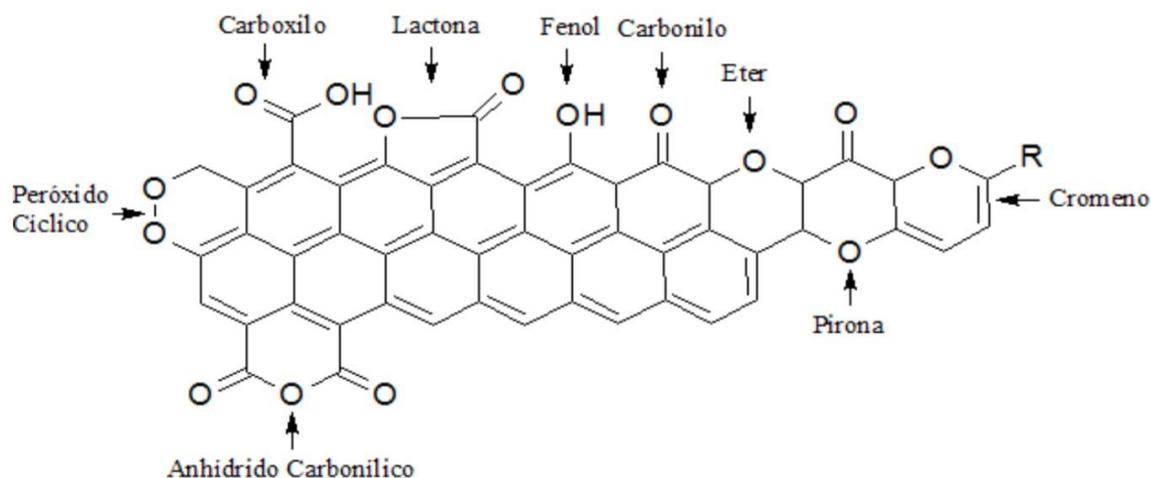


**Figura 2.3.** Estructura del: A) Grafito, B) Carbón Activado (González Navarrete, 2017)

Dada su estructura amorfa, los poros presentes en esta actúan como una malla con alta especificidad que separa especies definidas según el tamaño de molécula. El volumen de poros en el carbón activado es de aproximadamente  $0.2 \text{ mL/g}$  y su área superficial interna es de  $400 \text{ m}^2/\text{g}$  a  $1500 \text{ m}^2/\text{g}$  (Navarro & Vargas, 2010).

Asimismo, su composición química está basada mayoritariamente en átomos de carbono de (87 a 97) % (González Navarrete, 2017). Su composición típica se encuentra reportada con porcentajes de: 88 % de carbono, 0.5 % de hidrogeno, 1 % de azufre, 0.5 % de nitrógeno y la proporción de oxígeno varía de un 1 % a un 20 % dependiendo de la biomasa utilizada para generar el carbón activado (Bansal & Goyal, 2005). También, se tienen identificados algunos componentes principales en la superficie del carbón

activado, tales como grupos carboxilo, fenoles, carbonilos, los cuales se muestran en la figura 2.4



**Figura 2.4.** Esquema de posibles grupos funcionales presentes en el carbón activado

Fuente: (Sevilla, 2011)

Su alta porosidad, área superficial y variedad de grupos funcionales, permite que el carbón activado tenga una elevada capacidad para eliminar sustancias presentes en diferentes matrices (Espino Obrego, 2016). Además, estas características le confieren la capacidad de ser utilizado para la purificación del agua. Su mecanismo de adsorción sucede en tres pasos: el primero es la adsorción en la parte externa del grano de carbón activado, luego la sustancia se mueve dentro de su poro y, por último, se adsorben las sustancias dentro de las paredes internas del carbón (Siong et al., 2013)

El carbón activado puede ser obtenido de materiales orgánicos que presenten un elevado contenido de carbono y bajo contenido de cenizas, como lo son los residuos agroindustriales, cáscaras, residuos de frutas, entre otras biomásas (Asimbaya et al., 2015a).

Para poder fabricarlo se requiere un proceso de activación que consiste en reordenar los átomos de carbono, para aumentar el área superficial de la estructura de carbón (Achury Cadena, 2008). Este proceso se puede llevar a cabo mediante dos metodologías: activación física y activación química; involucrando en ambas el proceso de pirólisis, el cual es definido como el proceso irreversible de degradación térmica de

cualquier material lignocelulósica mediante una serie de cambios físicos y químicos a altas temperaturas de 300 °C a 700 °C (Abuelnoor et al., 2021)

### 2.3.1. Activación Física

El proceso de activación física consiste en un proceso en donde se realiza una pirólisis del material lignocelulósico y posteriormente se realiza una activación mediante una atmósfera oxidativa en donde se utilizan gases como: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), mezcla de  $CO_2$  y nitrógeno ( $N_2$ ) o mezcla de aire; asimismo, la activación requiere de un aumento de temperatura que se encuentra en un intervalo entre 800 °C y 1100 °C (Heidarinejad et al., 2020).

El proceso de activación física se realiza mediante un proceso directo o de dos etapas. El proceso directo requiere del pirólisis del material y la activación a la misma temperatura, únicamente se varía la atmósfera empleada; para el caso de la pirólisis se emplea  $N_2$  y para la activación se utilizan los activantes mencionados anteriormente (Abuelnoor et al., 2021).

Durante el proceso de activación física, en la etapa de carbonización se rompen algunos enlaces de la estructura lignocelulósica, y esto forma componentes volátiles, los cuales pueden provocar obstrucciones y generar reacciones de repolimerización o condensación, producto de un desarrollo pobre de los poros del carbón activado. Lo que resultó en carbones activados con propiedades limitadas a unas cuantas aplicaciones (Duan, Chen, et al., 2021). Por consiguiente, en la etapa de activación, se requiere de la eliminación de estos contaminantes y el mejoramiento de los poros del carbón, por ello se emplean activantes como vapor de agua, dióxido de carbono o mezclas de gases, a continuación, se observan algunas de las reacciones que suceden en la etapa de activación física.

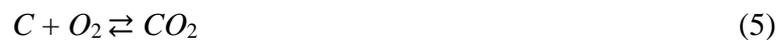
- Activación con vapor de agua ( $H_2O$ )



- Activación con dióxido de carbono ( $CO_2$ )



- Activación con aire



Diversos estudios demuestran que entre los activantes utilizados, el  $CO_2$  permite un mejor control y producción de carbón activado, dado su baja reactividad a elevadas temperaturas (Duan *et al.*, 2021).

En el cuadro 2.6, se resumen diversos estudios realizados para la generación de carbón activado mediante la vía física, en donde se especifica el tipo de biomasa, agente activante, temperatura de carbonización, temperatura de activación, tiempo de activación, presencia de nitrógeno gaseoso, Superficie BET y rendimiento.

**Cuadro 2.6.** Condiciones de fabricación de carbón activado mediante activación física para diferentes tipos de biomásas.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización / (°C)	T. Activación / (°C)	Tiempo de activación / (min)	Presencia de N <sub>2</sub>	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento / (%)	Referencias
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	800	10	No	No reportado	82.3	(Coronado Martínez et al., 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	800	20	No	No reportado	81.1	(Coronado Martínez et al., 2016)
Torta de higuera (Ricinus communis)	vapor de agua	800	800	60	Si	255.98	83.7	(Ospina-Guarín et al., 2014)
Astillas de Eucalyptus	vapor de agua	500	500	120	No	426.81	31.79	(Mopoung & Dejang, 2021)
Cáscaras de almedras crudas	NH <sub>4</sub>	600	600	120	Si	91	23	(Plaza et al., 2010)
Cáscara de trigo sarraceno	vapor de agua	700	850	120	Si	997	No reportado	(Pena et al., 2020)
Syzygium cumini	CO <sub>2</sub>	700	700	120	Si	744	No reportado	(Vinayagam et al., 2020)
Chrysopogon zizanioides	CO <sub>2</sub>	700	700	120	Si	634	No reportado	(Vinayagam et al., 2020)

### 2.3.3. Activación Química

En el proceso de activación química, el material lignocelulósico es impregnado con agentes activadores que pueden ser ácidos, bases o sales metálicas para posteriormente ser sometido a un proceso de carbonización y formar el carbón activado. El proceso químico tiene muchas ventajas sobre la activación física; la más notable es que al usar un activador químico se puede reducir drásticamente la temperatura de activación y el tiempo. En la activación física la temperatura puede alcanzar los 1000 °C mientras que con la activación química el rango se encontraría entre los 400 °C y los 800 °C (Abuelnoor et al., 2021).

El proceso de activación inicia, al sumergir el material lignocelulósico en una disolución, usualmente saturada de un oxidante y deshidratador. Posterior a la impregnación, la suspensión es pirolizada a una temperatura entre 400 °C y 800 °C. Una vez finalizado el proceso de pirólisis a la temperatura seleccionada, se obtiene el carbón activado, al cual se le realizan lavados para eliminar impurezas y en algunos casos recuperar la solución activante remanente (Heidarinejad et al., 2020).

La activación química promueve en el material lignocelulósico la descomposición, y previene la deposición de alquitranes o material volátil en el carbón activado, en consecuencia, se aumenta el rendimiento del carbón activado obtenido (Yahya et al., 2018). Los estudios han demostrado que los carbones activados elaborados mediante activación química presentan tamaños de poros y áreas superficiales superiores a los obtenidos mediante activación física (Abuelnoor et al., 2021)

Asimismo, se tienen tres tipos de activantes químicos que se utilizan para la producción del carbón activado, entre ellos se tiene los alcalinos, las sales metálicas y los ácidos (Yahya et al., 2018):

- Alcalinos: hidróxido de potasio ( $KOH$ ), carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ), hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) y carbonato de sodio ( $NaCO_3$ )
- Sales metálicas: cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) y cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ )
- Ácidos: ácido fósforo ( $H_3PO_4$ ) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )

Entre los activantes antes mencionados el ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), presenta la ventaja de ser ambientalmente seguro y económico. Un reactivo ambientalmente seguro

implica que presente baja toxicidad, sea eficaz y que sean renovables o poco persistentes en el ambiente (Danish & Ahmad, 2018).

Además, el ácido fosfórico propicia la expansión de microporos y mesoporos en la superficie del carbón activado, esto debido a la despolimerización, deshidratación y redistribución polimérica, que sucede durante la activación, propiciando la formación de productos volátiles que aumentan la cantidad de poros del carbón activado (Heidarinejad et al., 2020). El ácido fosfórico tiene dos funciones durante la activación, la primera es promover la descomposición de la materia lignocelulósica durante el proceso de pirólisis y la segunda, es la formación de estructuras entrecruzadas (Danish & Ahmad, 2018).

En el cuadro 2.7 se resumen diversos estudios realizados para la generación de carbón activado mediante la vía química, en donde se especifica el tipo de biomasa utilizada, agente activante, la temperatura a la que se realizó la carbonización, el tiempo de carbonización, el tiempo de impregnación y posteriormente el área superficial y el rendimiento obtenido bajo las condiciones de la investigación.

El carbón activado generado a partir del endocarpio de *Acrocomia* spp debe presentar características adecuadas para la separación de fases mediante la adsorción de componentes en su superficie. Es por esto, que en el siguiente apartado se describen los principios de la operación de adsorción y sus principales características.

**Cuadro 2.7.** Condiciones de fabricación de carbón activado mediante activación química para diferentes tipos de biomásas.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización / (°C)	Tiempo de carbonización / (h)	Tiempo de activación / (h)	Superficie de Bet / (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento / (%)	Referencia
Carbón Mineral (Manto 240)	<i>KOH</i>	900	1	15	54.94	No reportado	(Bastidas et al., 2010a)
Endocarpio de Coco	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	2	15	701.98	No reportado	(Bastidas et al., 2010a)
Endocarpio de Palma Africana	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	2	15	391.71	No reportado	(Bastidas et al., 2010a)
Fibra de Palma de aceite	<i>ZnCl<sub>2</sub></i>	550	0.5	24	835.3	No reportado	(Ramírez Muñoz et al., 2017)
Cáscara de Palma de Aceite	<i>ZnCl<sub>2</sub></i>	550	0.5	24	575.1	No reportado	(Ramírez Muñoz et al., 2017)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	2	24	No reportado	58.41	(F. Zhang et al., 2021a)
Endocarpio de coco	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	400	2	4	No reportado	64.35	(Serrano Guerrero, 2019a)
Residuo Lignocelulósico de Canelo	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	2	24	No reportado	29.3	(Asimbaya et al., 2015a)
Torta de higuera (Ricinus communis)	<i>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	800	1	24	1218.43	No reportado	(Ospina-Guarín et al., 2014)
Cáscara de Naranja	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	1	16	No reportado	56.58	(Solís Fuentes et al., 2012a)
Cáscarilla de Café	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	1	16	No reportado	33.5	(Solís Fuentes et al., 2012a)
Bagazo de Caña	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></i>	500	1	16	No reportado	48.58	(Solís Fuentes et al., 2012a)

**Cuadro 2.7 (Continuación).** Condiciones de fabricación de carbón activado mediante activación química para diferentes tipos de biomásas.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización / (°C)	Tiempo de carbonización / (h)	Tiempo de activación / (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento / (%)	Referencia
Endocarpio de Coyol	$K_2CO_3$	500	1	12	1002	No reportado	(Vieira et al., 2021c)
Semillas de acai	$H_3PO_4$	450	2	4	990.81	No reportado	(Souza et al., 2019)
Cáscara de nuez de brasil	$H_3PO_4$	450	2	4	1651.31	No reportado	(Souza et al., 2019)
Trozos de tallo de banana	$KOH$	900	2	96	No reportado	No reportado	(Ghosh et al., 2019)
Trozos de tallo de banana	$H_3PO_4$	900	2	96	No reportado	No reportado	(Ghosh et al., 2019)
Bagazo	$H_3PO_4$	600	5	24	No reportado	34.2	(G. Zhang et al., 2021a)
Piel de caña de azúcar	$H_3PO_4$	600	5	24	No reportado	38.3	(G. Zhang et al., 2021a)
Bamboo	$H_3PO_4$	600	5	24	No reportado	38.9	(G. Zhang et al., 2021a)
Ramas de Osmanthus fragrans	$H_3PO_4$	600	5	24	No reportado	36.7	(G. Zhang et al., 2021a)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	$H_3PO_4$	500	5	24	736.6	70.2	(G. Zhang et al., 2021a)
Cáscara de Naranja	$ZnCl_2$	400	1	No reportado	1151	40	(Köseoğlu & Akmil-Başar, 2015)
Torta de semilla de soya	$K_2CO_3$	400	1	24	643.54	16.22	(Tay et al., 2009)
Residuo de Tomate	$ZnCl_2$	600	1	No reportado	1093	No reportado	(Saygılı & Güzel, 2016)
Cunninghamia lanceolata	$H_3PO_4$	475	1.5	10	1910	50.3	(Zuo et al., 2009)
Cáscara de castaña	$H_3PO_4$	850	20 min	24	1489.99	No reportado	(Duan, Chen, et al., 2021b)

## **2.4. Adsorción**

El proceso de adsorción es aquel mediante el cual una sustancia se concentra sobre la superficie de otra fase, sea esta sólida o líquida. La sustancia que se concentra sobre la superficie se llama adsorbato y la fase que retiene sobre su superficie del adsorbato se llama adsorbente (Rojas et al., 2012). Asimismo, existen dos principales tipos de adsorción, la adsorción física y la adsorción química.

La adsorción física es causada por fuerzas de Van der Waals, las cuales son atracciones entre las superficies de los átomos, partículas o iones. Esta adsorción es no selectiva a una sustancia, ya que la superficie apta para la adsorción va a depender del espacio que ocupe en la superficie del material y no en una atracción química (Mhemeed, 2018)

Por otro lado, la adsorción química, sucede mediante la interacción química entre el sólido y la sustancia que es adsorbida en la superficie. Normalmente es resultante de fuerzas covalentes (Rojas et al., 2012). Esta adsorción es caracterizada por ser selectiva, ya que ocurre a condiciones específicas. Además, requiere de una energía de activación y es localizada (Mhemeed, 2018).

Para determinar la capacidad de adsorción de un carbón activado se emplean las isotermas de adsorción. Estas son la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la presión o concentración de equilibrio (Serrano Guerrero, 2019). La capacidad del adsorbato en retenerse sobre el adsorbente depende de factores como la concentración del adsorbato, superficie activa del adsorbente, propiedades del adsorbente y la temperatura (González Navarrete, 2017). Entre los principales modelos para describir la relación entre la adsorción en el equilibrio a temperatura constante, se pueden mencionar los siguientes: modelo de Langmuir, modelo de Freundlich, y modelo de Brunauer, Emmett y Teller conocida como (BET).

### **2.4.1. Modelo de Langmuir**

Es un modelo cinético que se originó en la interacción gas-sólido, pero se ha extrapolado a diferentes adsorbentes. Este modelo contempla que las tasas de adsorción y desorción en las superficies son iguales con acumulación cero en las condiciones de

equilibrio (Kalam et al., 2021). A continuación, se muestra la ecuación asociada al modelo de Langmuir.

$$Q_e = \frac{K_1 * Q_0 * C_e}{1 + K_1 * C_e} \quad (7)$$

En donde  $Q_e$  es la cantidad de sustancia adsorbida en la superficie del adsorbente,  $Q_0$  es la cantidad máxima adsorbida de sustancia,  $C_e$  es la concentración adsorbida, y  $K_1$  es la constante de equilibrio de adsorción de Langmuir.

Las suposiciones asociadas al modelo son (Ramírez Muñoz et al., 2017):

- Al estar todos los sitios ocupados, el adsorbente se satura y no hay más adsorción, ya que el adsorbato forma una monocapa en la superficie del adsorbente.
- No hay interacción entre las moléculas adyacentes de adsorbato.

#### **2.4.2. Modelo de Freundlich**

El modelo de Freundlich es un modelo empírico, que se utiliza para adsorción multicapa. (Kalam et al., 2021). Adicionalmente es un modelo que es aplicable para interfaces gas-sólido y líquido-sólido (M. Silva et al., 2022). Se puede definir mediante la siguiente ecuación (Lv et al., 2018):

$$Q_e = K_2 * C_e^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

En donde  $Q_e$  es la cantidad de sustancia adsorbida en la superficie del adsorbente,  $C_e$  es la concentración adsorbida,  $K_2$  es la constante de disociación de Freundlich y  $n$  es la intensidad de la adsorción.

Las suposiciones asociadas al modelo son (Ramírez Muñoz et al., 2017):

- La energía disminuye logarítmicamente, con la cantidad de sitios activos ocupados.
- No existe límite para la cantidad de adsorbato que se puede unir al adsorbente

### 2.4.3. Modelo de BET

El modelo de BET se basa en la formación de infinitas capas moleculares y en dos suposiciones: la primera en que la superficie es uniforme y no porosa, y la segunda, que la superficie del adsorbato se ordena en capas sucesivas en el adsorbente. Este modelo se expresa de la siguiente forma (González Navarrete, 2017)

$$\frac{\frac{P}{P_0}}{Q_e * \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)} = \frac{1}{Q_0} + \left(\frac{C - 1}{Q_0 * C}\right) * \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9)$$

En donde  $Q_e$  es la cantidad de sustancia adsorbida en la superficie del adsorbente,  $Q_0$  es la cantidad máxima adsorbida de sustancia,  $C$  es una constante que se relaciona con el calor de adsorción de la primera capa y las capas siguientes,  $P$  es la presión del sistema y  $P_0$  es la presión de vapor del líquido puro.

## 2.5. Técnicas de caracterización

En la siguiente sección se analizará el principio de funcionamiento y la utilidad de algunas de las técnicas de caracterización que actualmente se utilizan para el análisis de biomásas, esto con el objetivo de evaluar las propiedades del carbón activado producido.

### 2.5.1. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja representa una eficaz herramienta para el análisis de sustancias, permite describir múltiples características de estas facilitando su estudio o incluso su identificación. La técnica consiste en el paso de radiación infrarroja a través de la muestra, donde parte de la radiación es absorbida por la muestra y la otra parte pasa a través de ella. A partir de esto se genera un espectro en donde se representa la absorción y transmisión molecular de la muestra y esto representa una huella digital de la misma (Dutta, 2017).

Originalmente la fuente de luz se dividía en dos haces, uno que pasaba por la muestra y el otro a través del aire antes de ser combinados en un monocromador que registraba la función de onda (Monnier, 2018). Actualmente la técnica se ha sustituido por espectrómetro con transformada de Fourier, el cual mediante un interferómetro convierte la radiación infrarroja en un interferograma, como producto de la convolución de dos transformadas

individuales (tiempo y frecuencia). El detector recoge la radiación que posteriormente convierte mediante una transformada de Fourier en un gráfico de intensidad frente a frecuencia (Monnier, 2018).

Un espectro infrarrojo, representa la huella de la muestra y los picos absorbidos corresponden a las frecuencias vibracionales entre los enlaces atómicos de la muestra, por ello como cada material posee un único arreglo, la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier representa una técnica cualitativa para la identificación de sustancias. Asimismo, el tamaño del pico está asociado a la cantidad de ese material presente en la muestra (Dutta, 2017). Entre las aplicaciones en las cuales se emplea la técnica se tiene para análisis de nanomateriales, análisis de comida en donde se incluyen aditivos, preservantes o colorantes, análisis ambientales, análisis de semiconductores, en industria farmacéutica para el análisis de medicamentos, muestras fisiológicas, entre otras (Dutta, 2017).

### ***2.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)***

La técnica SEM permite generar una imagen a partir de las señales emitidas por la muestra, y se va formando a medida que el flujo de electrones se desplaza sobre la superficie., por lo tanto, la imagen final observada es una imagen virtual de la muestra (Ipohorski & Bozzano, 2013).

Adicionalmente, la técnica de microscopía electrónica de barrido permite observar muestras orgánicas e inorgánicas con a nivel nanométrico, lo que permite analizar la morfología de la muestra (Abdullah & Mohammed, 2019).

### ***2.5.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)***

La termogravimetría consiste en el cambio que sufre la masa de una muestra estudiada debido al calentamiento o enfriamiento controlado que soporta dicha muestra dentro de un horno. Posterior al proceso de calentamiento o de enfriado, se registran las ganancias de masa o pérdida de esta evidenciando cambios debidos a pirólisis, descarbonización o de oxidación (Barroso Benavente, 2020). Esta técnica es utilizada para estudiar las reacciones de descomposición de este tipo de materiales, y determinar las características de devolatización,

energía de activación, e influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento (Manals et al., 2011).

#### **2.5.4. Análisis de rayos X de dispersión de energía (EDS)**

La espectroscopía por dispersión de energías de rayos X (EDS), también nombrada con las siglas EDX, EDXRS, EDX O XDS, consiste en el análisis generado sobre una muestra que ha sido impactada con electrones a una determinada velocidad. Considera que el colisionar electrones con objetos puede desencadenar diferentes eventos tales como (Martínez, 2010) :

- El electrón atraviesa la muestra sin impactarla.
- El electrón atraviesa la muestra cerca del núcleo y es atraído por este.
- El electrón sufre una desviación en su trayectoria.
- El electrón visitante se implica con un electrón local del átomo y lo expulsa de este.

La espectroscopía por dispersión de energías de rayos emplea el análisis de esta última posibilidad donde el átomo queda ionizado durante unos picosegundos antes de que otro de los electrones locales del átomo ocupe el lugar vacío para así restablecer el equilibrio, sin embargo, esta reorganización resulta en un excedente de energía (Martínez, 2010). Para restablecer el equilibrio total, el átomo soluciona este excedente mediante dos métodos, el primero consiste en expulsar un electrón de la capa externa, mientras que el segundo consiste en la emisión de un fotón de rayos X (Martínez, 2010). La cantidad de energía emitida durante este proceso de reequilibrio está relacionada con el peso atómico del elemento emisor por lo que se puede identificar el mismo con uno de la tabla periódica (Martínez, 2010).

En relación con todos los tópicos anteriores, como aplicación última que se desarrollará para el carbón activado es el diseño de un filtro para remoción de contaminantes, por lo cual, en el siguiente apartado se explican los fundamentos de la filtración y los parámetros de diseño para filtros de carbón activado.

## **2.6. Filtración**

La filtración consiste en un proceso de separación de residuos sólidos presentes en un fluido, esta separación se lleva a cabo empleando un medio filtrante en el cual los residuos quedan depositados. El proceso de filtración tiene como objeto la clarificación de líquidos, la recuperación de sólidos y líquidos (McCabe, 2007).

Debido al comportamiento que poseen los diferentes medios filtrantes, a continuación, se mencionan los principales fenómenos que ocurren durante este tipo de procesos.

### ***2.6.1. Fenómenos que ocurren en un proceso de filtración.***

#### **2.6.1.1. Depositación (Sedimentación).**

Esto sucede cuando el material posee partículas grandes y densas, las cuales se encuentran suspendidas y debido a ello pueden asentarse dentro del sistema de filtración y potencialmente acumularse en el mismo, esto ocurre únicamente en zonas donde la velocidad de asentamiento en el filtro sea alta y zonas en el lecho donde la carga hidráulica sea baja (Sparks & Chase, 2016; Vargas & Maldonado Yactayo, 2004).

#### **2.6.1.2. Cernido**

Si la partícula es de mayor tamaño que los poros del medio filtrante, y es resistente a los esfuerzos cortantes producidos por la fuerza inercial, entonces quedan atrapadas en los intersticios del medio (Sparks & Chase, 2016; Vargas & Maldonado Yactayo, 2004).

#### **2.6.1.3. Intercepción**

Durante el proceso de filtración, las partículas se mueven a lo largo de líneas de corriente y entran en contacto con el medio filtrante y son retenidas. Este fenómeno ocurre dado que la densidad de las partículas es similar a la del agua y al efecto entre la relación de tamaño de partícula y el poro del medio (Sparks & Chase, 2016; Vargas & Maldonado Yactayo, 2004).

#### **2.6.1.4. Impacto Inercial**

Este mecanismo ocurre cuando las partículas suspendidas no siguen las líneas de corriente, pero continúan a través de un camino existente y cerca de los granos del medio

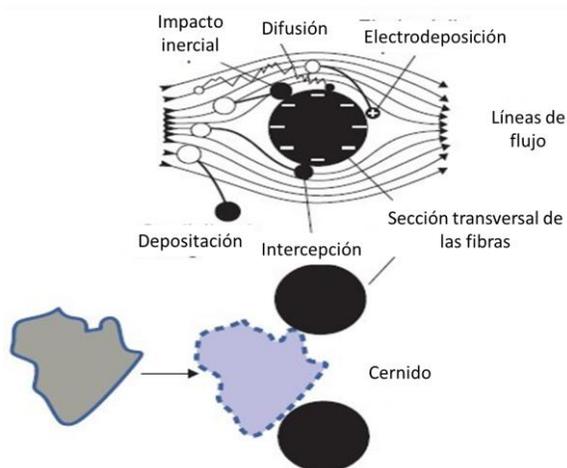
filtrante colisionan y quedan retenidos en el medio filtrante (Vargas & Maldonado Yactayo, 2004; Sparks & Chase, 2016).

#### 2.6.1.5. Difusión

Este mecanismo se caracteriza porque las partículas son influenciadas por un movimiento errático conocido como movimiento Browniano, producido por la colisión de partículas más pequeñas que aquellas presentes en el fluido y estas colisiones dirigen a la partícula contra el medio filtrante. Este mecanismo sucede en partículas pequeñas y depende del fluido, y de la densidad de la partícula y el tamaño de partícula (Sparks & Chase, 2016; Vargas & Maldonado Yactayo, 2004).

#### 2.6.1.6. Electrodeposición

Cuando las partículas presentan una superficie cargada contraria a la carga que presenta el poro del medio filtrante esto provoca que el camino de que lleva la partícula sea desviado y quede retenido en el medio filtrante (Sparks & Chase, 2016). En la figura 2.5 se observan los diferentes mecanismos de filtración que se llevan a cabo.



**Figura 2.5.** Fenómenos que ocurren en la filtración Adaptado de: (Sparks & Chase, 2016).

Una vez se definió el fenómeno de filtración y los fenómenos que interfieren en ella, se procederá en la siguiente sección a tratar los sistemas de filtración de lecho profundo ya que son los sistemas que se relacionan con la filtración en filtros, adicionalmente se trataran algunos tipos de materiales filtrantes y parámetros de diseño.

### **2.6.1. Filtración de Lecho profundo**

Estos filtros funcionan mediante la operación de un lecho profundo elaborado a partir de un material granular como carbón activado, arena, grava, entre otros el cual se emplea como medio filtrante. El fluido que recorre el filtro usualmente lo hace de manera descendente mediante su presión hidrostática, sin embargo, también puede generarse el movimiento de manera artificial empleando bombas o generando vacío en el filtro (Sparks & Chase, 2016). Entre algunos tipos de filtros de lecho profundo se tienen los de flujo descendente convencional, filtros de flujo descendente de lecho profundo, filtros de retro lavado continuo de flujo ascendente de lecho profundo, filtros de lecho pulsado y filtros de puente móvil (Takashi Asano, 2015).

Estos filtros presentan la ventaja que pueden cambiarse o utilizarse diferentes medios filtrantes para llevar a cabo la operación. Algunos de los medios filtrantes más comunes son: arena, grava, antracita, carbón activado entre otros.

- **Granate (Garnet)**

Este medio filtrante es utilizado para filtros multicapas con el objetivo de evitar los parásitos (*Cryptosporidium*) para el tratamiento de agua potable. Adicionalmente, se utiliza como soporte para los filtros (Tohkemy Corporation, 2022).

- **Arena**

Este medio es empleado en los filtros de lecho profundo ya que permite filtrar partículas, disminuir la cantidad de sólidos suspendidos y disminuirla turbidez del agua (Tohkemy Corporation, 2022).

- **Antracita**

Es utilizado como medio filtrante para la remoción de turbidez y sólidos suspendidos en el agua a tratar, asimismo debido a su alto contenido de carbono es inerte a diferentes químicos y posee una alta resistencia física (Tohkemy Corporation, 2022).

- **Grava**

La grava es empleada como sistema de soporte para medios como la arena y la antracita (Tohkemy Corpotation, 2022).

### ***2.6.2. Filtros de Carbón Activado***

En el caso del carbón activado, este se considera una de las mejores tecnologías para la eliminación de sabor, olor y color, materiales orgánicos naturales, eliminación de pesticidas, metales pesados entre otros (Evangelista et al., 2019).

Asimismo, este material se utiliza principalmente para tipos de filtros, en lecho fijo o lecho móvil. En el primer caso se genera un medio filtrante con el material y el fluido pasa a través de este, entre las ventajas que presenta es que tiene mayor eficiencia contra micro contaminantes y filtra sólidos suspendidos, entre sus desventajas es que puede presentar canalización u obstrucción (Reddy Elavarthi, 2021).

Para el caso de los filtros de lecho móvil, el carbón activado se añade al sistema de filtro y este fluye a través de este, entre las ventajas que presenta se encuentra que al mantener el sistema aeróbico se evita la emisión de compuestos tóxicos a la atmósfera, y que permite un alto tiempo de retención y un tamaño pequeño del filtro. Entre las desventajas es que no filtra sólidos suspendidos, requiere de mayor energía para su movilización y agitación (Reddy Elavarthi, 2021).

### ***2.6.3. Parámetros para el diseño de filtros de carbón activado***

Algunos parámetros fundamentales para el diseño de filtros de carbón activado se muestran a continuación (Reddy Elavarthi, 2021).

- **Tiempo de contacto con el lecho vacío (EBCT)**

Es el tiempo que tarde en tratarse el agua residual mientras se encuentra en contacto con el material que adsorbe, en este caso el carbón activado. La ecuación que define el fenómeno se muestra a continuación.

$$EBCT = \frac{V_b}{Q} \quad (10)$$

En donde  $V_b$  es el volumen del lecho en  $m^3$  y  $Q$  es el flujo volumétrico en  $m^3/h$ .

- **Capacidad de adsorción**

Es la capacidad del carbón activado en adsorber la masa del micro contaminante. La ecuación que define el fenómeno se muestra a continuación.

$$Qf = \frac{V * (C - C_0)}{m} \quad (11)$$

En donde  $V$  es el volumen en  $m^3$  y  $C$  es la concentración del contaminante luego del proceso de adsorción en ppm,  $C_0$  es la concentración del contaminante al inicio en ppm, y  $m$  es la masa de carbón activado en g.

- **Tasa de uso de carbón (CUR)**

Es la tasa de carbón activado necesaria para tratar una unidad de volumen hasta la salida del filtro y la ecuación que la define se muestra a continuación.

$$CUR = \frac{M_c}{V_t} \quad (12)$$

En donde  $M_c$  es la masa de carbón en el medio filtrante g y  $V_t$  es la unidad de volumen tratada en L.

## **CAPITULO 3. Caracterización Físico-química del Endocarpio de *Acrocomia* spp**

---

En este capítulo se presenta la caracterización general de los frutos de *Acrocomia* spp y posteriormente se enfocó la caracterización en el endocarpio de *Acrocomia* spp, con el objetivo de determinar las cualidades que permitieron que el endocarpio de *Acrocomia* spp sea un insumo utilizado para la fabricación de carbón activado.

### **3.1 Metodología**

En el siguiente apartado se trataron las diferentes metodologías realizadas para la determinación de las características morfológicas que presenta la *Acrocomia* spp, las características fisicoquímicas para el endocarpio de *Acrocomia* spp; y los equipos y materiales necesarios para llevar a cabo las metodologías descritas en el apartado.

#### **3.1.1 Materiales y Equipos**

Las muestras de *Acrocomia* spp (coyol) se recolectaron en tres parcelas diferentes pertenecientes a los miembros de la Asociación Agropecuaria de Lajas (AgroLajas) (10°16'52" N y 85°2'59" W; 10°16'52" N y 85°2'59" W; 10°16'52" N y 85°5'15") entre febrero del 2021 y mayo del 2021. Las muestras fueron recolectadas al azar de las copas de los árboles empleando una vara para propiciar la caída de los coyoles maduros de los racimos; adicionalmente, se recolectaron los coyoles maduros de los alrededores de los árboles y todos fueron almacenados en sacos para su transporte al laboratorio. Posteriormente, las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Ingeniería del Centro Universitario de Palmares altitud de 1017 msnm y una temperatura de 25 °C, en donde se lavó con agua los coyoles para remover cualquier residuo que estuviera presenta en la capa exterior; luego se luego se empleó alcohol para eliminar microorganismos remanentes. Parte de las muestras fueron almacenadas en un congelador a una temperatura de aproximadamente -18 °C en bolsas herméticas.

Una vez los coyoles estuvieron desinfectados, parte de ellos fueron divididos en las cuatro secciones que componen el fruto (cáscara, pulpa, carrozo y nuez) para el análisis

morfológico y determinación de humedad, materia seca y cenizas. La otra parte de los coyoles fue fraccionada hasta llegar al mesocarpio de donde se produjeron dos muestras de trabajo, una en la cual se removió por completo el mesocarpio (pulpa) y endosperma y otra en la cual se removió el endosperma y parcialmente el mesocarpio. A continuación, en la figura 3.1 se observan las muestras de trabajo.



**Figura 3.1** Muestras empleadas para la caracterización. A) Mezcla (Endocarpio-Mesocarpio). B) Endocarpio

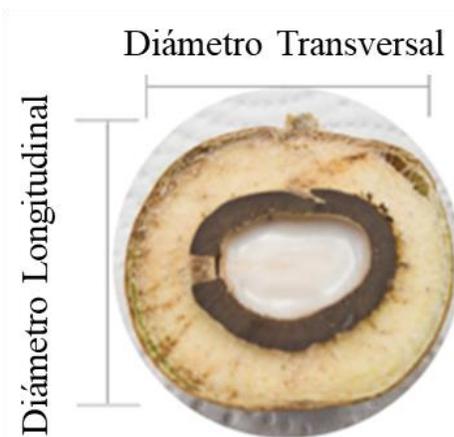
La razón por la cual se seleccionaron dos tipos de muestras diferentes en la caracterización fisicoquímica fue basada en la dificultad de garantizar la limpieza en la totalidad de la superficie del endocarpio, esto debido a que el proceso para asegurar la menor cantidad de mesocarpio en la superficie del endocarpio es mediante un proceso de desgaste y raspado de la superficie, por tanto, al ser una labor que consume tiempo, esfuerzo y presenta un costo asociado de mano de obra a la operación, se decidió estudiar ambas biomásas para determinar si existe diferencia y determinar si ambas funcionan para la producción de carbón activado. Adicionalmente, ambas muestras son residuos que se producen del proceso de extracción de la Asociación por lo que se contempla un aprovechamiento integral para que no sean consideradas residuos sino materias primas para procesos de producción.

Los equipos empleados para las diferentes pruebas realizadas fueron: Balanza Analítica AS 220.R2 PLUS; Estufa Fisherbrand<sup>TM</sup>; Mufla Thermolyne Thermo Scientific;

Molino de corte Retsch SM 300; Tamizadora analítica Retsch AS 200; Máquina de Ensayo Universal Intron 3369; Calorímetro Isoperibólico AC500; Microscopio electrónico de barrido S-3700N; espectrofotómetro infrarrojo con transformada Fourier FT-IR Nicolet iS50 Thermo Scientific; TGA Q500 (TA Instruments, USA) y un Thermo Scientific Flash Smart.

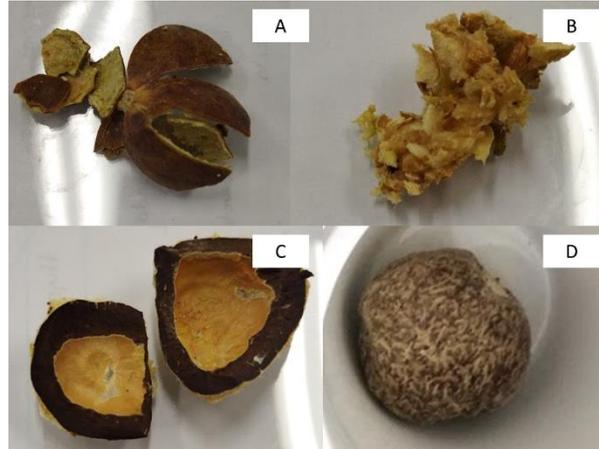
### 3.1.2 Determinación de características morfológicas.

Las pruebas morfológicas fueron realizadas a 60 frutos de *Acrocomia* spp los cuales fueron seleccionados de manera aleatoria y a los cuales se les midió el peso fresco (peso después de su cosecha inmediata) y el diámetro longitudinal y el diámetro transversal como se ejemplifica en la figura 3.2.



**Figura 3.2** Diagrama para la medición de diámetros de fruta de *Acrocomia* spp.

Se utilizó un vernier para la medición de los diámetros y una balanza analítica para la masa. Una vez se obtuvo la masa promedio, se procedió al fraccionamiento y a la medición de masa individual de cada una de las partes (epicarpio, endocarpio, mesocarpio y endospermo), esto se realizó únicamente para 30 frutos de *Acrocomia* spp, la separación de las partes se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3** Secciones obtenidas del fruto de *Acrocomia* spp al realizar el fraccionamiento. A) Epicarpio (Cáscara) B) Mesocarpio (Pulpa) C) Endocarpio (Carrozo) D) Endosperma (Semilla).

La metodología seguida para fraccionar el fruto de Coyol consistió en el uso de un martillo para generar una grieta o apertura en el epicarpio (cáscara) del fruto mediante un golpe. Posteriormente, empleando guantes se elimina la cáscara hasta tener únicamente el mesocarpio; al llegar a esta sección se utilizó un cuchillo para remover el mesocarpio cuidadosamente hasta el endocarpio. Una vez, se tiene el endocarpio descubierto se realizó un golpe contundente con el martillo para fracturar el endocarpio y retirar el endosperma. Adicionalmente, cada una de las partes fragmentadas fue almacenada en una bolsa hermética limpia y rotulada con el código respectivo. La metodología anteriormente descrita se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Estatal a Distancia perteneciente al Centro Universitario de Palmares (UNED).

### **3.1.3 Determinación de materia seca, cenizas y humedad.**

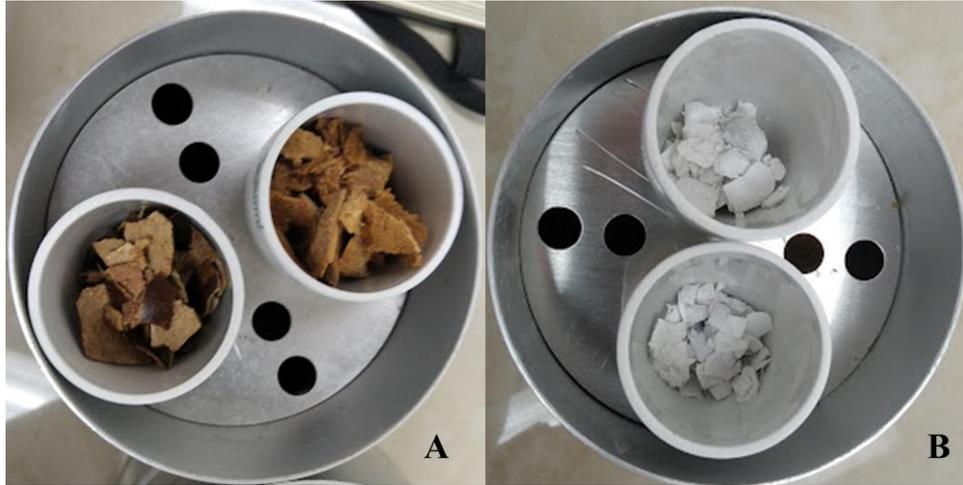
La determinación de los parámetros de humedad, materia seca y cenizas se realizaron en el laboratorio del Núcleo Instrumental de Análisis (NIA) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) con una altitud de 1205 msnm y una temperatura de  $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Para ello, se empleó las metodologías sugeridas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la Internacional Organization for Standardization (ISO), específicamente la

ASTM E1756-08 e ISO 18122:2015 para la determinación de humedad y materia seca y en el caso de cenizas la ASTM E1755-01.

Se tomaron aleatoriamente 5 frutos de coyol los cuales se fraccionaron en sus partes (epicarpio, mesocarpio, endocarpio y endosperma). Cada una de las partes fue pesada y colocada en recipientes previamente pesados para la determinación de materia seca, empleando las condiciones de 105 °C durante un período de 12 h (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales [ASTM], 2020b)

Una vez pasado el tiempo de secado, se tomaron las muestras y se colocaron en un desecador con gel de sílice (para evitar la absorción de humedad). Las muestras se dejaron reposar hasta que llegaran a una temperatura de  $(25 \pm 3)$  °C, luego se realizó la medición de masa hasta alcanzar una variación menor de 0.3 mg (ASTM, 2020b).

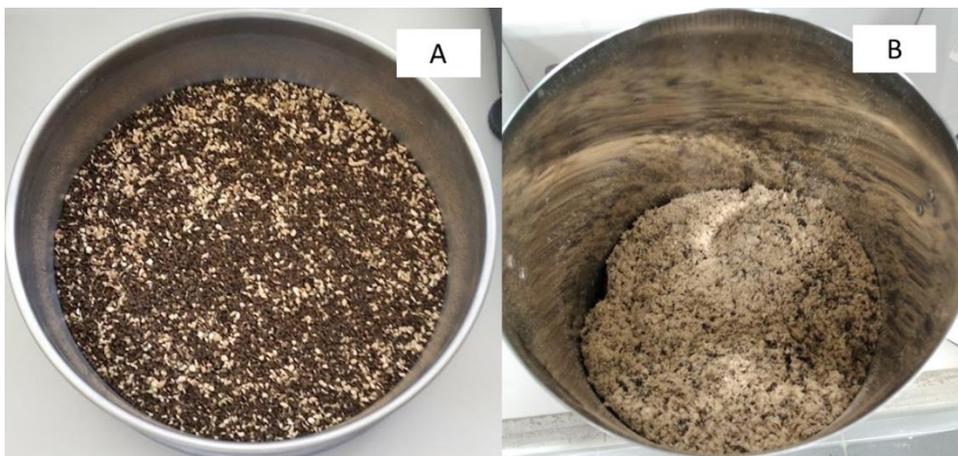
En el caso de la determinación de cenizas, se empleó una mufla a 575 °C durante 24 h. Una vez finalizado el procedimiento se dejó enfriar el material y posteriormente se trasladó a desecadores hasta alcanzar temperatura ambiente de aproximadamente  $(22 \pm 3)$  °C. Al alcanzar la temperatura ambiente se pesó cada una de las muestras hasta obtener una diferencia menor a 0.3 mg (ASTM, 2020a). En la figura 3.4 se observan imágenes de los resultados del proceso de determinación de materia seca y generación de cenizas.



**Figura 3.4.** Ejemplificación del proceso de determinación de materia seca y cenizas A) biomazas posteriores al proceso de determinación de materia seca B) biomazas luego del proceso de calcinación.

#### **3.1.4 Molienda y determinación de tamaño de partícula.**

En un molino de corte Retsch SM 300 se molió el endocarpio y el endocarpio con mesocarpio remanente en la superficie para generar dos tipos de muestras de trabajo. Para este proceso se utilizó una malla de 5 mm (dentro del equipo de molienda). En la figura 3.5 se observa las muestras posterior al proceso de molienda.



**Figura 3.5.** Muestras molidas. A) Endocarpio B) Mezcla (Endocarpio-mesocarpio).

De cada muestra obtenida se realizó un cuarteo para tomar una submuestra y se procedió por triplicado a la determinación del tamaño de partícula siguiendo las normas INTE ISO 17827-1 2022 e INTE ISO 17827-2 2022, adicionalmente se incluyó las recomendaciones del fabricante en emplear una amplitud de 1.5 mm en el equipo de tamizado (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO], 2022b, 2022a). En el cuadro 3.1 se muestran los tamices empleados según su nomenclatura en la Organización Internacional de Normalización (ISO). El proceso de molienda fue efectuado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica (UCR) sede del Caribe (Temperatura de  $[25 \pm 3]$  °C y 25 msnm) y el proceso de tamizado fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Estatal a Distancia (UNED)

**Cuadro 3.1.** Tamices empleados para la determinación de tamaño de partícula del endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

Número de tamiz	Tamaño de malla
5	4 mm
10	2 mm
18	1 mm
35	500 $\mu\text{m}$
60	250 $\mu\text{m}$
125	125 $\mu\text{m}$
230	63 $\mu\text{m}$
325	45 $\mu\text{m}$

### 3.1.5 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

La determinación de FTIR se realizó utilizando la biomasa del tamaño número 45 o inferior del proceso de tamizado. Este análisis se aplicó a la biomasa de endocarpio y a la mezcla (endocarpio-mesocarpio), la masa empleada fue de aproximadamente 1 mg (punta de espátula). Las muestras se colocaron en el muestreador de célula de diamante y el equipo se procedió a programar para un rango  $4000 \text{ cm}^{-1}$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ , con 32 barridos por muestra y una resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$  al 100% de transmitancia. Los espectros se procesaron con el software OMNICTM Series 9 v9.8 (Hernández-Chaverri et al., 2022). El análisis se llevó a cabo en el Núcleo Instrumental de Análisis (NIA) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) (1192 msnm).

### **3.1.6 Calor de combustión**

La capacidad calorífica se determinó mediante el uso de la norma ASTM D5865, por triplicado para una muestra de molida de endocarpio, mesocarpio y de epicarpio de *Acrocomia* spp (ASTM, 2019). El molido de endocarpio fue obtenido de la muestra previamente molida y para el caso del mesocarpio y epicarpio este se realizó mediante un mortero. Para generar el comprimido de la muestra se empleó el crisol del equipo en donde se agregó la muestra con peso conocido y se comprimió hasta generar una pastilla, posteriormente, el crisol fue colocado en el soporte dentro del recipiente de combustión, al cual se le adjuntó el alambre y se garantizó que este se encontrara en contacto con la muestra. El procedimiento antes descrito se realizó con guantes para evitar la contaminación. Por último, se cerró el recipiente de combustión al igual que la válvula y se relleno con oxígeno hasta alcanzar 420 psi. Una vez cargado el recipiente de combustión, este es traslado al calorímetro en donde se conectaron los cables y se procedió a realizar la medición del poder calorífico por triplicado (Hernández Chaverri et al., 2022). Las determinaciones de calor de combustión se realizaron en el Laboratorio de Investigación en Ciencias Experimentales (LICE) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) el cual se encuentra en la Sede UNED Sabanilla (1208 msnm).

### **3.1.7 Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM)**

El análisis de morfología por microscopía electrónica de barrido (SEM) fue realizado en el Laboratorio del Centro Nacional de Alta Tecnología (LANOTEC, ubicado en Pavas a una altura de 1060 msnm) para las muestras endocarpio y de mesocarpio de *Acrocomia* spp, este se ejecutó colocando las muestras en una base metálica, y ajustando la posición con cinta de doble contacto. Posteriormente se realizó un recubrimiento de oro, y se procedió a analizar las muestras con una tensión de 10 kV (Hernández Chaverri et al., 2022).

### **3.1.8 Análisis termogravimétrico (TGA)**

Se analizaron muestras endocarpio y mesocarpio en el Laboratorio del Centro Nacional de Alta Tecnología, para lo cual se colocó en el compartimiento del equipo una masa de aproximadamente 8 mg a 9 mg. Posteriormente, se cierra el comportamiento y se

colocan las condiciones de operaciones bajo una atmósfera inerte de nitrógeno con un flujo de 60 mL por min y una rampa de temperatura de 10° C por min hasta alcanzar desde temperatura ambiente los 1000 °C (Hernández Chaverri et al., 2022).

### ***3.1.9 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrogeno, nitrógeno y azufre (CHONS)***

El análisis elemental se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica Sede Rodrigo Facio (1205 msnm), empleando un equipo de Thermo Scientific Flash Smart. Este estudio se realizó para muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) molido. Para la determinación del carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se realizó una curva de calibración empleando 2,5-bis(5-terc-butil-2-benzo-oxazol-2-il) tiofeno (BBOT) y para el caso del oxígeno se utilizó ácido aspártico (Montenegro Quesada et al., 2021). El procedimiento para el análisis elemental se basó en la ISO 16948:2015 (Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR], 2015).

### ***3.1.11 Curvas de Secado***

Las curvas de secado se realizaron en el NIA para muestras por triplicado de endocarpio molido y de mezcla (endocarpio-mesocarpio) molido de *Acrocomia* spp el cual se remojo en agua destilada durante 24 h y posteriormente se retiró el exceso de agua mediante la aplicación de secado con una toalla de papel. Luego, se realizó el proceso de secado empleando un analizador de humedad Ohaus MB120, a condiciones de 50°C por un intervalo de tiempo de 250 min. Para ello, se colocó un plato metálico el cual se taró y posteriormente se colocó aproximadamente 25.00 g de la muestra a analizar sobre el plato hasta cubrirlo, luego se cerró la capilla y se procedió al estudio de secado. Los datos del porcentaje de humedad en el tiempo se extrajeron utilizando la interfaz instalada del analizador (Hernández Chaverri et al., 2022; Ulate-Segura & Mata-Segreda, 2014). Posteriormente, los datos obtenidos se procesaron mediante Excel y se elaboraron las gráficas de secado para el material estudiado es importante resaltar que se realizó un depurado de los datos según las recomendaciones del comité asesor. Adicionalmente las condiciones del laboratorio fueron de  $(36 \pm 2)$  % humedad relativa.

### 3.2 Resultados y Discusión

En el siguiente apartado se tratarán los resultados obtenidos para la determinación de las características morfológicas y fisicoquímicas de la *Acrocomia* spp, y en profundidad las que corresponden al endocarpio de *Acrocomia* spp, ya que este material se utilizó para la producción de carbón activado.

#### 3.2.1 Características morfológicas

Los resultados obtenidos para la medición de diámetros de los frutos de *Acrocomia* spp, se observan en el cuadro 3.2, donde se indican los valores para el diámetro longitudinal y transversal en mm, así como los valores reportados por diferentes autores.

**Cuadro 3.2** Diámetro longitudinal y transversal para los frutos de *Acrocomia* spp.

Diámetro Longitudinal / (mm)	Diámetro Transversal / (mm)	Zona	Autor
38.40 ± 1.50	37.60 ± 2.30	Guanacaste, Bagaces	<b>Esta investigación</b>
36.7 ± 6.2	34.40 ± 5.40	Brasil	(Ciconini et al., 2013)
30.00-50.00	30.00-50.00	Paraguay	(Colombo et al., 2018)
25.00-50.00	25.00-50.00	Paraguay	(Rodríguez Bonet et al., 2020)
45.00 ± 0.10	44.00 ± 0.10	Alajuela	(Alfaro-Solís et al., 2020)
41.00 ± 0.20	40.00 ± 0.10	Alajuela	(Alfaro-Solís et al., 2020)
42.00 ± 0.10	42.00 ± 0.10	Alajuela	(Alfaro-Solís et al., 2020)

En el cuadro 3.2 se puede observar que el diámetro obtenido para los frutos de *Acrocomia* spp son similares a los reportados por Colombo et al. (2018) y Rodríguez Bonet et al. (2020); sin embargo, estos difieren de los frutos presenten en las tres regiones de Alajuela de Alfaro-Solís et al. (2020), se observa que existe una diferencia significativa entre los frutos, lo cual puede deberse a factores ambientales, climatológicos, o características del suelo, tratamiento y cuidado de los parceleros.

Además, se determinó el volumen y densidad de los frutos de *Acrocomia* spp, esto mediante su aproximación a un elipsoide, donde posteriormente se obtuvo el volumen de la configuración y luego la densidad, por consiguiente, se determinó el peso promedio de las muestras estudiadas y los resultados se observan en el cuadro 3.3, en donde se resumen los resultados obtenidos.

**Cuadro 3.3.** *Peso promedio, volumen y densidad para las muestras empleadas de frutos de Acrocomia spp*

<b>Peso/ (g)</b>	<b>Volumen / (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad / (g/cm<sup>3</sup>)</b>
19.19 ± 2.81	25.78 ± 3.04	0.74 ± 0.08

Las muestras estudiadas presentaron una densidad de  $0.74 \text{ g/cm}^3 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ ; al buscar en la bibliografía valores de densidad, se obtiene únicamente para el endocarpio un valor de  $0.689 \text{ g/cm}^3$  (Vieira et al., 2021); por consiguiente, la investigación brinda el valor promedio de la densidad obtenida para el fruto completo de *Acrocomia* spp.

El peso promedio de las fracciones húmedas del fruto y el porcentaje del fruto total correspondiente a cada una se muestra en el cuadro 3.4.

**Cuadro 3.4** Fraccionamiento del fruto de *Acrocomia* spp determinando su peso promedio y el porcentaje de fracción

<b>Fracción</b>	<b>Masa promedio</b>	<b>Porcentaje de fracción</b>
Epicarpio	(3.91 ± 0.37) g	17.50 %
Mesocarpio	(7.02 ± 1.07) g	31.40 %
Endocarpio	(8.49 ± 0.75) g	38.00 %
Endosperma (Semilla)	(2.93 ± 0.36) g	13.10 %
Masa total	(22.35 ± 1.97) g	100.00 %

El cuadro 3.4 se denota que las fracciones del fruto con mayor porcentaje en masa son el mesocarpio y endocarpio, y por tanto para el aprovechamiento integral del fruto se debe contemplar aplicaciones que permitan el uso de ambas fracciones. Por ende, para el

caso del endocarpio se refuerza su empleo en la producción de carbón activado para la obtención de un filtro y en el mesocarpio se justifica su utilidad para la extracción de aceite y posteriormente el empleo de la torta para alimento animal (César et al., 2015).

Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con los reportados por diferentes autores que han trabajado con la *Acrocomia* spp, el cuadro 3.5 resume las fracciones en porcentaje de cada una de las partes.

**Cuadro 3.5** Fraccionamiento del fruto de *Acrocomia* spp para diferentes zonas geográficas

Zona	Porcentaje de fracción de Epicarpio / (%)	Porcentaje de fracción de Mesocarpio / (%)	Porcentaje de fracción de Endocarpio / (%)	Porcentaje de fracción de Endosperma / (%)	Referencia
Bagaces/Guanacaste, Costa Rica	17.50 ± 0.19	31.40 ± 0.54	38.00 ± 0.38	13.10 ± 0.18	<b>Esta investigación</b>
Brasil	20.6 ± 1.0	47.9 ± 1.9	26.6 ± 1.4	4.9 ± 0.80	(Ciconini et al., 2013)
	19.6 ± 0.6	44.8 ± 1.9	30.2 ± 1.8	5.4 ± 0.40	
	17.9 ± 0.7	51.2 ± 1.9	23.3 ± 1.0	6.7 ± 0.60	
	18.7 ± 0.6	48.1 ± 1.3	27.9 ± 1.1	5.3 ± 0.20	
Alajuela, Costa Rica	23.5	46.7	22.0	7.80	(Alfaro-Solís et al., 2020)
	20.9	49.1	22.1	9.10	
	32.6	44.2	17.4	5.80	
Cuba	30.5	27.5	34.7	7.3	(Hernández Zardón, 2016)
Paraguay	18.7	43.9	27.3	10.1	(Rodríguez Bonet et al., 2020)

A partir del cuadro anterior se observa que el epicarpio obtenido mediante la presente investigación posee un porcentaje de fraccionamiento menor al brasileño, al de Alajuela y al cubano; adicionalmente, para la de fracción del mesocarpio de este estudio sucede un fenómeno similar, en donde se visualiza que el valor obtenido se encuentra por debajo del paraguayo, brasileño y el de Alajuela. Por consiguiente, esta variación puede asociarse a condiciones ambientales, características del suelo, clima, e inclusive tratamiento, cuidado de cultivo y especie. En contraste, las fracciones de endocarpio, y endosperma presentan mayor

porcentaje que los reportados por los autores del cuadro 3.5; lo que con lleva a buscar opciones de aprovechamiento que se enfoquen principalmente en estas fracciones.

### 3.2.2 Determinación de materia seca, cenizas y humedad.

La determinación de materia seca, cenizas y humedad se llevó a cabo con el fin de conocer si las diferentes fracciones de *Acrocomia* spp son aprovechables para aplicaciones de carbonización. Los resultados obtenidos para el estudio de materia seca, humedad y cenizas se resumen en el cuadro 3.6, en donde se indica el valor de cada uno de los parámetros anteriores para cada tipo de fracción.

**Cuadro 3.6.** Porcentaje de humedad, materia seca y cenizas para las diferentes fracciones de *Acrocomia* spp obtenidos en esta investigación.

Fracción	Humedad/ (%)	Materia Seca/ (%)	Cenizas/ (%)
<b>Epicarpio</b>	16.53 ± 0.98	83.47 ± 0.98	4.06 ± 0.49
<b>Mesocarpio</b>	22.91 ± 0.89	77.09 ± 0.89	6.21 ± 0.95
<b>Endocarpio</b>	11.59 ± 0.75	88.41 ± 0.75	2.01 ± 0.28
<b>Endosperma</b>	5.83 ± 0.79	94.17 ± 0.79	1.98 ± 0.14

Se observa que la humedad obtenida para el epicarpio se encuentra en 16.53 % ± 0.98 %, la cual se encuentra por debajo del intervalo reportado por Vargas Carpintero et al. (2021), en donde se indican valores de 17.9 % a 32.6 % y por ende al presentar menor contenido de humedad procesos de carbonización se verían beneficiados (Vargas Carpintero et al., 2021). Para el caso del mesocarpio, se obtuvo un valor de 22.91 % el cual se encuentra por debajo del indicado Vargas Carpintero et al. (2021), el cual reporta valores de (41-51.2) %, sin embargo, otros autores que han trabajado con la *Acrocomia* spp reportan valores para el mesocarpio de 13.5 % (Hernández Zardón, 2016c) por tanto, esta diferencia entre los tres valores se asocia a las condiciones ambientales en las cuales crece el fruto y el periodo de cosecha.

El porcentaje de humedad del endocarpio es de 11.59 % ± 0.75 % y al compararlo con el estudiado por otros autores (22-31) % (Vargas Carpintero et al., 2021), 6.44% (Vieira et al., 2021), 6.20 % (Alves et al., 2022), se evidencia diferencia entre los parámetros

reportados, sin embargo Vieira et al., (2021) indica que materiales con contenido de humedad entre 5 % y 10 % son adecuados para la formación de biochar, la obtención de un endocarpio con un contenido de humedad superior al 10 % puede deberse a la intervención de parámetros como las condiciones ambientales o bien el periodo de cosecha (César et al., 2015). Por último, el endosperma se encuentra dentro del rango reportado que es aproximadamente (4.9-9) % (Coimbra & Jorge, 2011; Rodríguez Bonet et al., 2020; Vargas Carpintero et al., 2021).

El contenido de cenizas para las fracciones estudiadas presenta valores por debajo del 7 %, y como indica (Alves et al., 2022) contenidos bajos de cenizas benefician los procesos de pirólisis y adicionalmente, el autor indica que biomásas empleadas para biocombustibles deben presentar contenidos de humedad de 0.6 % y 9.8 %, por tanto, esto indica que fracciones como el endocarpio presentan características favorables para la producción de biocombustibles o procesos de pirólisis.

### 3.3.3 Molienda y determinación de tamaño de partícula.

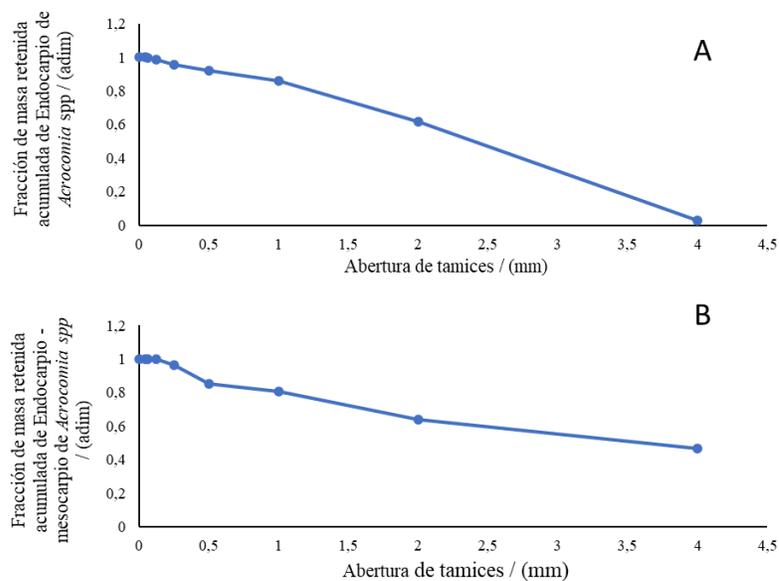
Los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula de las muestras de endocarpio y endocarpio-mesocarpio se observan en el cuadro 3.8.

**Cuadro 3.7.** Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula del mezcla (endocarpio- mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

<b>Abertura del tamiz</b>	<b>Masa retenida de mezcla (endocarpio-mesocarpio)</b>	<b>Masa retenida de endocarpio</b>
4.00 mm	(163.16 ± 67.79) g	(15.86 ± 3.80) g
2.00 mm	(59.64 ± 23.70) g	(339.27 ± 143.31) g
1.00 mm	(58.34 ± 18.95) g	(142.93 ± 49.00) g
500.00 µm	(16.06 ± 2.31) g	(33.76 ± 13.07) g
250.00 µm	(39.91 ± 3.66) g	(21.56 ± 8.33) g
125.00 µm	(11.82 ± 7.18) g	(16.85 ± 7.04) g
63.00 µm	(0.14 ± 0.21) g	(6.98 ± 0.77) g
45.00 µm	(0.02 ± 0.02) g	(0.05 ± 0.04) g
Fondos	(0.00 ± 0.01) g	(0.00 ± 0.00) g

El estudio de distribución de tamaño de partícula para el endocarpio indica que la mayoría de la biomasa se encuentra retenida entre los tamices de 4 mm - 1 mm, adicionalmente se observa que mediante la molienda realizada no se obtienen fondos. Por lo tanto, la biomasa molida se encuentra por encima de 45  $\mu\text{m}$ . Adicionalmente, la distribución de tamaño de partícula indica que mediante la molienda la mayoría del material producido por el molino de cuchillas se encuentra retenido en el tamiz de 1 mm y por consiguiente si se realiza un proceso de carbonización a este material molido se obtendrá mayoritariamente un carbón granular (Abuelnoor et al., 2021). Para el caso de la mezcla (endocarpio-mesocarpio) se tiene que la masa queda retenida en el tamiz de 4 mm esto sucede principalmente dado el tipo de textura que presenta el mesocarpio, se asemeja a espuma por lo que al realizar el proceso de tamizado la partícula no se distribuye correctamente.

Para observar la distribución de las muestras estudiadas se elaboraron las gráficas de fracción retenida acumulada que se presenta en la figura 3.6, a continuación.

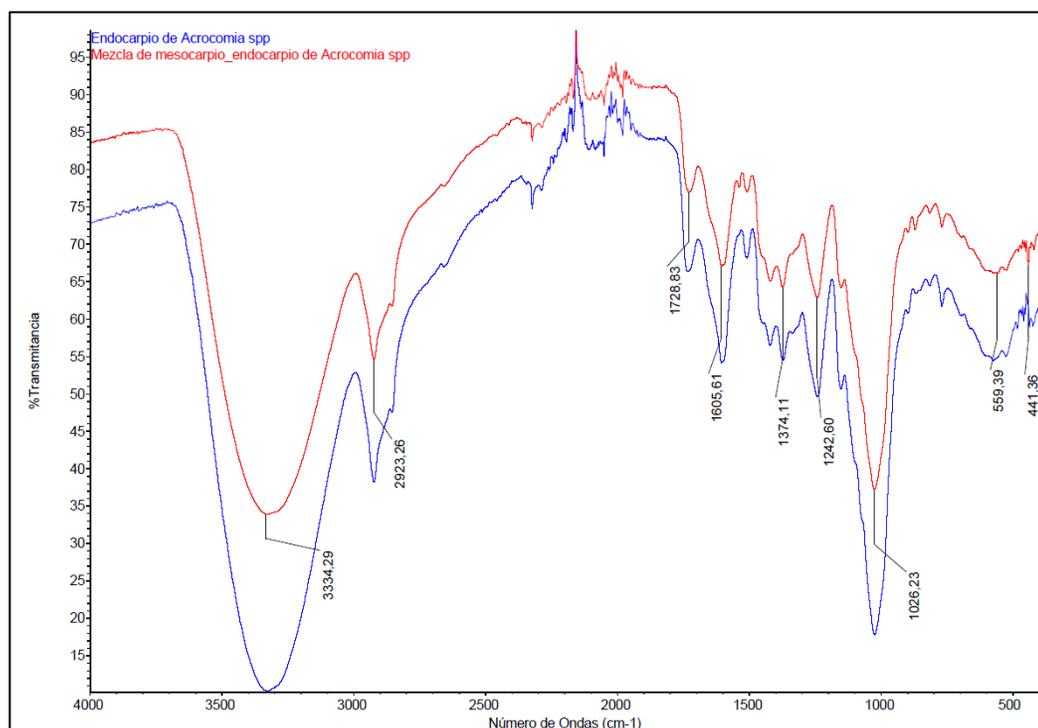


**Figura 3.6.** Distribución de tamaño de partícula para las muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) de *Acrocomia*. A) Fracción acumulada de endocarpio para diferentes aberturas de tamiz. B) Fracción acumulada de mezcla (endocarpio-mesocarpio) para diferentes aberturas de tamiz.

Se observa un comportamiento en el cual conforme disminuye la abertura del tamiz aumenta la fracción de masa acumulada para cada una de las muestras (figura A y B), lo que implica que no se está acumulando la totalidad de masa en los tamices de 4 mm, sino que se distribuye de manera adecuada. Específicamente para la figura 3.6 A se tiene que el comportamiento presenta una pendiente decreciente pronunciado, caso contrario, para la figura 3.6 B se tiene que entre las aberturas de 1 mm, 2 mm y 4 mm la pendiente es decreciente pero menos pronunciada que la anterior. Por consiguiente, se confirma que la mezcla (endocarpio-mesocarpio) al poseer una textura “espumosa” este queda retenido en el tamiz de 4 mm principalmente. Conocer la distribución de tamaño posterior a la etapa de molienda permite identificar las fracciones másicas que pueden aprovecharse del proceso para fabricación de carbón activado granular o bien para carbón activado en polvo.

#### ***3.3.4 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)***

Se realizó un análisis FTIR para el endocarpio y para mezcla (endocarpio-mesocarpio) de *Acrocomia* spp, como se observa en la figura 3.7, adicionalmente se visualizan picos pronunciados en longitudes de  $3344.29\text{ cm}^{-1}$ ,  $2923.26\text{ cm}^{-1}$ ,  $1728.83\text{ cm}^{-1}$ ,  $1605.61\text{ cm}^{-1}$ ,  $1242.60\text{ cm}^{-1}$ ,  $1026.23\text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 3.7.** Espectro infrarrojo con transformada de Fourier para las biomásas de endocarpio de *Acrocomia* spp y mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

(Fuente: Omnic™ Specta Software)

En el caso del pico de  $3334.29\text{ cm}^{-1}$  este se asocia a enlaces (-OH) provenientes de alcoholes, fenoles, cetonas o grupos de ácidos carboxílicos (Ighalo et al., 2020). Diversos autores (de Souza et al., 2019; Ighalo et al., 2020; Lin et al., 2020; Mopoung & Dejang, 2021a; Nizam et al., 2021; Vieira et al., 2021) asocian las señales entre  $(3100-3900)\text{ cm}^{-1}$  a grupos hidroxilo presentes en biomásas como *Pennisetum purpureum*, *Eichhornia Crassipes*, *Drimys Winteri*, *Laurus Nobilis*, *Eucalyptus L'Her*, *Acrocomia Aculeate*, *Euterpe Oleraciaea Martius*, *Bertholletia Excelsa H.B.K*, *Hevea Brasiliensis* y *Eucalyptus*. Adicionalmente esta señal además de asociarse a la presencia de agua está ligada a la deformación axial de los grupos OH de la celulosa (Vieira et al., 2021) otros autores indican que la presencia de estos grupos indica un carácter hidrófilo y esto sugiere un potencial para la adsorción (Ighalo et al., 2020).

Para el caso de la señal de  $2923.26\text{ cm}^{-1}$ , esta se relaciona a enlaces de grupos alifáticos (C-H) (Lin et al., 2020; Vieira et al., 2021) como por ejemplo metilos y metilenos (Mopoung & Dejang, 2021); adicionalmente estos grupos alifáticos son vinculados a la hemicelulosa (Vieira et al., 2021). La señal de  $1728.83\text{ cm}^{-1}$  a  $1026.23\text{ cm}^{-1}$  se relaciona a picos característicos de materiales que contienen en su composición celulosa, hemicelulosa y lignina (Asimbaya et al., 2015), específicamente el de  $1728.83\text{ cm}^{-1}$  y  $1605.61\text{ cm}^{-1}$  se ligan a enlaces carbonilos (Asimbaya et al., 2015; de Souza et al., 2019; Lin et al., 2020; Vieira et al., 2021) como ejemplo grupos cetonas, lactonas, quinonas y ácidos carboxílicos. Además, la señal de  $1374.11\text{ cm}^{-1}$  está relacionada con enlaces (C=O), pertenecientes a la celulosa (Mopoung & Dejang, 2021). Por otro lado, la señal de  $1242.60\text{ cm}^{-1}$  se vincula a enlaces (ν-CO) los cuales se encuentran en materiales que presentan lignina (Mopoung & Dejang, 2021). Por último, el enlace o señal de  $441.36\text{ cm}^{-1}$  en algunos casos se relaciona con estructuras de Si-(O-Si) y (Si-O) (Lin et al., 2020) lo que indicaría la presencia de Sílice.

### 3.3.5 Calor de combustión

Se determinó el calor de combustión para el endocarpio, para la mezcla (mesocarpio-endocarpio) y para el epicarpio de *Acrocomia* spp, en el cuadro 3.9 se observan los valores en MJ/kg.

**Cuadro 3.8.** Calores de combustión obtenidos para las fracciones analizadas del fruto de *Acrocomia* spp

Biomasa	Calor de combustión
Endocarpio	$(18.16 \pm 0.48)\text{ MJ/kg}$
Endocarpio - mesocarpio	$(17.98 \pm 0.52)\text{ MJ/kg}$
Epicarpio	$(17.11 \pm 0.14)\text{ MJ/kg}$

Al realizar un análisis de varianza por el método LSD de Fisher el endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) son estadísticamente iguales. Al comparar los valores obtenidos para el endocarpio de *Acrocomia* spp con los obtenidos por (César et al., 2015), el cual obtuvo un valor de  $18.34\text{ MJ/kg}$ , otros autores como (Ciconini et al., 2013) reportan un valor de  $21.57\text{ MJ/kg}$ , lo que proporciona un panorama del alto poder calorífico que presenta el endocarpio de *Acrocomia*; adicionalmente, si el endocarpio de *Acrocomia* spp se carboniza

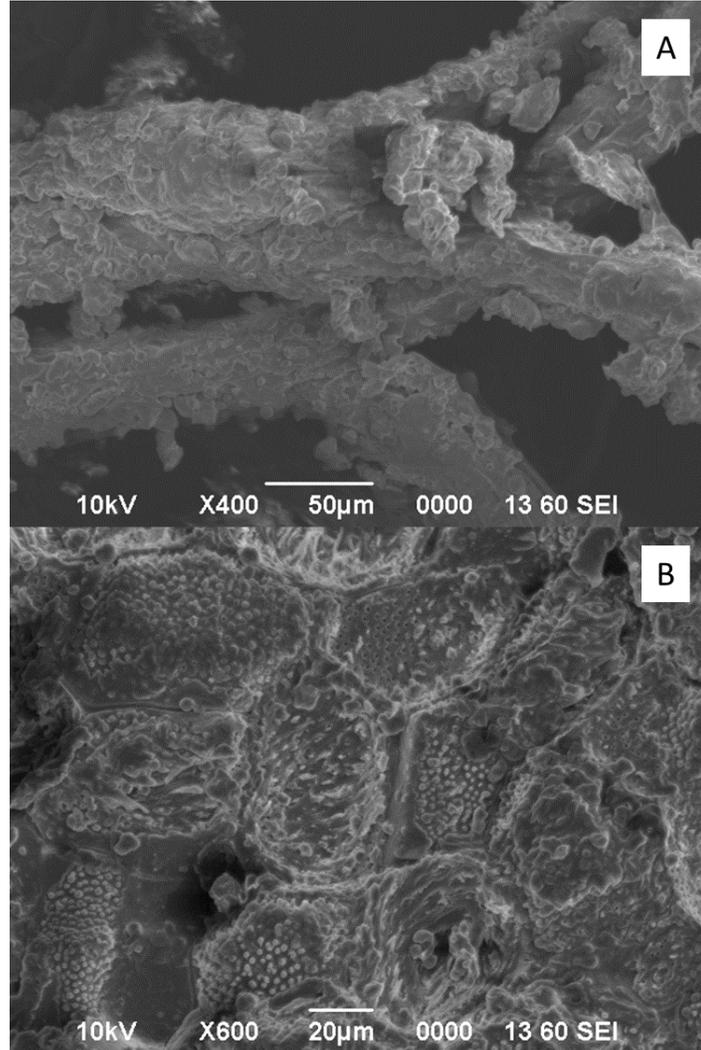
este alcanza un poder calorífico de 33.68 MJ/kg (Colombo et al., 2018). Por esta razón que se conoce como el carbón de la *Acrocomia*, ya que se emplea para procesos de Syngas (César et al., 2015).

Por otro lado, algunos valores de poder calorífico para el epicarpio de *Acrocomia* spp son 18.33 MJ/kg (César et al., 2015), que al compararlo con el obtenido obtenidos experimentalmente se demuestra que obtuvieron valores más bajos para el caso del epicarpio y esto está asociado a las características ambientales, del suelo y cuidado de la *Acrocomia* spp. Al comparar el poder calorífico de la *Acrocomia* con otras biomásas como aceite de girasol 7.12 MJ/kg (César et al., 2015), la torta de soya 9.21 MJ/kg (César et al., 2015), el aceite de palma 18.00 MJ/kg (César et al., 2015), la cáscara de coco 14.65 MJ/kg (César et al., 2015), la torta de ricino 18.84 MJ/kg (César et al., 2015c) el eucalipto 18.78 MJ/kg - 19.43 MJ/kg (César et al., 2015) y la cascarilla de café 17.8 MJ/kg (Herguedas & Taranco, 2012), se denota que el poder calorífico se encuentra dentro de biomásas con alta funcionalidad para procesos de pirólisis.

### **3.3.6 Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM)**

El estudio de Microscopía electrónica de barrido se realiza para estudiar la morfología de las muestras de endocarpio y la mezcla (endocarpio-mesocarpio) de *Acrocomia* spp (Köseoğlu & Akmil-Başar, 2015; Moura et al., 2018), como se representan en las figuras 3.8 y 3.9.

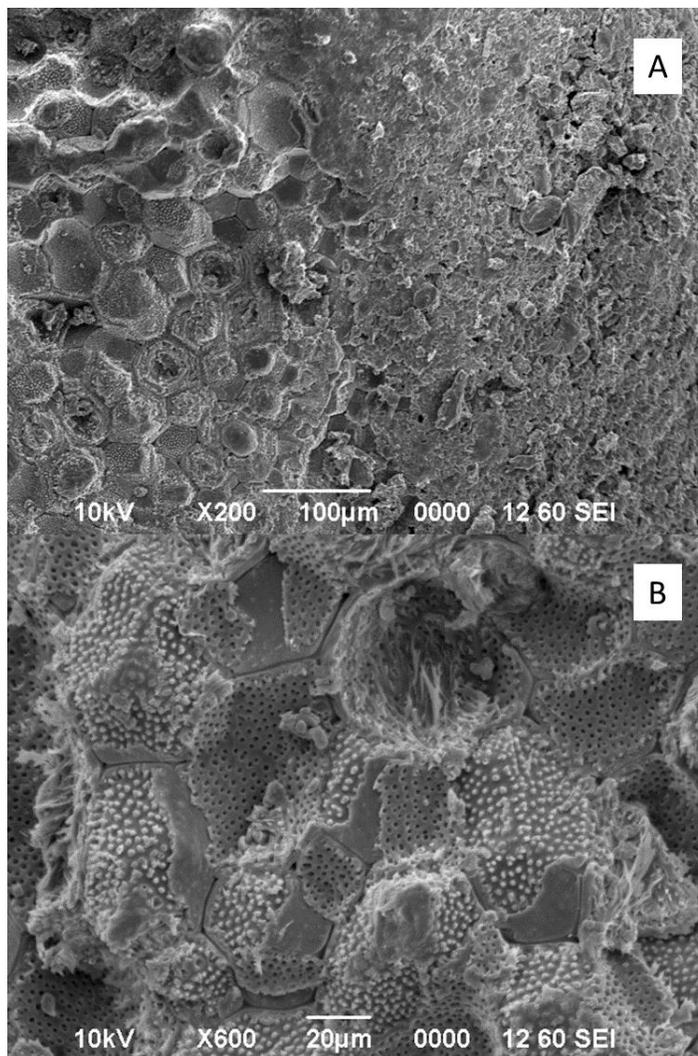
En la figura 3.8 se observa la muestra de mesocarpio mediante SEM, en donde se evidencia en la figura 3.8 A una estructura desigual y fibrosa, sin embargo, al realizar un aumento de la imagen (figura 3.8 B) se confirma la presencia de poros en la estructura y como se ha indicado anteriormente, la presencia de porosidad en la estructuras beneficia los procesos de adsorción.



**Figura 3.8** Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de mezcla (endocarpio-mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

En la figura 3.9, la cual corresponde al endocarpio de *Acrocomia* spp, es observa en la imagen A y B la presencia de estructuras en forma de “panal de abeja” la cual es similar a la reportada por Altino et al. (2017), Altino también indica en su investigación que no se observan porosidades, sin embargo, esto es diferente a la investigación actual la cual en donde claramente la figura 3.9 B evidencia una alta cantidad de poros definidos. Lo anterior concuerda con lo presentado por V. da Silva et al. (2017) y Vieira et al. (2021) los cuales poseen estructuras de endocarpio de *Acrocomia* con presencia de poros. Adicionalmente estos autores indican la variedad de formas y tamaños de poros que presenta la

microestructura del endocarpio de *Acrocomia*, tal como se observa en la figura 3.9 del estudio presente.

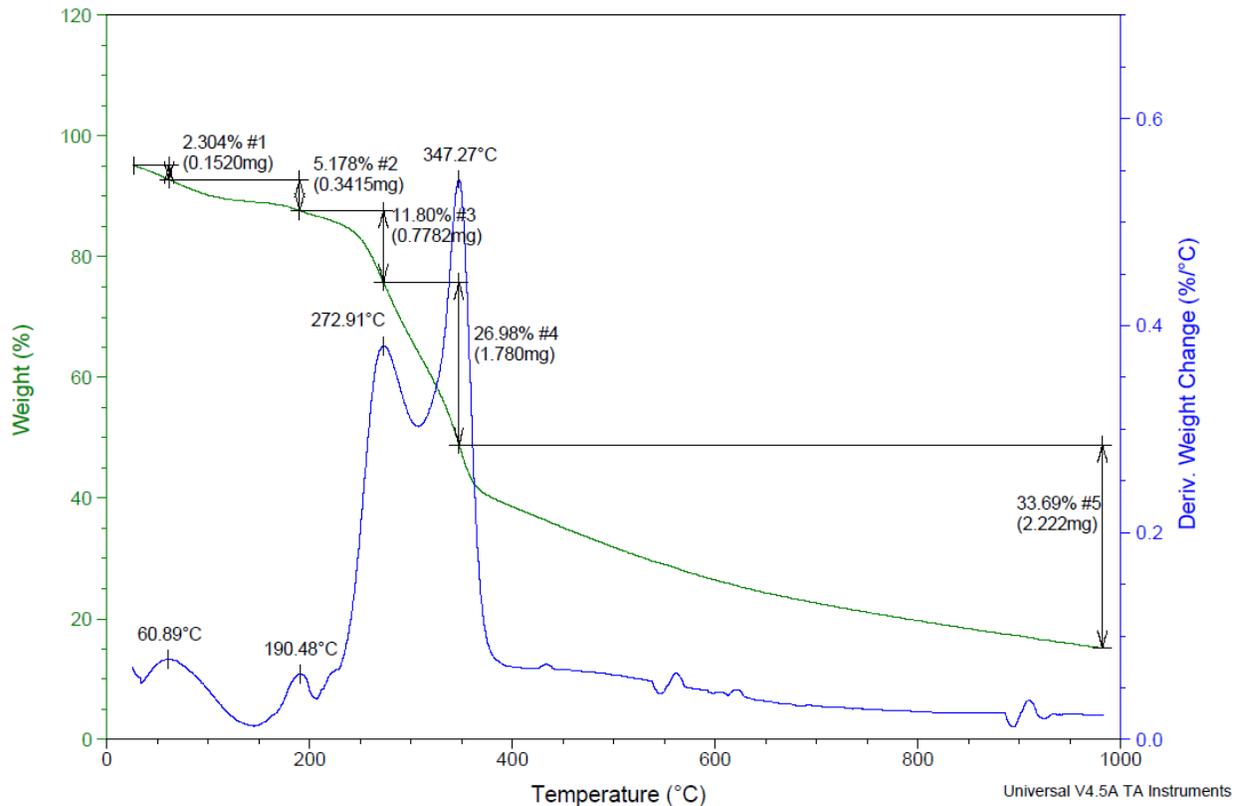


**Figura 3.9** Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Al realizar la comparación entre ambas estructuras se denota que el endocarpio posee una superficie más amplia y presencia de poros que la mezcla, lo que se traduce en que la muestra de estudio de endocarpio limpio posee una superficie más adecuada para el desarrollo de poros más definidos para la adsorción.

### 3.3.7. Análisis termogravimétrico (TGA)

A continuación, se presenta la figura 3.10 en donde se indica el diagrama termogravimétrico para una muestra de 6.5960 mg de endocarpio de *Acrocomia* spp.

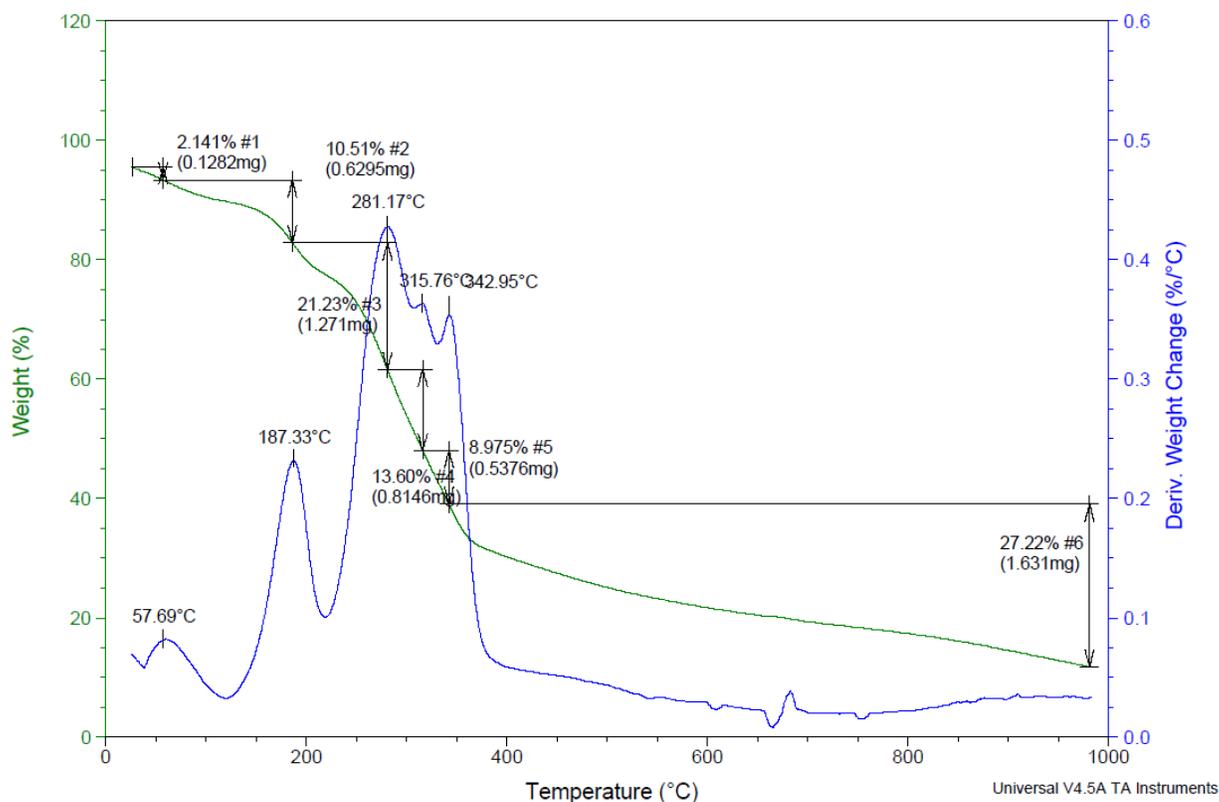


**Figura 3.10** Diagrama termogravimétrico para la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

A partir de la figura 3.7 se visualizan cuatro zonas en derivada del cambio de masa respecto a la temperatura, el primer pico es a 60.89 °C y el segundo a 190.48 °C los cuales se asocian al proceso de deshidratación de la muestra, luego en el pico de 272.91°C se da la despolimerización de la celulosa y hemicelulosa y posteriormente en 347.27 °C hasta el final, ocurre la degradación de la lignina (Vieira et al., 2021). Es importante resaltar, que al comparar el diagrama termogravimétrico anterior con el reportado por (Vieira et al., 2021) que corresponde a endocarpio, ambos coinciden en el tipo de curva obtenida; lo que evidencia que la degradación que sufre el endocarpio estudiado es similar con lo reportado por la

literatura. Adicionalmente, en la figura se observan los niveles de cambio de masa producto en cada una de las etapas antes mencionadas, en donde se observa un cambio de masa de 38.61 % entre 190.48 °C a 347.27 °C.

Posteriormente, se presenta en la figura 3.11 en donde se indica el diagrama termogravimétrico para una muestra de 5.9900 mg de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp.



**Figura 3.11** Diagrama termogravimétrico para la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

En el caso de la figura 3.8, como la muestra contiene remanentes de mesocarpio, se observa que el comportamiento es diferente al obtenido en el endocarpio completamente limpio, principalmente se denota que la zona de 187.33 °C a 342.95°C tiene picos poco definidos, esto asociado al proceso de degradación de la celulosa, hemicelulosa y lignina, adicionalmente en este comportamiento irregular puede asociarse al alto contenido de aceites

que presenta la mezcla que en esta zona comienzan a degradarse más activamente (Ospina Guarín et al., 2014). Específicamente según del Río et al. (2016) indica que, para el caso del aceite de mesocarpio, este presenta su degradación térmica entre (300-600) °C.

Por último, varios autores Ospina Guarín et al. (2014) y Vieira et al. (2021), indican que posterior a los 400 °C para ambas biomásas comienza el proceso de carbono fijo. Mediante el análisis anterior, se permite confirmar que para la producción de carbón activado es necesario, una temperatura superior a los 347.27 °C para el endocarpio solo y 342.95 °C para la mezcla para producir carbón.

### 3.3.8 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS)

En el cuadro 3.11 se indican los resultados obtenidos para el análisis elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre de la biomasa de endocarpio y de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

**Cuadro 3.9.** Resultados de análisis elemental realizado para dos tipos de biomásas, de endocarpio de *Acrocomia* spp y endocarpio con remanente de mesocarpio de *Acrocomia* spp.

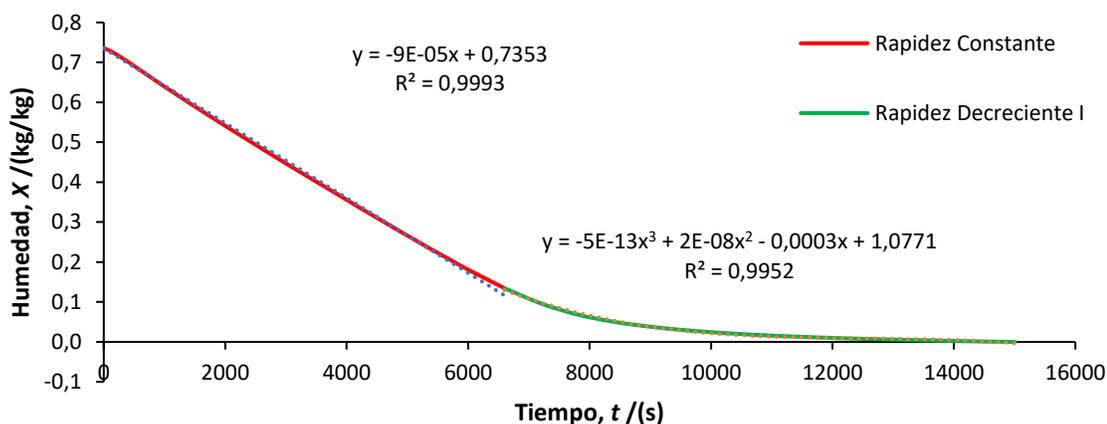
<b>Elemento analizado</b>	<b>Mezcla (endocarpio – mesocarpio) <i>Acrocomia</i> spp</b>	<b>Endocarpio de <i>Acrocomia</i> spp</b>
C	(41 ± 3) %	(42 ± 3) %
H	(6.4 ± 0.5) %	(5.1 ± 0.7) %
O	(41 ± 2) %	(41 ± 3) %
N	(0.67 ± 0.07) %	(0.4 ± 0.1) %
S	< 25 ppm	< 25 ppm

Como se puede observar, ambas biomásas presentar un contenido similar de carbono, hidrógeno, oxígeno, y nitrógeno; y en el caso del azufre este se encuentra en cantidades muy bajas en ambas biomásas. Adicionalmente, al comparar estos resultados con los reportados por otros autores para diferentes biomásas empleadas para la producción de “biochar” se observan valores de 48.7 % de C, 5.5 % de H y 0.1 % de N (Ovelar et al., 2017) diferentes,

únicamente para el endocarpio el contenido de hidrogeno es similar y en el caso de Vieira et al. (2021), que reporta contenidos de endocarpio de *Acrocomia* spp de 48.27% C, 6.14 % H, 0.23 % N y 45.39 % O; se evidencia diferencia a lo obtenido por la investigación actual y por consiguiente la diferencia se atribuye a las condiciones ambientales y geográficas.

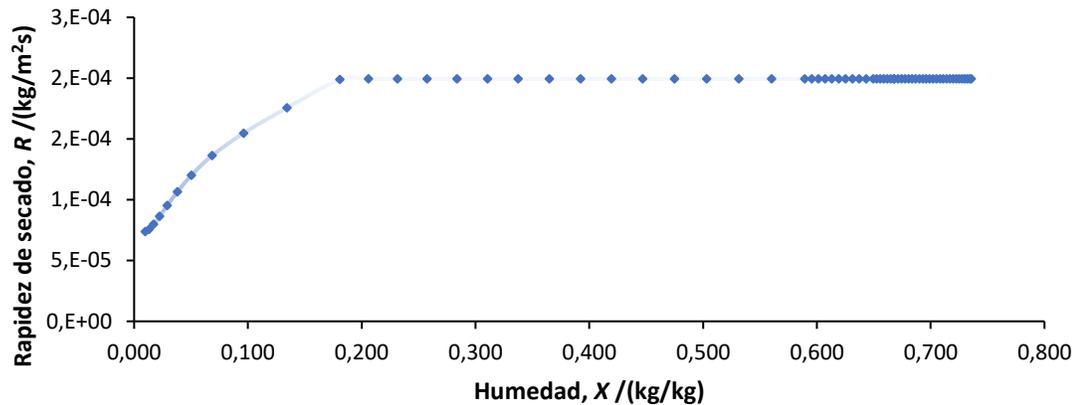
### 3.3.9 Curvas de secado

En la figura 3.12 que se observa a continuación, se presenta la curva de secado para la muestra de endocarpio en donde se obtiene como resultado 2 etapas de secado, la primera que corresponde a rapidez constante y la segunda que corresponde a rapidez decreciente. Es importante resaltar que la muestra de endocarpio al presentar un período tan amplio de rapidez constante significa que posee una alta cantidad de humedad no ligada la cual puede removerse.



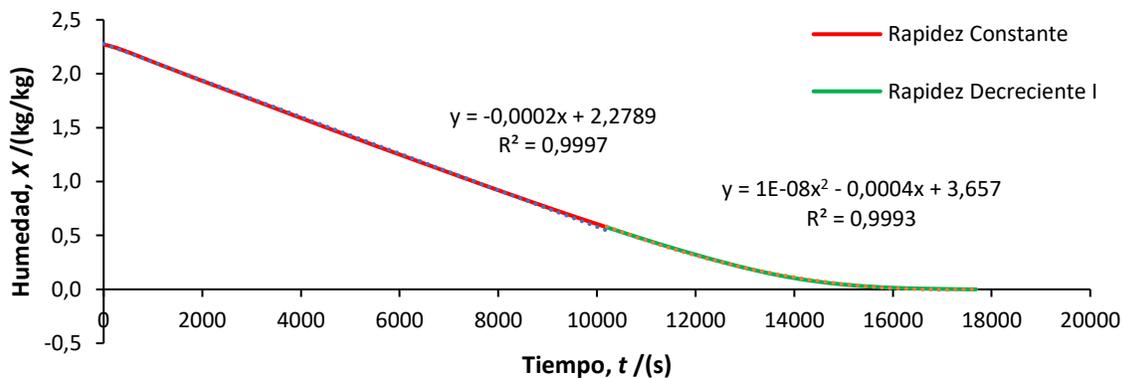
**Figura 3.12** Curva de secado para la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Se observa que para el caso de la rapidez constante se tiene un ajuste mediante una ecuación línea y para el caso de rapidez decreciente un polinomio de orden tres, por consiguiente, se procede a generar las curvas de rapidez de secado contra tiempo las cuales se muestra en la figura 3.13



**Figura 3.13** Rapidez de secado para la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

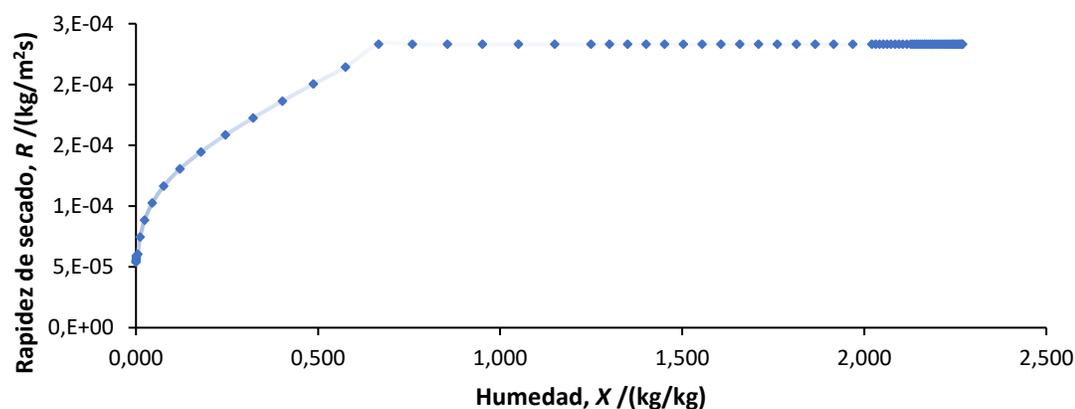
De ella se resalta que el  $x_c$  (humedad crítica) obtenido corresponde a 0,134 lo cual es un valor bajo para los datos que presentan autores como Ulate-Segura & Mata-Segreda, (2014), lo que implica que la muestra presenta poros que aumentan la resistencia por fricción a la movilidad del agua y esto propicia un  $x_c$  más bajo (Ulate-Segura & Mata-Segreda, 2014). Se realizó la curva para el caso de la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio) y se obtuvo la figura 3.14, en donde se observan dos zonas de secado para la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio), una la cual corresponde a rapidez constante (modelo lineal de ajuste) y la otra de rapidez decreciente I (modelo de polinomio de segundo grado para el ajuste).



**Figura 3.14** Curvade secado para la muestra mezcla (de endocarpio – mesocarpio)

*Acrocomia* spp.

Se construye la gráfica 3.15 a partir de la información de la anterior y se obtiene que para el caso de la mezcla (endocarpio – mesocarpio) el  $x_c$  asociado es de 0.576, adicionalmente se observa que le periodo de rapidez constante se mantiene durante varió tiempo y por ende afirmamos que la muestra de la mezcla (endocarpio – mesocarpio) presenta una gran cantidad de humedad no ligada.



**Figura 3.15** Rapidez de secado para la muestra de mezcla (endocarpio – mesocarpio)

*Acrocomia* spp.



## **CAPITULO 4. Producción de carbón activado a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp**

---

En este capítulo se exponen los criterios empleados para la selección de las condiciones de fabricación de carbón activado, el procedimiento realizado para su elaboración y las características obtenidas para este. Con el objetivo de determinar las condiciones para la fabricación de carbón activado a partir de *Acrocomia* spp, a ser empleado en la elaboración del filtro.

### **4.1 Materiales y Métodos**

#### **4.1.1 Materiales y Equipos**

El material utilizado para la elaboración del carbón activado corresponde a las dos muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp. Ambas muestras se encuentran molidas. Adicionalmente los equipos empleados corresponden a una Balanza Analítica AS 220.R2 PLUS; Estufa Fisherbrand™; Mufla Thermolyne Thermo Scientific; Microscopio electrónico de barrido S-3700N; espectrofotómetro infrarrojo con transformada Fourier FT-IR Nicolet iS50 Thermo Scientific. Entre los reactivos empleados se tuvo azul de metileno y ácido fosfórico.

### **4.2. Producción de carbón**

#### **4.1.1 Fabricación de carbón activado**

El proceso de fabricación de carbón activado a partir de las muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp, inició con la selección de las condiciones de producción; para ello se delimito que se requiere conocer la razón de impregnación, tipo de activante, tiempo de activación, temperatura de carbonización y tiempo de carbonización. Para la investigación actual se seleccionó la activación química, principalmente por el alto valor de superficie de adsorción que presenta en diferentes investigaciones de acuerdo con el cuadro E1 (apéndice E). Para definir las diversas condiciones necesarias para la fabricación se realizó una búsqueda bibliográfica de los

diferentes métodos de fabricación empleando diferentes tipos de biomásas; el cuadro E1 resume estas condiciones. Con base en el cuadro E1, se decidió que las condiciones que se fijarían de la bibliografía de acuerdo con los resultados presentados por los autores, estas condiciones serían: la razón de activación, concentración del activantes, tipo de activante y tiempo de activación.

El activante seleccionado fue el ácido fosfórico, esta decisión se fundamentó en los múltiples estudios que demuestran que entre las ventajas que presenta este en comparación a otros, es que la temperatura de activación requerida es relativamente más baja (menor a 600 °C) que para otros activantes tales como el  $K_2CO_3$  el cual emplea temperaturas superiores a 700 °C (Köseoğlu & Akmil-Başar, 2015), otra ventaja es que presenta un precio más bajo de producción y un menor impacto ambiental que el  $ZnCl_2$  (F. Zhang et al., 2021). Además, el ácido fosfórico es que induce un proceso de descomposición en la biomasa específicamente en el material lignocelulósico, además de promover la despolimerización, hidratación y redistribución de los biopolímeros a grupos alifáticos y aromáticos (de Souza et al., 2019; Heidarinejad et al., 2020) lo que genera una mejor porosidad en los materiales carbonosos. Por consiguiente, se decide utilizar el ácido fosfórico como activante para el proceso de producción de carbón activado.

La razón de activación se definió con relación a los resultados mostrados por Duan, Feng, et al. (2021) en donde se varió la razón de impregnación y se expuso que una razón de 1:1 m/m presenta un valor superior de área superficial de poro que relaciones inferiores de impregnación, adicionalmente, no se empleó una relación de impregnación superior dado que estudios previos realizados indican que no es una variable significativa en el rendimiento (Montenegro Quesada et al., 2021).

La concentración del ácido fosfórico se seleccionó mediante la revisión bibliográfica correspondiente al cuadro E1, en donde se exhibe que concentraciones inferiores al 85 % v/v propician que el rendimiento del carbón disminuya (Solís Fuentes et al., 2012) y para el caso del tiempo de impregnación la bibliografía es más homogénea y la mayoría de los autores emplean un tiempo de 24 h para propiciar que el activante penetre toda la biomasa.

Adicionalmente, con el objetivo de mejorar esta impregnación se adicionan 10 mL de agua por cada g de biomasa, para facilitar la impregnación del activante en la matriz.

Por último, para las variables de temperatura de carbonización y tiempo de carbonización, dada la variedad de resultados que existen, se procedió al diseño de un factorial  $2^2$  con 3 repeticiones y 3 puntos centrales, los puntos centrales del factorial corresponden a 500 °C y 1.5 h. Como variable respuesta se va a determinar la remoción de azul de metileno por g de carbón activado (Qf). En el caso de la capacidad de adsorción, se añadirá a cada carbón activado sintetizado a una disolución de 50 mL de azul de metileno a 400 ppm para observar cuanto adsorbe (Montenegro Quesada et al., 2021).

En el cuadro 4.1, se muestra el diseño factorial empleado. Este diseño factorial se aplicó para cada una de las biomásas empleadas y se seleccionó como variable de respuesta los mg de azul de metileno removidos entre g de carbón activado empleados.

**Cuadro 4.1** Factores y niveles a estudiar en el factorial  $2^2$  y el punto central estudiado

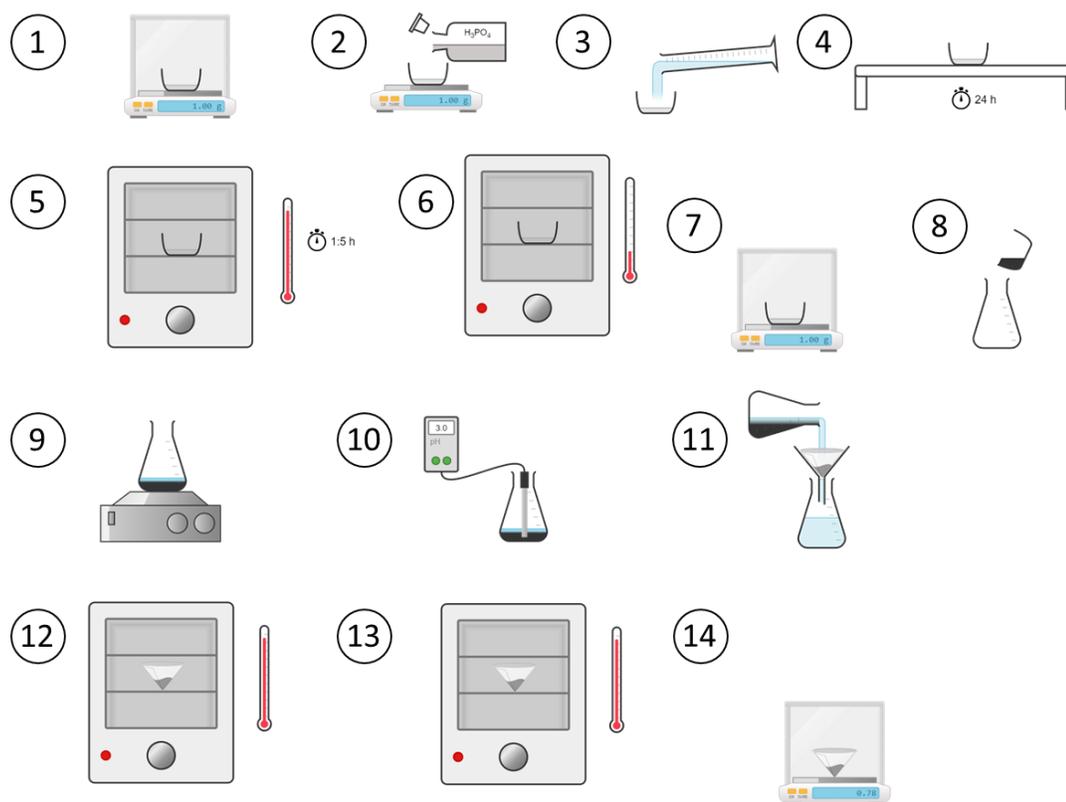
<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>	<b>Punto Central</b>
Temperatura de carbonización	450 °C	550 °C	500 °C
Tiempo de carbonización	1.0 h	2.0 h	1.5 h

A partir de las condiciones definidas, la metodología empleada para la elaboración del carbón activado consiste en: tomar 1 g de biomasa de endocarpio o mezcla (endocarpio – mesocarpio), mezclar en una capsula de 100 mL de porcelana con 1 g de ácido fosfórico al 85% v/v y 10 mL de agua. Luego, se deja reposar por 24 h, y pasado el tiempo de impregnación se colocó en una mufla por un tiempo y temperatura según corresponda a la corrida del factorial. Una vez obtenido el carbón activado se procedía a dejar enfriar la cápsula de porcelana dentro de la mufla hasta alcanzar temperatura ambiente ( $22 \pm 2$ ) °C. Posteriormente se pesaba el carbón obtenido en la cápsula; luego se prosiguió con los lavados del carbón.

Para el caso de los lavados y la remoción del ácido fosfórico remanente se aplicaron diferentes metodologías en donde se incluyó utilizar agua caliente sin agitación, agua caliente con agitación, agua a temperatura ambiente ( $22 \pm 2$ ) °C sin agitación y agua ( $22 \pm 2$ ) °C con agitación. Se determinó utilizar agua a ( $22 \pm 2$ ) °C con agitación ya que exhibe un menor requerimiento de agua destilada para realizar los lavados y no implicaba un coste energético, producto del calentamiento.

La metodología de los lavados consistió en trasladar el carbón activado sintetizado de una capsula de porcelana a un Erlenmeyer de 250 mL el cual fue pesado previamente. Luego se añadió 100 mL de agua destilada y se colocó a agitar en un “Shaker” a 240 revoluciones por minuto (rpm) durante 1 h. Concluida la hora se mide el pH y el proceso se repite las veces necesarias para alcanzar un pH neutro (aproximadamente 7). Como resultado se obtuvo aproximadamente que el agua destilada requerida es de 1 L o superior dependiendo de la corrida de carbón activado. Posteriormente, al alcanzar un pH cercano a 7 se procede a filtrar el carbón activado y a secarlo por un período de 24 h en una estufa a 105 °C (Montenegro Quesada et al., 2021).

A continuación, en la figura 4.1 se observa un diagrama de los pasos realizados para la elaboración del carbón activado.



**Figura 4.1** Diagrama de proceso de fabricación de carbón activado de *Acrocomia* spp

Una vez seleccionadas las condiciones de fabricación, se realizó un “batch” de 500 g para cada una de las muestras estudiadas, con el objetivo de caracterizar el carbón activado obtenido y fabricar los filtros. Esta producción se llevó a cabo en el laboratorio de química de la Universidad Técnica Nacional (UTN) ubicada en Alajuela.

#### 4.2.2 Curva de calibración

La cuantificación de los mg de azul de metileno por g de carbón activado ( $Q_f$ ) se llevó a cabo mediante la elaboración de una curva de calibración empleando como patrón diferentes soluciones de azul de metileno. La curva se elaboró tomando 10 puntos los cuales corresponden a concentraciones de 1 ppm a 10 ppm. Para preparar cada disolución empleada en la curva se elaboró una disolución madre de 1000 ppm y posteriormente se realizaron disoluciones en balones de 25 mL

Las concentraciones empleadas corresponden a 1 ppm a 10 ppm, por lo que se tienen 10 patrones de azul de metileno. Para la elaboración de las disoluciones patrón se fabricó una disolución madre de 1000 ppm, posteriormente se realizaron disoluciones en balones de 25 mL para obtener los diferentes patrones. Una vez se obtuvieron los patrones, se procedió a realizar un barrido en el espectrofotómetro UV-visible para tener certeza de a que longitud de onda adsorbía de manera máxima lo cual se obtuvo a 675 nm. Los patrones elaborados se cuantificaron a 675 nm y se elaboró una curva de ajuste mediante la herramienta Excel.

### **4.3. Pruebas de caracterización del carbón activado producido**

El carbón fabricado se caracterizó mediante determinación de humedad, FTIR, análisis de superficie (BET), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis elemental de carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre e hidrógeno (CHONS)

#### ***4.3.1 Porcentaje de Humedad del carbón activado.***

Se realizó la determinación de humedad en el NIA empleando muestras de carbón activado de endocarpio y de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp por triplicado; asimismo este procedimiento se llevó a cabo empleando la ASTM D2867-17 “Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon”. El análisis se realizó empleando una balanza de humedad; en donde se taró el plato de aluminio y se procedió a añadir aproximadamente 1 g de la muestra. El equipo se programa para que detuviera el programa de secado al alcanzar como masa constante una variación inferior a 1 mg durante 1 min.

#### ***4.3.2 Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)***

Se tomaron las muestras del carbón activado producido a partir de endocarpio y mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomis* spp, y se molieron en un mortero hasta alcanzar un particulado de 45  $\mu\text{m}$  o menos. Posteriormente se vertió el polvo (aproximadamente 1 mg en el muestreador de célula de diamante y empleando un rango de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ , con 32 barridos por muestra y una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  al 100% de transmitancia. Los espectros se procesaron con el programa OMNIC<sup>TM</sup> Specta Software Series 9 v9.8 (Hernández Chaverri et al., 2022). El análisis se llevó a cabo en el Núcleo Instrumental de Análisis (NIA) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED).

#### ***4.3.3 Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplado con EDS.***

El análisis de la morfología se efectuó a muestras de carbón activado obtenido de endocarpio y mezcla. Todas estas muestras fueron colocadas en la base metálica y se ajustó las muestras con cinta de doble contacto (Hernández Chaverri et al., 2022). Este análisis fue realizado en el Centro de Investigaciones en Estructuras Microscópicas (CIEMIC) (1226 msnm). Una vez concluido el análisis de microestructura las muestras se les aplicó un EDS para conocer los elementos mayoritarios de la zona estudiadas. Para ello se empleó un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3700N con detector de rayos X IXRF Systems.

#### ***4.3.4 Análisis de área superficial BET***

El análisis de superficie fue realizado en la Escuela de Química de la UCR, aplicando el uso de una línea de vacío para medición de adsorción a temperaturas criogénicas, sistema construido por la Escuela de Química. Los criterios técnicos fueron realizados con base en el artículo de Walton & Snurr (2007). Posteriormente se colocó la muestra en la línea y se procedió a inyectar el flujo de nitrógeno, para luego determinar el área superficial del carbón.

#### ***4.3.5 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS)***

El análisis elemental se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, empleando un equipo de Thermo Scientific Flash Smart. Este estudio se realizó para muestras de carbón activado de endocarpio, carbón activado de mezcla y carbón activado comercial; las tres muestras se molieron con un mortero para su análisis. Para la determinación del carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se realizó una curva de calibración empleando 2,5-bis(5-terc-butil-2-benzo-oxazol-2-il) tiofeno (BBOT) y para el caso del oxígeno se utilizó ácido aspártico (Montenegro Quesada et al., 2021). El procedimiento para el análisis elemental se basó en la ISO 16948:2015 (Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR], 2015).

## 4.4 Resultados y Discusión

### 4.4.1 Resultados obtenidos para el estudio de capacidad de adsorción y rendimiento para el carbón activado fabricado.

En el cuadro 4.2 se presentan los resultados obtenidos para las condiciones de fabricación propuestas a partir del diseño experimental factorial. Es importante remarcar que el rendimiento obtenido corresponde al rendimiento posterior al proceso de lavado, adicionalmente, la variable respuesta corresponde a los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado donde se obtuvo un ( $R^2$ ) de 0.9976, lo que indica un excelente ajuste de los datos al modelo. El Qf representa los mg removidos de azul de metileno por g de carbón activado.

**Cuadro 4.2** Resultados obtenidos de rendimiento, porcentaje de remoción y mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado para los carbones activados fabricados a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Tratamiento	Temperatura / (°C)	Tiempo de carbonización / (h)	Rendimiento / (%)	Remoción / (%)	Qf / (mg/g)
1	550	1.0	54.4 ± 4.5	55.0 ± 5.2	25.25 ± 0.47
2	550	2.0	48.0 ± 2.9	91.3 ± 7.8	42.93 ± 2.26
3	450	2.0	58.9 ± 4.8	95.2 ± 6.3	31.95 ± 1.31
4	500	1.5	36.9 ± 0.6	99.5 ± 0.1	50.60 ± 2.27
5	450	1.0	55.1 ± 6.3	82.4 ± 10.6	30.82 ± 5.77

En términos del rendimiento obtenido, el tratamiento que favorece dicha variable es una temperaturas de 450 °C y tiempo de carbonización de 2 h presenta el valor más alto el cual corresponde a 58,9% ± 4,8%. Asimismo, los valores obtenidos para los diferentes tratamientos al compararlos con autores como (Serrano Guerrero, 2019; F. Zhang et al., 2021), se observa que los rendimientos se encuentran dentro del rango reportado por ellos (35% a 70 %). Para el caso del porcentaje de remoción, los autores emplean como variable

para determinar la capacidad de adsorción el área superficial del carbón activado y no prueban mediante la adsorción de una sustancia, por lo que no se puede comparar la capacidad de adsorción obtenida con la presentada por los autores. Asimismo, en términos de remoción de mg de azul de metileno por g de carbón activado, los tratamientos de 500°C a 1.5 h fueron los que obtuvieron mejores resultados. Con el objetivo de determinar las condiciones favorables para la fabricación del carbón activado, se procedió a realizar un análisis de varianza para diseño factorial propuesto. Este análisis de varianza emplea como variable respuesta los mg de azul de metileno por g de carbón activado, esto debido a que el rendimiento y el porcentaje de remoción son variables dependientes de la cantidad de carbón. En el cuadro 4.3 se presentan los resultados obtenidos mediante el software Minitab para el análisis de varianza efectuado al factorial.

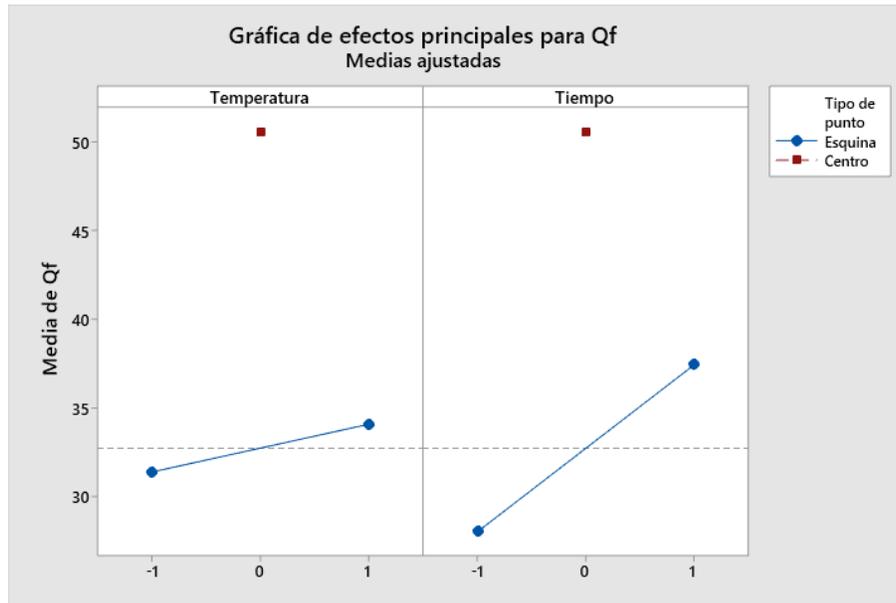
**Cuadro 4.3** Resultados para el análisis de varianza obtenido para el diseño factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por grama de carbón activado.

<b>Efecto o Interacción</b>	<b>Valor p value</b>
Temperatura	0.152
Tiempo*	<b>0.000*</b>
Temperatura y Tiempo*	<b>0.001*</b>

\*Corresponden a los valores significativos para el análisis de varianza

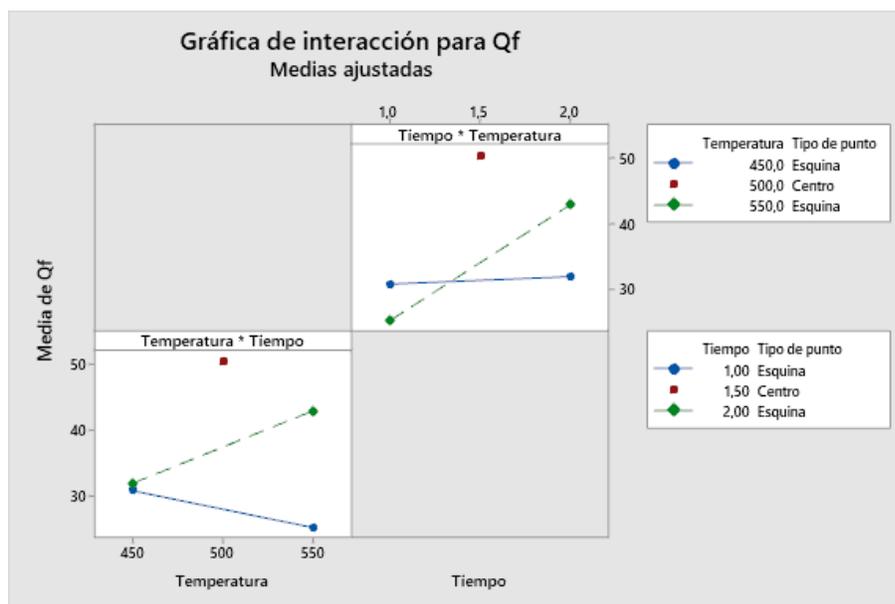
Cómo se observa en el cuadro 4.3, para el carbón activado fabricado a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp, se obtiene que los efectos significativos son el tiempo y la interacción doble entre la temperatura y el tiempo, por lo que se procede en el software de Minitab a generar las gráficas de efectos individuales e interacciones dobles. Asimismo, para el estudio de varianza se obtiene un ajuste del modelo con un  $R^2$  de 0.9326 lo que indica que el modelo obtenido ajusta los valores experimentales bastante bien. A continuación de muestra el modelo de ajuste:

$$Qf = 129.3 - 0.2213 A - 73.4 B + 0.1655 A * B + 17.86 PT \text{ central} \quad (13)$$



**Figura 4.2** Gráfica de efectos principales para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

Como se observa en la figura, para el caso del efecto del tiempo, el cual según el análisis de varianza es el que presenta significancia, se debe de utilizar un valor en nivel (0) el cual corresponde a el punto central estudiado durante el diseño experimental. Este nivel, representa un tiempo de 1.5 h para la carbonización del carbón activado generado a partir de endocarpio. Adicionalmente, en la figura 4.3 se visualiza la gráfica de interacciones dobles.



**Figura 4.3** Gráfica de interacciones para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

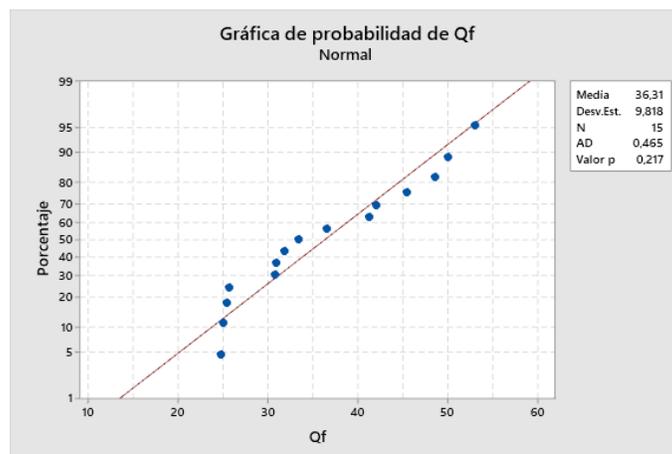
A partir de la figura 4.3 se denota que para el caso de la interacción doble temperatura-tiempo es necesario trabajar en un nivel de (0) con el objetivo de tener una mayor remoción de mg de azul de metileno por g de carbón activado. Adicionalmente, a partir de la figura 4.3, se evidencia que esta presenta una curvatura y, por lo tanto, se traduce en que el sistema no se encuentra en un plano. Con objetivo de encontrar el punto donde se aumente la variable respuesta, se utilizó Minitab para aumentar la variable respuesta la cual corresponde a los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado y se obtuvo los resultados que se presentan en el cuadro siguiente.

**Cuadro 4.4** Determinación de los mg de azul de metileno adsorbidos por g de carbón activado para el análisis de varianza realizado.

Soluciones	Temperatura/ (°C)	Tiempo / (h)	Qf ajustado / (mg/g)	Deseabilidad Individual
1	500	1.5	50.60	0.92
2	550	2	42.93	0.64
3	450	2	31.95	0.25
4	450	1	30.82	0.22
5	550	1	25.25	0.02

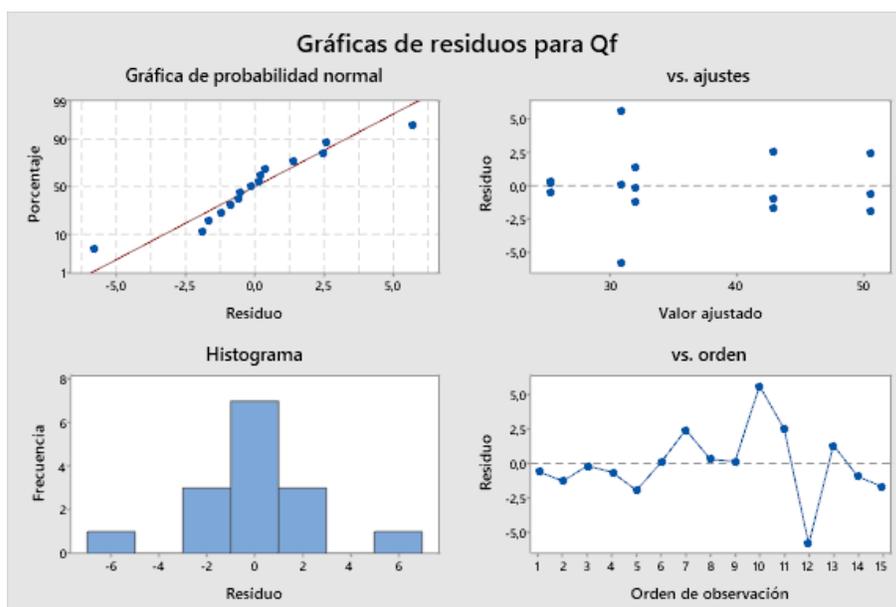
A partir del cuadro anterior, se selecciona la solución 1, dado que la deseabilidad individual, la cual evalúa una configuración que aumente la respuesta individual, indica que ha 500 °C y a 1.5 h se obtiene el carbón activado con la mejor remoción de mg de azul de metileno por g de carbón activado. Se resalta, que según el criterio de Rudnykh & López-Ríos (2018) el valor de deseabilidad se considera aceptable y excelente.

Adicionalmente, para dar veracidad a los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico se realiza una prueba de normalidad como se observa en la figura 4.4, en donde se evidencia mediante el valor de p-value que los datos son normales.



**Figura 4.4** Gráfica de normalidad para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de endocarpio de *Acrocomia*

Asimismo, se analizaron los supuestos de independencia y varianza constante, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.5; para el caso de los residuos vs valor ajustado se aplicó adicional a la figura la prueba de Barlett en donde se obtuvo un p-value de 0.068 el cual es mayor a 0.05 por lo que confirma el supuesto de varianza constante. En el caso de independencia a partir de la figura se indica que no existe una tendencia apreciable y por ende se confirma el supuesto de independencia.



**Figura 4.5** Gráfica de supuestos de normalidad, independencia y varianza constante para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de endocarpio de *Acrocomia*

Similarmente, para la otra muestra de mezcla de *Acrocomia* spp, se observa en el cuadro 4.5 los resultados obtenidos para el factorial evaluado empleando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

**Cuadro 4.5** Resultados obtenidos de rendimiento, porcentaje de remoción y mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado para los carbones activados fabricados a partir de mezcla (endocarpio -mesocarpio) de *Acrocomia* spp.

Tratamiento	Temperatura / (°C)	Tiempo / (h)	Rendimiento / (%)	Porcentaje de Remoción / (%)	Qf (mg/g)
1	550.0	1.0	43.3 ± 2.75	94.4 ± 2.85	25.16 ± 1.89
2	450.0	2.0	31.4 ± 1.55	88.3 ± 2.31	31.94 ± 1.05
3	550.0	2.0	40.1 ± 7.16	97.2 ± 4.18	29.00 ± 6.45
4	450.0	1.0	44.1 ± 1.13	84.2 ± 7.52	23.34 ± 3.59
5	500.0	1.5	28.7 ± 1.89	80.7 ± 4.38	30.83 ± 1.48

Los resultados anteriores muestran que los rendimientos son significativamente menores que los de la muestra de endocarpio, y por ende indica que el endocarpio con presencia de mesocarpio tiene un menor rendimiento en la fabricación de carbón. Adicionalmente, se realizó el análisis de varianza el cual se muestra en el cuadro 4.6, que se observa a continuación.

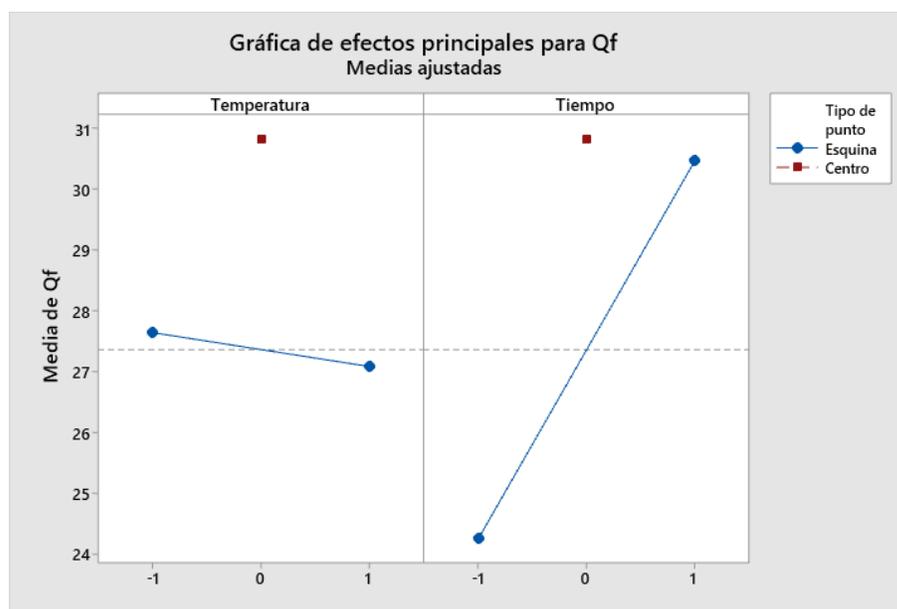
**Cuadro 4.6** Resultados para el análisis de varianza obtenido para el factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

Efecto o Interacción	Valor p value
Temperatura	0.788
<b>Tiempo*</b>	<b>0.012</b>
Temperatura y Tiempo	0.266

Adicionalmente, el modelo de ajuste fue insatisfactorio ya que se obtiene un  $R^2$  de 0.5700; lo que implica que los datos no se ajustan al modelo, asimismo se presenta el modelo a continuación.

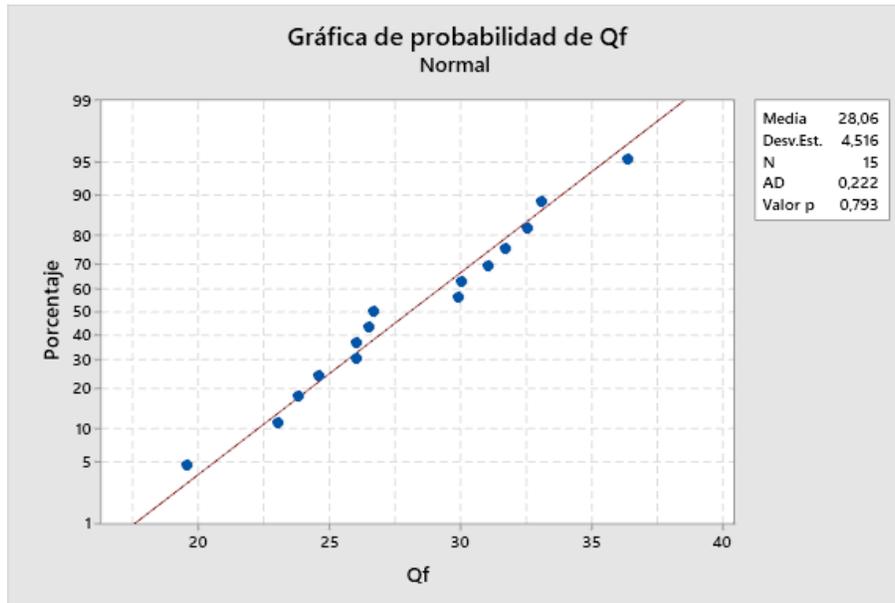
$$Qf = -14.9 + 0.0658 A + 30.0 B - 0.0476 aA * B + 3.47 PT \text{ central} \quad (14)$$

Adicionalmente, se estudiaron los efectos significativos para el análisis de varianza realizado, en donde se observó que para el caso del tiempo que es el efecto significativo este debe de trabajarse en el nivel medio para obtener una maximización de la variable respuesta. Cómo se observa en la figura 4.6.



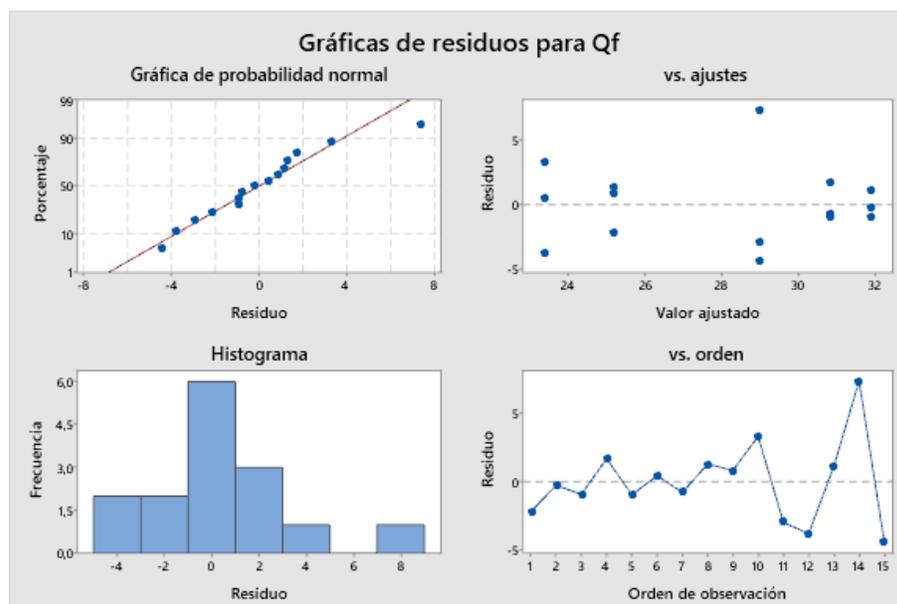
**Figura 4.6** Gráfica de efectos principales para el análisis de varianza realizado tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

Cabe resaltar que para el caso de la variable no significativa la cual corresponde a la temperatura, el nivel que se puede emplear para maximizar la respuesta deseada es el nivel (-1) el cual corresponde a una temperatura de 450 °C. Los supuestos para el modelo se observan a continuación. Para el caso de la normalidad de los datos referentes al Qf del carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) se obtuvo como se muestra en la figura 4.7 que el p-value obtenido es de 0.793 lo que implica que los datos son normales.



**Figura 4.7** Gráfica de normalidad para los datos de Qf asociados a la adsorción de carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp

Asimismo, a partir de la figura 4.8, en la cual se presentan los supuestos del modelo se observa que los tres se cumplen; específicamente para el caso de la varianza constante se aplicó la prueba de Barlett y se obtuvo un p-value mayor a 0.591.



**Figura 4.8** Gráfica de supuestos de normalidad, independencia y varianza constante para los datos de  $Q_f$  asociados a la adsorción de carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) de *Acrocomia* spp

Además, se observa que en el cuadro 4.7 el cual corresponde al aumento de la variable respuesta para el diseño experimental con puntos centrales realizado.

**Cuadro 4.7** Determinación de los mg de azul de metileno adsorbidos por g de carbón activado para el análisis de varianza realizado a la muestra de endocarpio - mesocarpio.

Soluciones	Temperatura / (°C)	Tiempo / (h)	$Q_f$ ajustado / (mg/g)	Deseabilidad Individual
1	450	2.0	31.93	0.73
2	500	1.5	30.83	0.67
3	550	2.0	29.00	0.56
4	550	1.0	25.16	0.33
5	450	1.0	23.34	0.22

Para el caso del aumento de la variable respuesta aplicada, se decide descartarla debido a que el valor de deseabilidad individual se encuentra por debajo de 0.8 y por lo tanto según Rudnykh & López-Ríos (2018), el ajuste no es “aceptable y excelente”, asociado a lo anterior se obtuvo un modelo con un  $R^2$  de 0.57 y el ajuste se encuentra de lo no aceptable reportado por Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar (2008), por consiguiente se procede a descartar las condiciones obtenidas mediante el diseño de experimento y emplear para la producción del carbón activado de endocarpio-mesocarpio las condiciones de fabricación del diseño de experimento de endocarpio. Estas condiciones corresponden a una temperatura de 500 °C y un tiempo de carbonización de 1.5 h.

Seleccionadas las condiciones de fabricación de carbón activado se procedió a efectuar el carbón activado para ambas muestras y se presenta a continuación los resultados obtenidos, asimismo se evaluó su remoción empleando azul de metileno.

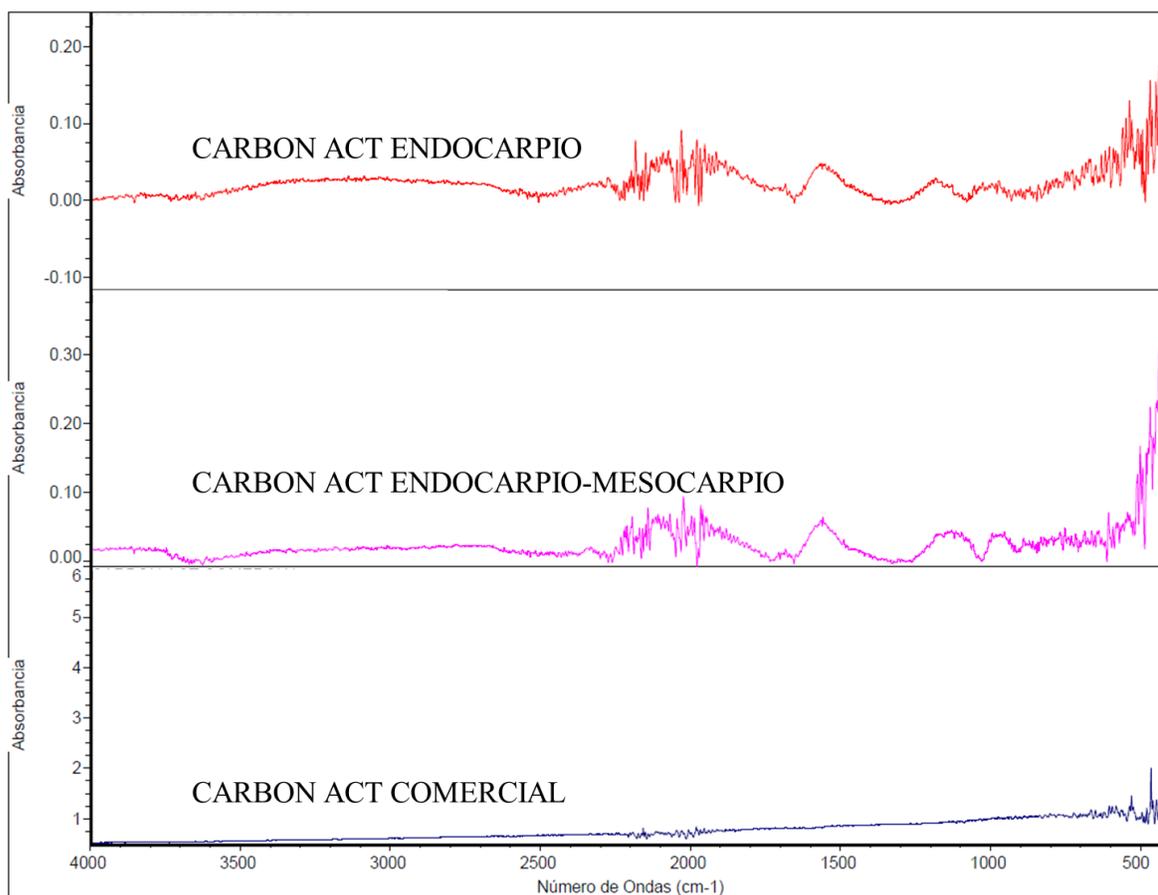
**Cuadro 4.8** Carbón sintetizado a las condiciones favorables de fabricación seleccionadas a partir del diseño factorial realizado.

Tipo de muestra	Biomasa /(g)	Carbón activado sintetizado /(g)	Qf /(mg/g)	Porcentaje de Humedad / (%)
Endocarpio - mesocarpio	1.03 ± 0.02	0.47 ± 0.05	42.45 ± 4.71	8.30 ± 0.94
Endocarpio	1.00 ± 0.01	0.45 ± 0.04	44.61 ± 4.28	4.59 ± 0.11

Se puede observar que ambas biomásas presentar valores cercanos de Qf, esto indica que las condiciones de fabricación seleccionadas permiten obtener carbones activado con rendimientos superiores al 40 % y Qf superiores a 40 mg/g. Adicionalmente, mediante un análisis de varianza, mediante el método de LSD Fisher se tiene que ambas carbones sintetizados presentan estadísticamente la misma capacidad de remoción para el azul de metileno.

#### 4.4.2 Resultados obtenidos de FTIR para los carbones activados producidos

A partir del carbón activado sintetizado mediante la metodología antes descrita se procedió a analizar mediante un FTIR la muestra de carbón proveniente de endocarpio “limpio” de *Acrocomia* spp y la muestra de carbón de endocarpio con remanentes de mesocarpio. Por consiguiente, en la figura 4.9 se observa acoplados los espectros para ambas muestras estudiadas de carbón.



**Figura 4.9** Espectro infrarrojo con Transformada de Fourier para las muestras de carbón activado sintetizado a partir de endocarpio, mezcla (endocarpio-mesocarpio) y carbón activado comercial.

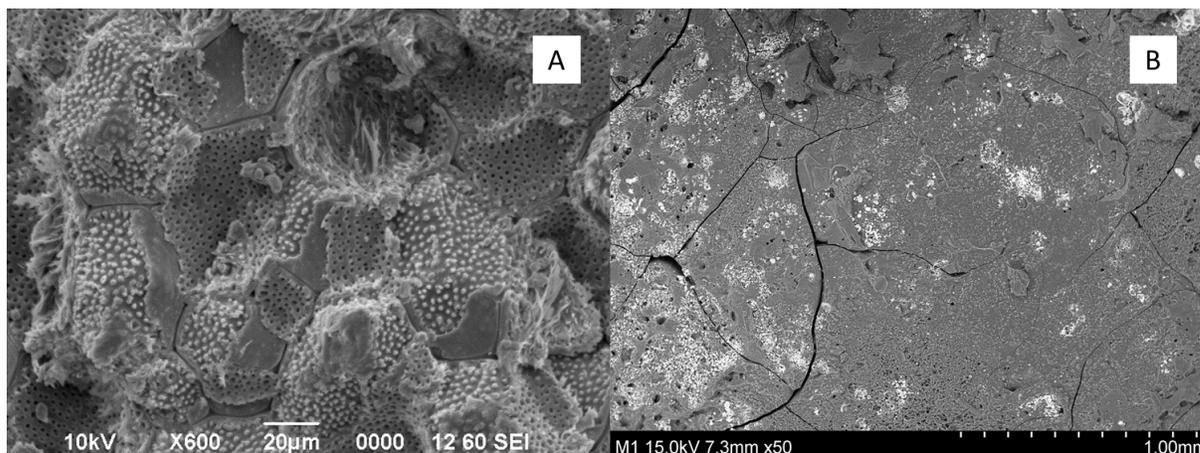
La figura 4.9 permite afirmar que no se observan picos asociados a grupos funcionales dentro de ambos espectros, esto es acorde a lo esperado para el carbón activado.

Adicionalmente, al comparar el espectro obtenido con el de la figura 3.4, se evidencia que los grupos funcionales antes presentes en las muestras estudiadas de endocarpio y endocarpio – mesocarpio, ya no se encuentran presentes debido al proceso de carbonización y por consiguiente debido a la descomposición de estructura lignocelulósica.

Al comparar el espectro de la figura 4.9 con el obtenido mediante la activación de endocarpio de *Acrocomia* spp con carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) (Vieira et al., 2021) se observa que el carbón sintetizado mediante la presente investigación no presenta grupos funcionales, sino que únicamente está constituido de enlaces C-C. Asimismo, si se compara el espectro del carbón activado sintetizado con el sintetizado a partir de otras biomás (Mopoung & Dejang, 2021; Nizam et al., 2021; G. Zhang et al., 2021), se evidencia que en el proceso de carbonización se genera una pérdida de los grupos funcionales. En el carbón activado sintetizado se observa que a diferencia de los obtenidos por otros autores este no presenta grupos funcionales visibles tales como O-H, C-O u otros, esto se explica al visualizar los espectros obtenidos por Gale et al. (2021) el cual muestra en su investigación que los procesos de pirolisis lento generan espectros de carbón activado sin grupos funcionales. Adicionalmente, al comparar los carbones activados de la presente investigación con el comercial se observan espectros similares.

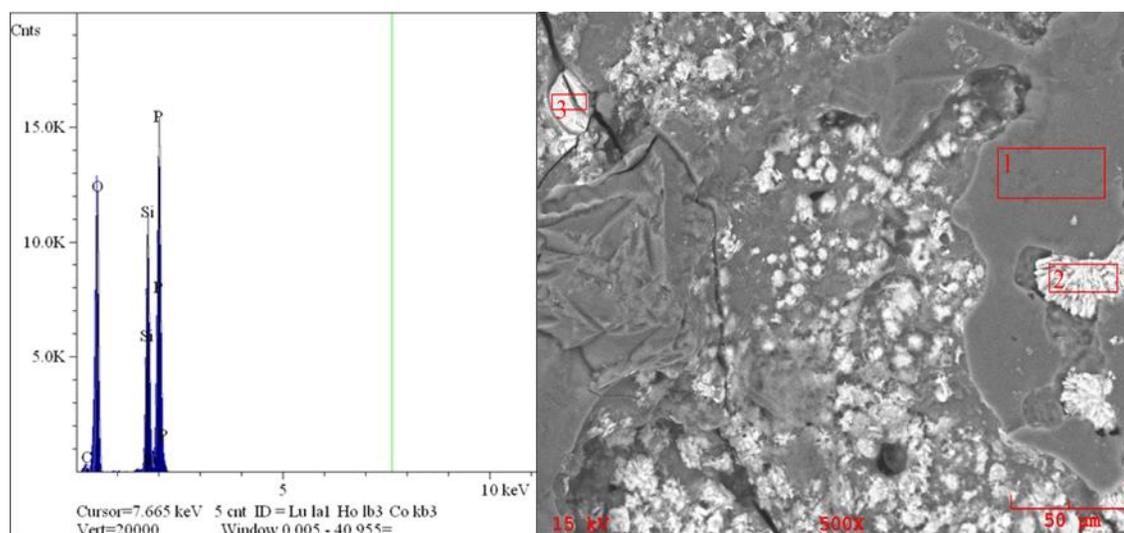
#### ***4.4.3 Resultados obtenidos de la morfología para los carbones activados producidos (SEM)***

Con base en la metodología antes descrita se obtuvo la morfología del carbón activado sintetizado a partir de endocarpio y endocarpio con remanente de *Acrocomia* spp, en la figura 4.10 se muestra el endocarpio (figura 4.10 A) y el carbón activado de endocarpio (figura 4.10 B). Al comparar ambas SEM se observa que la figura 4.10 B presenta grietas y agujeros producto del proceso de fabricación de carbón activado, lo que aumenta el área superficial de adsorción que presenta, adicionalmente se observa que varios de los poros se encuentran obstruidos por unos cristales.



**Figura 4.10** Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de carbón sintetizado de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Producto de la obstrucción de poros debido a los cristales que se observan en el SEM, se procedió a elaborar un EDS para conocer la procedencia de los cristales, la figura 4.11 indica los resultados obtenidos.

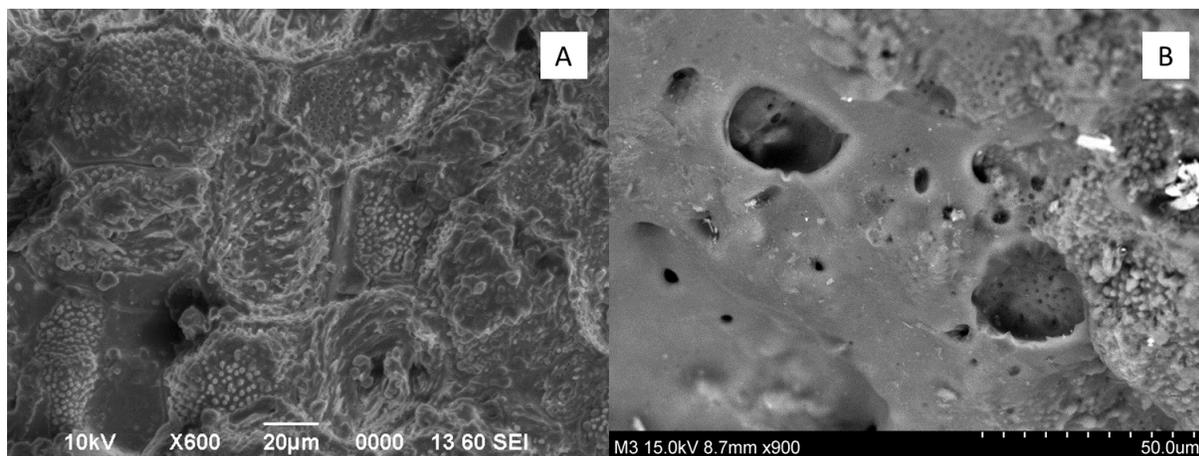


**Figura 4.11** EDS realizado a cristales presentes en el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Se observa según el EDS que los estructuras cristalinas que obstruyen los poros se encuentran constituidos por oxígeno, silicio y fósforo. El oxígeno (O) se atribuye a la

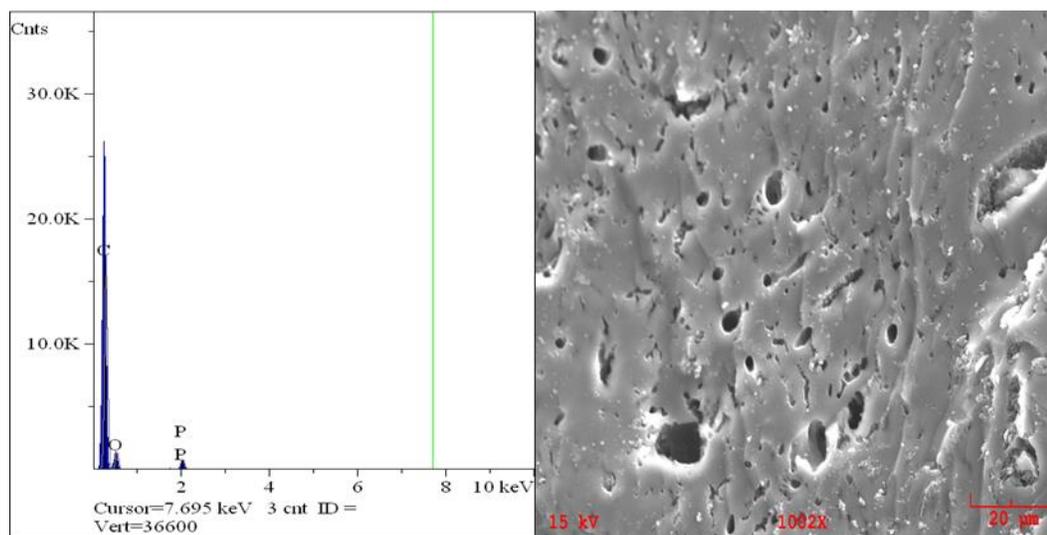
biomasa, el fósforo (P) al activante empleado el cual corresponde a ácido fosfórico concentrado y el silicio no representa un componente de la biomasa o del proceso. Por consiguiente, se asigna a un posible contaminantes durante el proceso de fabricación del carbón específicamente a las cápsulas empleadas.

En la figura 4.12 se indica la morfología del carbón sintetizado a partir de endocarpio-mesocarpio. En el caso de esta morfología, se logra observar en la figura 4.12 A la muestra previa al proceso de carbonización, en donde no se observa porosidad, sin embargo, posterior al proceso de fabricación de carbón activado la figura 4.12 B permite visualizar la formación de poros de diferentes tamaños en el carbón activado producido y esto implica que el carbón sintetizado presenta una amplia área de adsorción (G. Zhang et al., 2021).



**Figura 4.12** Estructura morfológica obtenida mediante micro espectroscopia electrónica de barrido (SEM) para las muestras de carbón sintetizado de endocarpio - mesocarpio.

Se realizó un análisis EDS para determinar si existen contaminantes dentro de los poros en la figura 4.13, se muestra los resultados obtenidos. Se observa que a diferencia del carbón sintetizado empleando únicamente endocarpio, este no presenta contaminantes, y su estructura esta únicamente compuesta por carbono (C), oxígeno (O) y fósforo (P) donde los primeros dos corresponden a la biomasa y el segundo al activante de ácido fosfórico empleado en el proceso de activación.

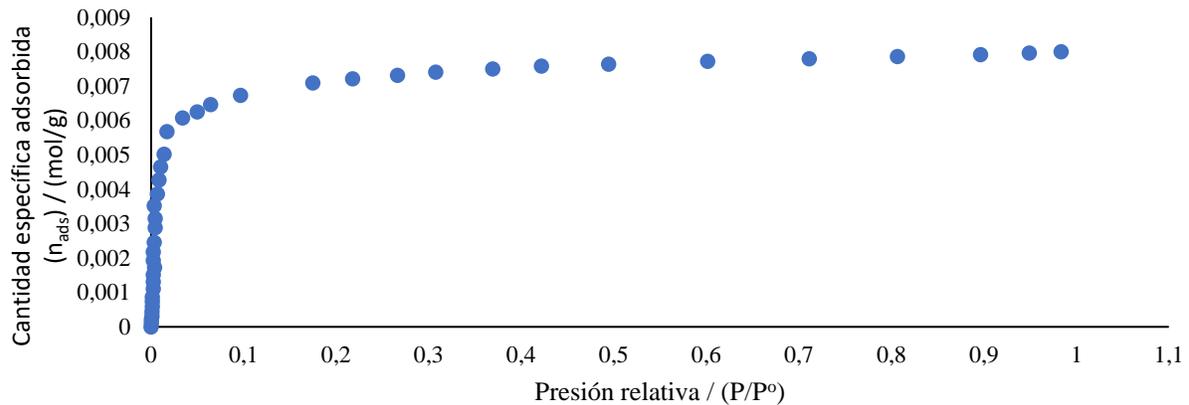


**Figura 4.13** EDS realizado a cristales presentes en el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio - mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Es importante resaltar la figura 4.10 y 4.12 corresponden a estructuras de carbón activado comparables con la de diversos autores como (Bag et al., 2020; Danish & Ahmad, 2018; Hajji Nabih et al., 2022; Vieira et al., 2021) principalmente porque todas las estructuras presentan poros desarrollados debido al proceso de carbonización.

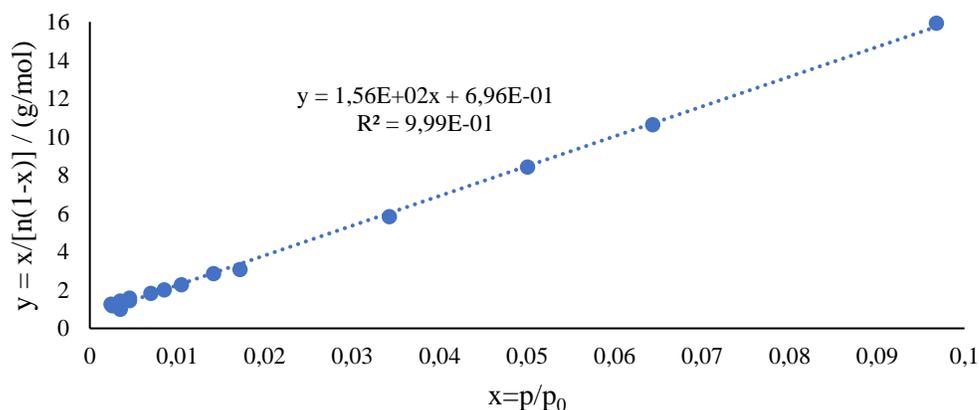
#### 4.3.4 Análisis de área superficial BET

La metodología empleada para el análisis de superficie mediante la técnica BET permitió caracterizar el tipo de adsorción y con esto delimitar los poros presentes en los carbones activados sintetizados a partir de las muestras de endocarpio y endocarpio - mesocarpio de *Acrocomia* spp. En la figura 4.14 se observa la isoterma de adsorción obtenida mediante la adsorción de Nitrógeno ( $N_2$ ) del carbón activado de endocarpio.



**Figura 4.14** Isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp.

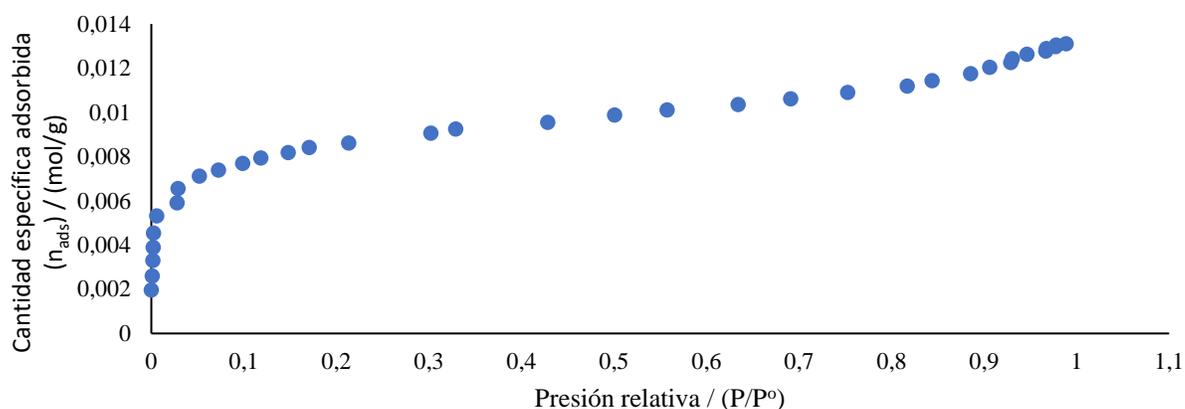
Al comparar la figura 4.14 con lo proporcionado por (Thommes et al., 2015) se observa que la isoterma presenta un comportamiento similar a una isoterma de tipo I. Esto implica que el carbón activado analizado presenta mayor cantidad de microporos anchos (menor o igual a 2 nm) y mesoporos estrechos. A partir de la isoterma de adsorción se generó un modelo lineal, el cual ajusta exitosamente la adsorción de gas en materiales sólidos, como es el caso del nitrógeno y el carbón activado (Hu et al., 2023).



**Figura 4.15** Linealización mediante modelo BET de la isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio de *Acrocomia* spp.

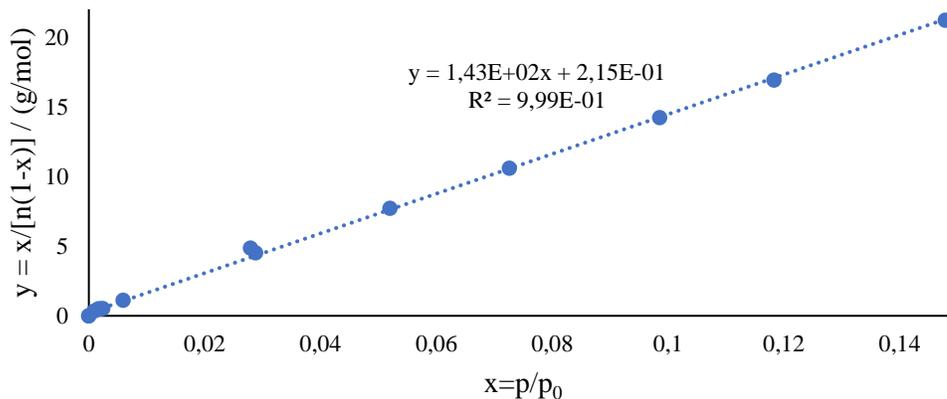
La linealización que se observa en la figura 4.15 fue desarrollada mediante la selección de los datos de la figura 4.14 (Walton & Snurr, 2007). Por consiguiente, se obtiene el valor de área superficial para el carbón activado estudiado y este valor corresponde a  $(669 \pm 7) \text{ m}^2/\text{g}$ .

Posteriormente se realiza el mismo procedimiento para el caso del carbón activado obtenido a partir de las muestras de endocarpio-mesocarpio. Los resultados de la isoterma de adsorción de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) presenta en la figura 4.16.



**Figura 4.16** Isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio con remanente de mesocarpio de *Acrocomia* spp.

La figura 4.16 según (Thommes et al., 2015) el comportamiento del carbón activado sintetizado es de tipo I y por consiguiente predominan los poros anchos y mesoporos estrechos igual que el carbón activado de endocarpio. Adicionalmente se realizó un modelo de ajuste mediante el modelo BET y este se presenta en la figura 4.17. Con base en el modelo BET linealizado de la figura 4.17 (Walton & Snurr, 2007), se obtiene un valor de área superficial de  $(683 \pm 6) \text{ m}^2/\text{g}$ .



**Figura 4.17** Linealización mediante modelo BET de la isoterma de adsorción de nitrógeno para el carbón activado sintetizado a partir de endocarpio con remanente de *Acrocomia* spp.

Bastidas et al. (2010) reporta un valor de 701.98 m<sup>2</sup>/g para endocarpio de coco empleando ácido fosfórico; de Souza et al. (2019) un valor de área superficial de 990.81 m<sup>2</sup>/g para semillas de acai y empleando como activante ácido fosfórico y Vieira et al. (2021) que utiliza endocarpio de *Acrocomia*, pero emplea carbonato de potasio como activante, en donde obtiene un valor de 1002 m<sup>2</sup>/g. Por lo tanto, el valor obtenido para ambos carbones se encuentra por debajo de los anteriores, pero es importante resaltar que en el estudio actual no se empleó atmósfera de nitrógeno durante el proceso de carbonización, por consiguiente, la diferencia entre los valores se atribuye a este efecto ya que la atmósfera de nitrógeno proporciona un ambiente inerte.

#### 4.3.5 Análisis Elemental de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHONS)

El análisis elemental realizado se muestra en el cuadro 4.9, en donde se observa que los valores de carbono presentes en el carbón activado de endocarpio y de endocarpio - mesocarpio aumentaron en relación con el presente en la biomasa representada en el cuadro 3.11. Esto indica que el proceso de activación y carbonización realizado permitió el incremento del carbono de las muestras. Principalmente en el análisis se visualiza que existió una transformación de grupos O e H en grupos C.

Adicionalmente al comparar el carbón activado sintetizado con el comercial se observa que el sintetizado presenta un mayor contenido de carbono, pero en los demás elementos los porcentajes se mantienen similares. Un contenido alto de carbono implica que mayor cantidad de la composición del material se transformó correctamente en carbón.

**Cuadro 4.9.** Resultados de análisis elemental realizado para dos tipos de biomazas, de endocarpio de *Acrocomia* spp y endocarpio - mesocarpio de *Acrocomia* spp.

<b>Elemento analizado</b>	<b>Carbón activado de endocarpio - mesocarpio</b>	<b>Carbón activado de endocarpio</b>	<b>Carbón activado comercial</b>
C	(75 ± 22) %	(72 ± 22) %	(64 ± 2) %
H	(2.0 ± 0.2) %	(1.6 ± 0.3) %	(1.9 ± 0.03) %
O	(14.4 ± 0.8) %	(20 ± 2) %	(14 ± 3) %
N	(0.4 ± 0.2) %	(0.4 ± 0.2) %	(0.3 ± 0.21) %
S	< 25 ppm	< 25 ppm	< 25 ppm

Además, se realizó una comparación entre los carbones sintetizados y el reportado por Montenegro Quesada et al. (2021) el cual obtuvo para los dos tipos de activación empleada valores 42.223 % (C) para la activación con cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) y 34.545 % (C) para la activación con ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ); lo que demuestra que el carbón sintetizado obtuvo un mayor porcentaje de conversión a carbón. Asimismo, al compararlo los resultados con los presentados por Vieira et al. (2021) en donde se obtiene para el proceso de activación y carbonización del endocarpio de *Acrocomia* 87.36 % C y 84.10 % C para dos temperaturas diferentes, por lo tanto, se logra a partir de ello validar los resultados obtenidos mediante la investigación actual y afirmar que el carbón activado sintetizado presenta características representativas de otros carbones y que lo facultan para considerarse un carbón activado apto para la adsorción.



## **Capítulo 5. Fabricación y Evaluación del Filtro de carbón activado**

Una vez concluida la etapa de caracterización de biomasa y definida las condiciones para la transformación a carbón activado, se procedió a establecer los parámetros necesarios para el diseño del filtro.

### **5.1 Metodología para el desarrollo del filtro**

#### ***5.1.1 Determinación de variables.***

La metodología para el desarrollo del filtro consistió en una primera etapa, en donde se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva, entre los principales autores que han trabajado en el diseño de filtros de carbón activado están Crittenden et al. (2012); Ray & Das, (2020) y Reddy Elavarthi, (2021). Estos proporcionan diferentes parámetros necesarios para el diseño de filtros de carbón activado y procesos de adsorción. Entre los parámetros que los autores indican se tiene el tiempo de contacto con el lecho vacío (EBCT), la capacidad de adsorción (q) y la tasa de uso de carbón (CUR).

##### **5.1.1.1 Determinación del tamaño de partícula**

El tamaño de partícula del carbón activado para las muestras de endocarpio y mezcla (endocarpio-mesocarpio) se determinó mediante la utilización de un tamizador modelo Retsch AS 200, el procedimiento consistió en tomar la muestra de carbón activado de endocarpio y posteriormente la de mesocarpio y pasarlas por los diferentes tamices (número 5, 10, 18, 35, 60, 125, 230, 325 y fondos). Posteriormente, se obtuvo la granulometría del carbón activado. Es importante resaltar que se emplearon las normas INTE ISO 17827-1 2022 e INTE ISO 17827-2 2022, y la recomendación del fabricante en emplear una amplitud de 1.5 mm (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO], 2022b, 2022a)

##### **5.1.1.2 Determinación de la Isoterma de adsorción**

Previo a la determinación se realizó una curva de calibración de azul de metileno 675 nm, esta longitud de onda se determinó previamente mediante un barrido realizado a una muestra de 400 ppm, ya que correspondía al punto medio. Una vez concluido el barrido se

realizaron disoluciones de 1 ppm a 10 ppm y se cuantificaron por triplicado empleando un espectrofotómetro UV Evolution 220 Thermo Scientific. Obtenida la curva de calibración se procedió a realizar un estudio de adsorción de azul de metileno con el objetivo de obtener la tasa de uso de carbón activado del carbón sintetizado, para ello se prepararon 100 mL de diferentes disoluciones de azul de metileno a concentraciones de 100 ppm hasta 1000 ppm (10 disoluciones). Para la determinación se tomó 50 mL de cada disolución y se vertió en un beaker de 100 mL la cual previamente se le había añadido 0.01 g de carbón activado. Posteriormente se colocó el sistema en una plantilla de agitación modelo Corning™ 6796-420D. Luego se añadió a cada muestra una pastilla de agitación y se fijó una velocidad de 500 rpm y un tiempo de 48 h y a una temperatura de 23 °C aproximadamente (el Qada et al., 2006; Montenegro Quesada et al., 2021; Vasanth Kumar & Sivanesan, 2006).

Una vez concluido el período de adsorción cada una de las muestras fue centrifugada a 3000 rpm durante un tiempo de 5 min, esto con el objetivo de separar la disolución del carbón activado. Concluido el tiempo, se procedió a la cuantificación empleando un espectrofotómetro UV Evolution 220 Thermo Scientific, las condiciones de análisis fueron 675 nm. Una vez se cuantificaron las absorbancias de cada una los datos se procesaron para determinar los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado y se realizó el ajuste de la isoterma de Langmuir y Freundlich

### **5.1.1.3 Determinación de la densidad del carbón activado**

Para la determinación de la densidad del carbón activado se empleó con modificaciones la ASTM D2854-09(2019). Para ello se utilizó una probeta graduada de 100 mL la cual fue previamente pesada y una espátula acanalada para el añadido del carbón activado a una velocidad lenta, además se incluyó golpeteo constante para que el material se acomodará dentro de la probeta hasta la mitad del volumen (aproximadamente) de la probeta, es importante resaltar que en ningún momento se realizó compresión del material. Esto se realizó por triplicado para los dos tipos de carbón activado sintetizados (ASTM, 2019). El objetivo de la determinación de la densidad es obtener posteriormente la cantidad de carbón activado que se necesita para el empaque de los filtros a diseñar.

### **5.1.2 Diseño del filtro**

Para el diseño propuesto en esta investigación se fundamentó en un sistema similar a un reactor de lecho empacado o fijo; la ventaja de emplear este tipo de sistemas radica en su eficiencia para remover micro contaminantes (Reddy Elavarthi, 2021). Por consiguiente, en las siguientes secciones se trabajará los diferentes parámetros de diseño para la elaboración del sistema de filtración entre los cuales se encuentra el radio ( $r$ ), área ( $A$ ) y volumen del lecho ( $V_b$ ); carbón activado requerido ( $Cr$ ), cantidad de agua a tratar ( $Tr$ ), altura del medio filtrante ( $H$ ), tiempo de contacto con el lecho vacío (EBCT), carga hidráulica ( $HI$ ) y tasa de uso de carbón activado (CUR).

#### **5.1.2.1. Altura del lecho**

La altura del lecho ( $H$ ) se definió mediante la revisión bibliográfica y un filtro piloto. Autores como Li et al. (2018) emplea un lecho de 50 cm, Kaetzi et al., (2020) un lecho de 180 cm, Dhaarini et al. (2020) 35 cm, y Córdova López et al. (2018) emplea una altura de 5 cm. Por consiguiente, con base en lo anterior se construyó un prototipado de un filtro, de 20 cm y se procedió a rellenar 16 cm de carbón activado sintetizado y luego se puso en marcha. Al observar la funcionalidad y revisar lo propuesto por (Quispe et al. (2022) se redujo el tamaño a una altura de 10 cm, tomando en consideración el alto costo de producción de carbón activado y la cantidad de filtros a producir.

#### **5.1.2.2. Tipo y altura de los medios filtrantes**

Los medios filtrantes se seleccionaron a partir de la funcionalidad, los medios más comunes para sistemas de filtración son la grava y arena. Específicamente, la grava brinda soporte (Tohkemy Corporation, 2022) y la arena presenta funciones de filtrar particulado, y brindar soporte (Tohkemy Corporation, 2022). Adicionalmente, por el objetivo de la investigación, se emplea carbón activado. La altura de los medios se definió a partir de las relaciones empleadas por Li et al. (2018) y la construcción del filtro prototipo. Los valores para cada medio se fijaron entre (2 y 6) cm.

### 5.1.2.3. Diámetro, área y volumen del lecho.

Autores como Kaetzi et al. (2020), Córdova López et al., (2018) y Delgado et al., (2022) emplean un diámetro de 3 cm a 10 cm para los lechos diseñados, a partir de lo anterior se seleccionó un tubo de acrílico de 25 mm de diámetro y un espesor de 3 mm. Por consiguiente, el radio del lecho sería de 9.50 mm; a partir del área de un círculo se obtiene el área del lecho es de 2.8353 cm<sup>2</sup> y con base a la altura seleccionada el volumen del lecho correspondería a 17.01 cm<sup>3</sup>

### 5.1.2.4. El carbón activado requerido (C<sub>r</sub>)

El carbón requerido se determinó mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$C_r = \frac{D_c}{V_b} \quad (14)$$

Donde:

C<sub>r</sub>: El carbón requerido en, g

V<sub>b</sub>: volumen de lecho, cm<sup>3</sup>

D<sub>c</sub>: densidad del carbón activado, g/cm<sup>3</sup>

Es importante resaltar que el carbón requerido es la mínima cantidad de carbón necesaria para poder completar el volumen del lecho, por tal razón se emplea más carbón del determinado por la ecuación, con el objetivo de garantizar un buen grado de compactación y prevenir la canalización.

### 5.1.2.5. Volumen designado para el estudio

Para el experimento realizado se definió un volumen de 1 L, esto debido al coste asociado a la preparación de disoluciones a 400 ppm de azul de metileno y al coste asociado a su tratamiento.

### 5.1.2.6. Tiempo de contacto cuando el lecho está vacío

La ecuación empleada para determinar el tiempo de contacto corresponde a:

$$EBCT = \frac{V_b}{Q} \quad (15)$$

Donde:

EBCT: tiempo de contacto cuando el lecho está vacío, s

V<sub>b</sub>: volumen de lecho, m<sup>3</sup>

Q: flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/h

El caudal de los filtros se determinó mediante el paso de un litro de disolución y el tiempo que tardo en pasar este por la totalidad del filtro.

### 5.1.2.6. Carga Hidráulica

La carga hidráulica representa la velocidad del líquido a través del lecho (Reddy Elavarthi, 2021), se determinó mediante la ecuación que se presenta a continuación

$$Hl = \frac{Q}{A} \quad (16)$$

Donde:

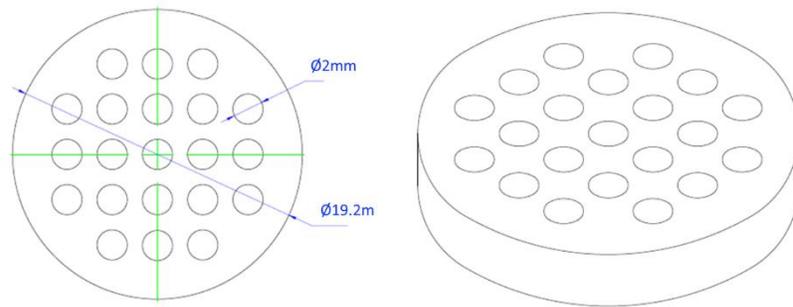
Hl = carga hidráulica, m/h

A = área del lecho, m<sup>2</sup>

Q = Flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/h

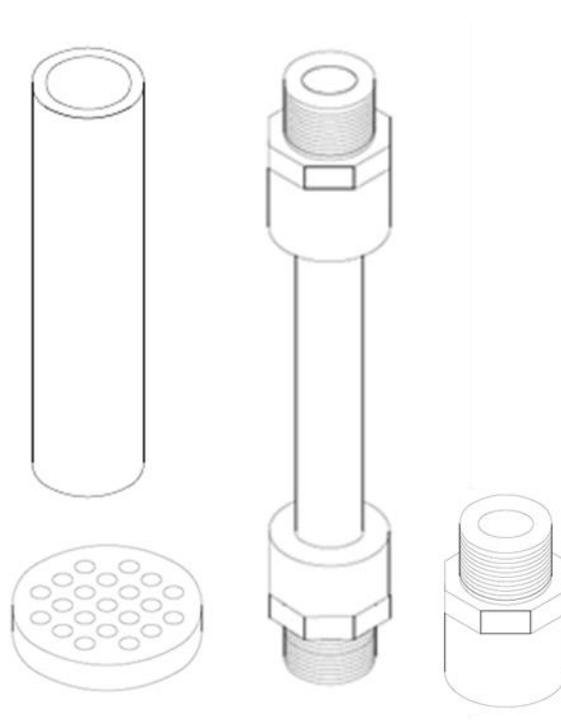
### 5.1.2.1 Construcción y diseño del filtro

La selección de un tubo de acrílico consistió en el beneficio de observar el fenómeno de filtración al ser transparente Li et al. (2018). Los soportes para los medios filtrantes se desarrollaron mediante corte láser para lo cual se empleó una lámina de 3 mm de grosor y mediante el diseño de AutoCAD que se presenta en la figura 5.1.



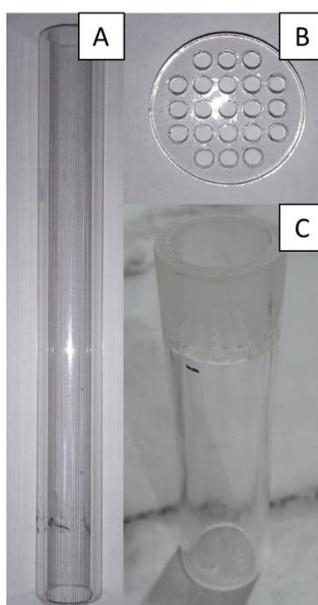
**Figura 5.1.** Diseño de soporte del medio filtrante empleado para el corte láser.

Se obtuvieron acoples de  $\frac{3}{4}$  de pulgada dado que eran los que calzaban al tubo de acrílico 19 mm. Adicionalmente la construcción se realizó empleando como adhesivo pegamento PVC. Por último, se dibujó mediante el software AutoCAD cada una de las piezas y el diseño total del filtro, como se observa en la figura 5.2



**Figura 5.2.** Diseño de piezas en AutoCAD para el filtro de carbón activado.

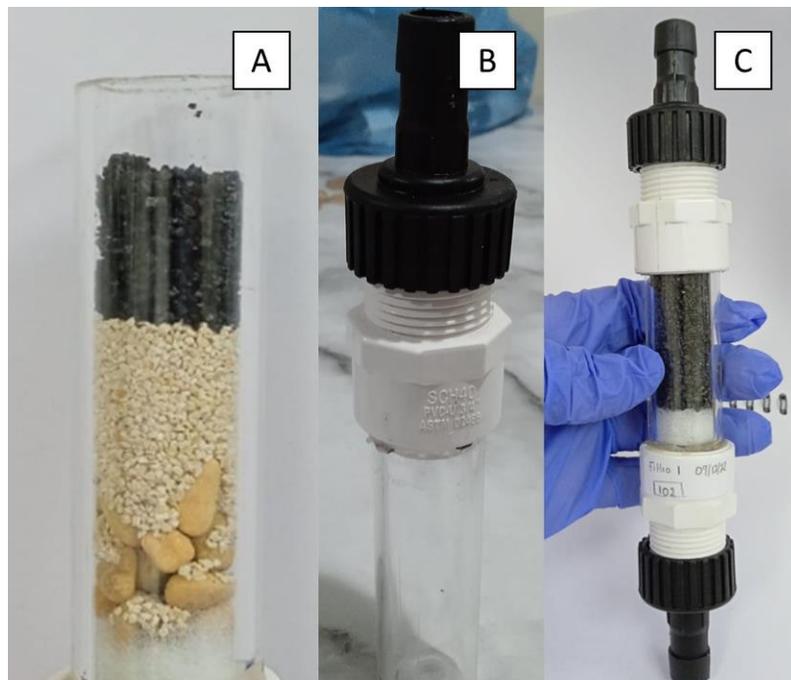
Se seleccionó un tubo de acrílico de 25 mm de ancho, 3 mm de espesor y 2 m de largo, el cual se cortó en secciones de 10 cm para tener 12 tubos. Para el caso de los soportes diseñados estos son de 18.8 mm de ancho y tienen 21 orificios de 2 mm cada uno (para dividir el flujo de manera uniforme dentro del filtro). Para cada uno de los tubos se empleó 2 soportes, en donde se midió de la boca del tubo una altura de 2 mm y se fijó mediante pegamento PVC el soporte, y se dejó secando por 2 h. En la figura 5.3 se observan las piezas anteriormente descritas.



**Figura 5.3.** Tubo de 10 cm de acrílico con soporte ensamblado. A) Tubo de acrílico B) Soporte del medio filtrante C) Modelo ensamblado.

Una vez se secó el modelo ensamblado, se procedió a colocar los medios filtrantes. Los medios filtrantes fueron colocados según la configuración a estudiar, la configuración 1 representa un filtro únicamente de carbón activado, para el caso de la configuración 2 este representa un filtro que posee una menor cantidad de carbón la cual es sustituida por una capa de grava, una de arena con el objetivo de observar la capacidad de remoción empleando una configuración típica de los filtros comerciales. Ambas configuraciones poseen una capa de algodón sintética (Guata) al inicio y final del filtro, esto ya que Evangelista et al. (2019), indica que beneficia permeabilidad hidráulica y por tanto reduce las pérdidas de carga dentro

del filtro. Para el caso de la configuración 1, este se rellena iniciando por la capa de “guata”, luego el carbón activado y luego “guata”. Para la configuración 2, esta inicia con una capa de “guata”, carbón activado, arena, grava y “guata”. Una vez cada filtro estuviera relleno y comprimido, se procedió a pegar con pegamento PVC el soporte superior, dejándolo secar por 2 h. Una vez pasado el tiempo de secado, se procedió a colocar los acoples de  $\frac{3}{4}$  de in y a ensamblar los acoples para manguera. La Figura 5.4 evidencia los medios filtrantes para el caso de la configuración 2 (Figura 5.4 A), el pegado de los acoples (Figura 5.4B) y el filtro completamente terminado (Figura 5.4C) para el caso de la configuración 1.



**Figura 5.4.** Construcción del filtro de carbón activado. A) Tubo con soporte inferior y medios filtrantes. B) Tubo con soporte y acoples. C) Filtro finalizado.

### **5.1.3 Evaluación del filtro**

#### **5.1.3.1. Variables de Estudio**

Las variables de estudio de interés fueron el tipo de carbón a utilizado y la configuración de filtro empleada para la remoción de los mg de azul de metileno adsorbidos por g de carbón activado, para ello; se desarrolló un diseño de experimentos en donde se

contempló un factorial  $2^2$  con tres réplicas para examinar los estados de Qf en los diferentes tratamientos. Los tratamientos estudiados se resumen en el cuadro 5.1.

**Cuadro 5.1** Factores y niveles a estudiar en el factorial  $2^2$

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
<b>Tipo de carbón</b>	Endocarpio	Mezcla (endocarpio – mesocarpio)
<b>Configuración</b>	Solamente carbón	Carbón, arena y grava

La selección de los factores anteriores recae en que en el estudio actual busca definir y cuantificar la capacidad de los carbones sintetizados en la remoción del azul de metileno. Y en el caso de las configuraciones estás se basan en el autor (Li et al., 2018) el cual emplea grava, arena y carbón activado en diferentes proporciones para analizar la remoción de contaminantes farmacéuticos y de cuidado personal.

Para la determinación de la variable respuesta se empleó el (Qf) el cual corresponde a la cantidad de mg de azul de metileno removido por g de carbón activado.

La remoción de azul de metileno con los filtros se realizó mediante el uso de una bomba sumergible modelo Tetra SP330 con una capacidad de 330 GPH, la cual se acopló a una manguera y se ensambló al filtro de carbón activado. El sistema elaborado se muestra en la figura 5.5.



**Figura 5.5.** Sistema para evaluación de la capacidad de adsorción de los filtros diseñados.

Una vez se instaló el sistema de la figura 5.5, se procedió a dejar pasar un litro de disolución de azul de metileno a 400 ppm y se cuantificó el tiempo que tardaba la disolución en pasar por el filtro. Adicionalmente, la disolución obtenida en la salida del filtro se cuantificó la absorbancia mediante UV. Al obtener la absorbancia de cada una de las disoluciones filtradas para cada sistema se procedió a determinar la concentración empleando la curva de ajuste del apartado 5.1.1.2 y posteriormente calcular el  $Q_f$  correspondiente. Una vez se obtuvo el valor de  $Q_f$  se procedió a evaluar el diseño experimental mediante el software Minitab.

### **5.1.3.3. Ciclos de reutilización**

Para el caso de los ciclos de reutilización se empleó con modificaciones la metodología de Montenegro Quesada et al. (2021), la cual utiliza 1 litro de una disolución de 400 ppm de azul te metileno. Esta disolución se dejó pasar por el filtro y posteriormente se cuantifico la absorbancia por triplicado. Este proceso se repitió 5 veces, dado los costos asociados a la prueba. El sistema empleado para las determinaciones corresponde al de la figura 5.5

## 5.2 Análisis de Resultados

En el siguiente apartado se tratarán los resultados obtenidos para el diseño de los filtros de carbón activado a partir del aprovechamiento del endocarpio de *Acrocomia* spp, asimismo, se indican los diferentes parámetros de diseño y operación para los filtros.

### 5.2.1 Resultados obtenidos para el tamaño de partícula

Los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula de las muestras de carbón activado de endocarpio y endocarpio-mesocarpio se observan en el cuadro 5.2

**Cuadro 5.2.** Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula del carbón activado de endocarpio y endocarpio - mesocarpio.

Abertura del tamiz	Unidades	Masa retenida de endocarpio-mesocarpio / (g)	Masa retenida de endocarpio / (g)
4.00	mm	11.62	16.84
<b>2.00</b>	<b>mm</b>	<b>212.44</b>	<b>310.76</b>
<b>1.00</b>	<b>mm</b>	<b>105.91</b>	<b>124.48</b>
500.00	µm	26.11	26.34
250.00	µm	17.77	15.86
125.00	µm	13.16	12.29
63.00	µm	7.8	6.2
45.00	µm	0.07	0.15
Fondos		0	0.02

Se observa que para el caso de ambos carbones activados se tiene un tamaño de partícula mayoritariamente entre 1 mm -4.00 mm, por lo tanto, a partir de lo sugerido por Reddy Elavarthi, (2021) el carbón activado se encuentra entre el tamaño de partícula de (0.6 mm a 2.36 mm) que presenta características idóneas para el desarrollo de sistemas de filtración. Adicionalmente, se tiene que ambos carbones categorizan como granulares ya que poseen un tamaño mayor a 0.1mm (Asano, 2007).

### 5.2.2 Resultados obtenidos para la determinación de densidad.

En el cuadro 5.3 se observan los valores de densidad obtenidos. Este parámetro es requerido para posteriormente calcular la cantidad de carbón necesaria para la remoción del azul de metileno.

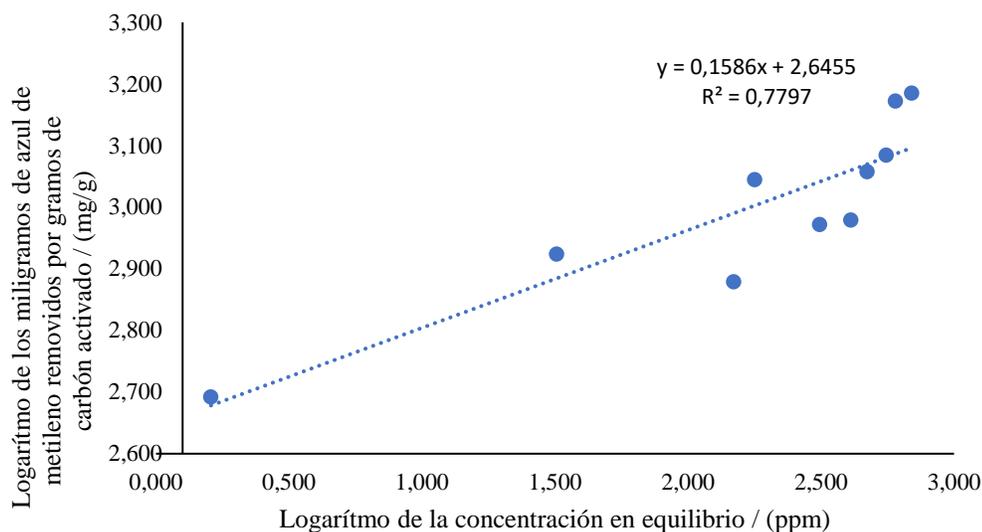
**Cuadro 5.3** Resultados obtenidos para la densidad de los carbones activados sintetizados.

Tipo de carbón activado	Densidad/ (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación (g/cm <sup>3</sup> )
Endocarpio	0,36	0,03
Mezcla (endocarpio – mesocarpio)	0,58	0,02

Al comparar la densidad obtenida en este estudio con la de autores como: Asano (2007), el cual reporta valores de (0.4-0.5) g/cm<sup>3</sup>, Velten et al. (2011) con valores de 0.460 g/cm<sup>3</sup> y Reddy Elavarthi, (2021) con valores de (0.50-0.56) g/cm<sup>3</sup> para carbon activado de lignito y (0.42-0.50) g/cm<sup>3</sup> para carbón activado de coco) se evidencia que se encuentra dentro de los rangos para diferentes carbones activados.

### 5.2.3 Resultados obtenidos para la isoterma de adsorción

Con base en la metodología descrita se construyó la figura 5.6 la cual represente la Isoterma de Freundlich, para el proceso de adsorción de azul de metileno. Es importante resaltar que el ajuste obtenido no se encuentra dentro de un R<sup>2</sup> de 0.9, sin embargo, este se ajusta mejor a los datos que el ajuste de Lagmuir en el cual se obtiene un valor de 0.74.



**Figura 5.6.** Isotherma de Freundlich para la adsorción de azul de metileno mediante el uso de carbón activado sintetizado a 500 °C y 1.5 h.

A partir de la ecuación 8 ( $Q_e = K_2 * C_e^{1/n}$ ) y asociando los valores a la ecuación obtenida, se tiene que el valor de heterogeneidad ( $1/n$ ) corresponde para el modelo actual a 0.1586. Al comparar el resultado obtenido al reportado por El Qada et al. (2006), se afirma que el carbón activado obtenido presenta una estructura heterogénea debido a que el “n” es mayor a 1. Además, a partir del valor obtenido, y mediante mencionado por El Qada et al. (2006), el proceso de adsorción de azul de metileno se ve favorecido. Adicionalmente, el mejor ajuste con el modelo de Freundlich implica que el carbón presenta un modelo en donde los diferentes sitios activos presentes pueden adsorber diferentes capas de adsorbatos y esto va a depender de las energías de adsorción de los sitios (Crittenden et al., 2012).

### 5.2.3 Resultados obtenidos para los parámetros de diseño.

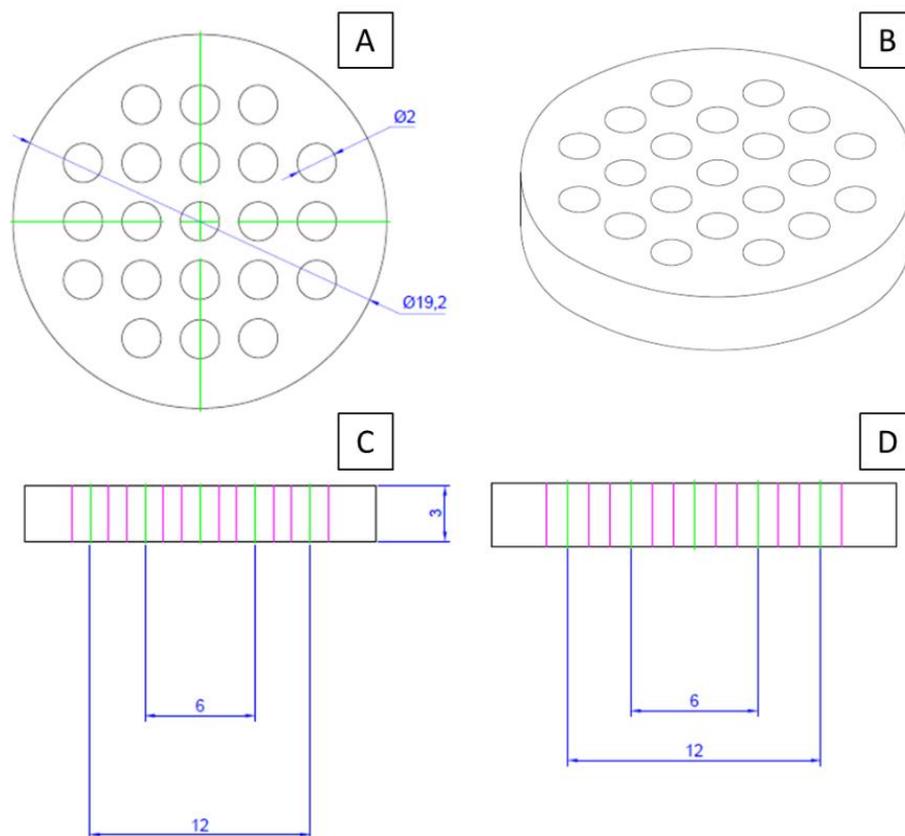
Con base en los resultados anteriores y la metodología descrita se procedió a calcular los parámetros de diseño y se obtuvo el cuadro 5.4, el cual resume cada uno de ellos.

**Cuadro 5.4** Parámetros calculados para el desarrollo y construcción de un filtro de carbón activado empleando endocarpio de *Acrocomia* spp.

Variable	Unidades	Valor
Tasa de Uso de carbón (CUR)	g/L	0.19
Densidad (Dc)	g/m <sup>3</sup>	0.36
Tiempo de contacto (EBCT)	s	61.24
Radio del Lecho (r)	mm	9.50
Área de lecho (A)	mm <sup>2</sup>	283.53
Volumen del lecho (Vb)	mm <sup>3</sup>	17011.72
Carga Hidráulica (Hl)	m/h	3.53
Carbon requerido (Cr)	g	6.17
Agua tratada (Tr)	L	31.85
Altura del carbón configuración 1 (H1)	cm	6.00
Altura del carbón configuración 2 (H2)	cm	2.00
Arena configuración 2 (H3)	cm	2.00
Grava configuración 2 (H4)	cm	2.00

#### **5.2.4 Resultados obtenidos para el diseño de AUTOCAD.**

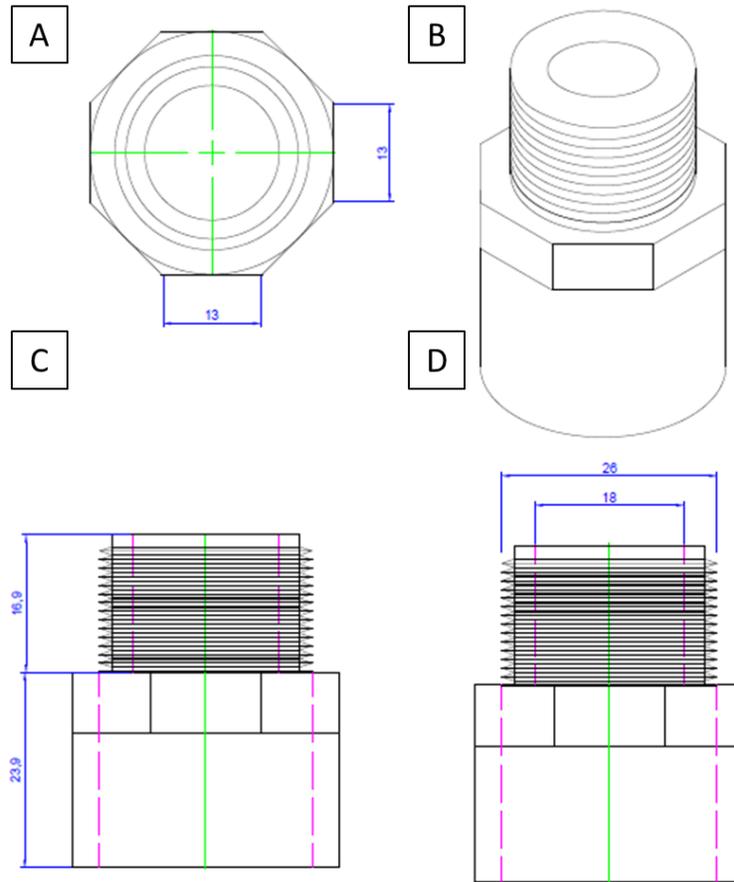
Se procedió a general los planos correspondientes para el diseño propuesto de filtro de carbón activado, en la figura 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10, se observan isométricos y vistas. Adicionalmente, los planos se encuentran en el apéndice H.



**Figura 5.7.** Isométrico y vistas para el soporte del filtro.

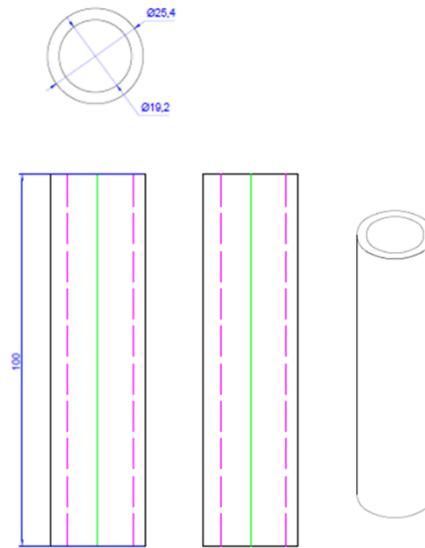
Como se observa en la figura 5.7 A se elaboró el diseño del soporte el cual tiene un diámetro total de 19.2 mm, y presenta 21 orificios los cuales son de 2 mm. Los orificios se generaron para promover la distribución del efluente durante la filtración. Adicionalmente, en la figura C y D se observa que el grosor de la pieza es de 3 mm. El isométrico de la pieza se observa en la figura 5.7 B, es importante resaltar que para cada filtro se generaron dos de estas piezas, una que funciona como soporte de los medios filtrantes y otra que distribuye el efluente al ingresar en el filtro.

Para el caso de la figura 5.8, esto corresponde al acople obtenido, este acople presenta una altura de aproximadamente 41 mm (figura 5.8 C), y un diámetro en la boquilla de 26 mm (figura 5.8 D). El acople fue empleado para conectar el filtro con la boquilla de la manguera por donde ingresa el efluente. El isométrico del acople se observa en la figura 5.8 B.



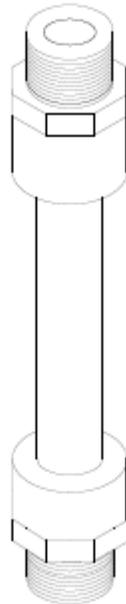
**Figura 5.8.** Isométrico y vistas para el acople del filtro.

Como se ha mencionado anteriormente, el tubo seleccionado es de acrílico y consta de una altura de 100 mm, como se observa en la figura 5.9, adicionalmente, los diámetros externo e interno del cilindro (tubo) son 25.4 mm y 19.2 mm respectivamente; estos diámetros fueron determinados a partir de la medición con vernier.



**Figura 5.9.** Isométrico y vistas para el tubo del filtro.

Por último, se tiene en la figura 5.10 el isométrico completo del diseño del filtro, el cual fue utilizado para las determinaciones de  $Q_f$  en la sección siguiente. Con base en el diseño se construyeron cerca de 12 filtros para cada una de las configuraciones.



**Figura 5.10.** Isométrico para el filtro.

### 5.2.5 Resultados obtenidos para la configuración de filtro

Con base en la metodología descrita se obtuvo los resultados del cuadro 5.4 correspondientes a los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado.

**Cuadro 5.5.** Resultados obtenidos para la el Qf de cada filtro evaluado en el diseño de factorial.

Tipo de filtro	Qf / (mg/g)
Solo carbón activado de endocarpio	(24.45 ± 4.37) mg/g
Solo carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio)	(32.20 ± 6.14) mg/g
Tres medios con carbón activado de endocarpio	(12.61 ± 9.86) mg/g
Tres medios con carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio)	(27.59 ± 1.85) mg/g

Cabe resaltar que no es posible comparar los Qf obtenidos para el proceso de fabricación de carbón activado con los obtenidos en los filtros, debido a factores tales como el grado de compactación y el área de contacto (Asano, 2007). Con base en lo anterior se procedió al análisis de varianza del diseño de experimento, los resultados se evidencian en el cuadro 5.5 y se utiliza como variable respuesta el Qf.

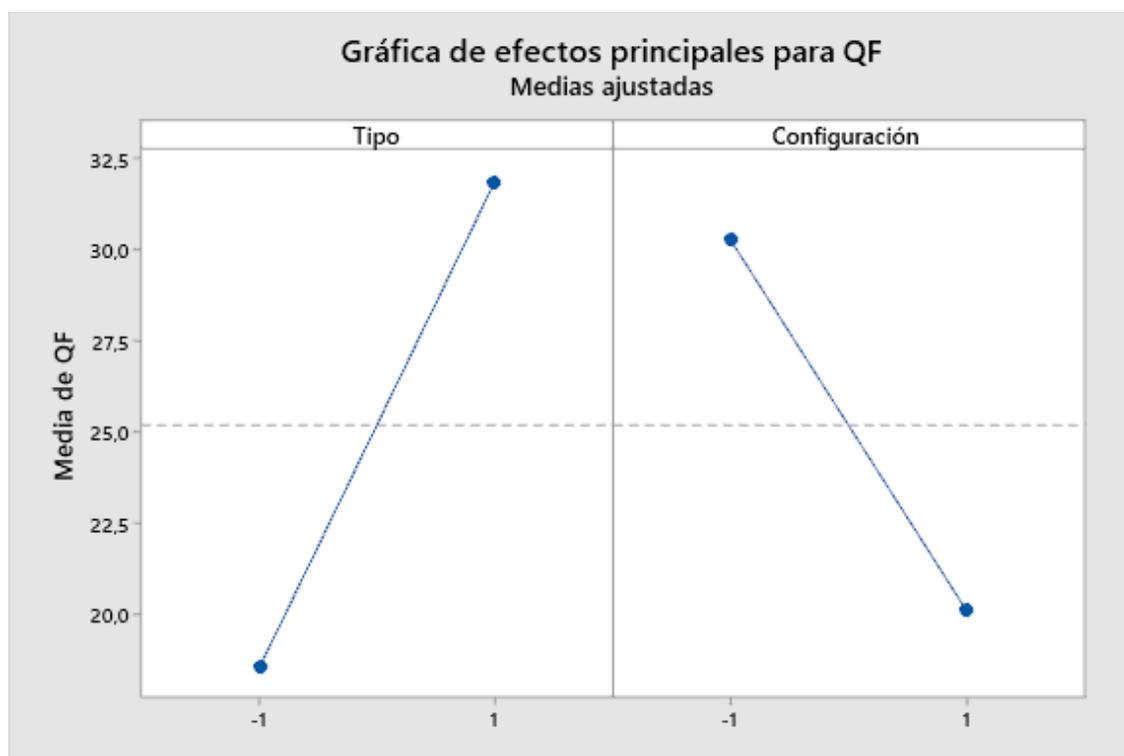
**Cuadro 5.6.** Resultados para el análisis de varianza obtenido para el factorial empleado, tomando como variable respuesta los mg de azul de metileno removidos por grama de carbón activado.

Efecto o Interacción	Valor p value
<b>Tipo de carbón activado</b>	<b>0.000</b>
<b>Configuración</b>	<b>0.000</b>
Tipo de carbón activado * Configuración	0.413

Los resultados del cuadro 5.6, correspondientes al análisis de varianza, se evidencia que los efectos por el tipo de carbón activado y la configuración son significativos. Esto dado que el p-value obtenido para ambos es menor a 0.05. Adicionalmente, el modelo de ajuste es de 0.6897. Por consiguiente, el modelo del análisis de varianza se indica a continuación.

$$Qf = 25.190 + 6.659 * \text{tipo de carbón activado} - 5.088 * \text{configuración} + 0.828 * \text{tipo de carbón activado} * \text{configuración} \quad (17)$$

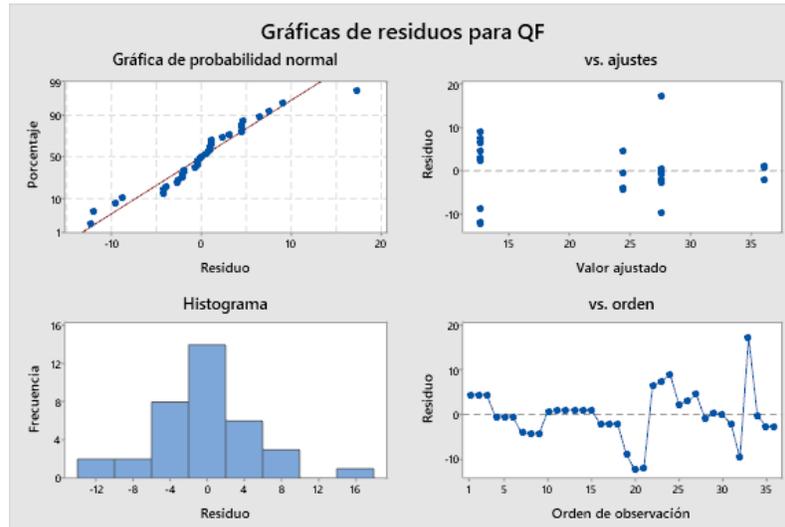
Con base en la ecuación anterior, se observa que valores positivos del tipo de carbón y valores negativos de configuración favorecen el Qf. Asimismo, se generó la gráfica de efectos principales que corresponde a la figura 5.8, para conocer cuáles son las condiciones en donde se obtiene que el carbón de endocarpio-mesocarpio y la configuración de solo carbón activado presentan el mayor Qf.



**Figura 5.8.** Gráfica de efectos principales para la maximizar la variable Qf en el análisis de experimentos correspondiente a los filtros de carbón activado.

Una vez se obtuvo que las variables que favorecen la respuesta son el carbón activado de endocarpio - mesocarpio y la configuración de únicamente carbón, se procedió a realizar un análisis de los modelos, para el caso de normalidad se aplicó la prueba de Shapiro y se obtuvo un p-value de 0.097 el cual es mayor al 0.05 y por lo tanto se considera que los datos son normales. Asimismo, para el caso de varianza constante se aplicó la prueba de Levene y

se obtuvo un p-value de 0.092 por lo tanto existe varianza constante. En el caso de independencia, se observa en la figura 5.9 que no existe una tendencia, por lo tanto, los datos son independientes.



**Figura 5.9.** Supuestos del modelo para el análisis de varianza correspondiente a los datos de adsorción de azul de metileno para los filtros.

### 5.2.6 Resultados para la evaluación de los filtros.

Se obtuvo para los filtros construidos los siguientes parámetros de operación que se resumen en el cuadro 5.7.

**Cuadro 5.7.** Resultados obtenidos para los parámetros de operación de los filtros construidos

Tipo de filtro	Tiempo / (s)	Velocidad / (m/s)	EBCT / (s)
Solo carbón activado de endocarpio	$366.86 \pm 372.63$	$1.70 \times 10^{-2} \pm 1.13 \times 10^{-2}$	$5.20 \pm 5.28$
Solo carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio)	$1641.87 \pm 396.65$	$2.33 \times 10^{-3} \pm 5.77 \times 10^{-4}$	$23.28 \pm 5.62$
Tres medios con carbón activado de endocarpio	$1557.35 \pm 204.52$	$2.33 \times 10^{-3} \pm 5.77 \times 10^{-4}$	$22.08 \pm 2.90$
Tres medios con carbón activado de mezcla (endocarpio - mesocarpio)	$1226.35 \pm 282.40$	$3.00 \times 10^{-3} \pm 1.00 \times 10^{-3}$	$17.39 \pm 4.00$

Se observa que para cada filtro se tiene un tiempo diferentes para el paso del flujo de 1 L, y esto se traduce a diferentes velocidades, específicamente se tiene que según Visbal H & Rozo Q (2018) el valor máximo de velocidad de filtros de lecho empacado en los cuales se aplica presión es un valor máximo de 0.005 m/s, por tanto, se tiene que los filtros de solo carbón activado poseen una velocidad mayor y esto se traduce a un tiempo menor de EBCT y por consiguiente tiene un  $Q_f$  menor. Asimismo, el EBCT de diseño corresponde a 61.24 s y el obtenido en operación fue menor a este valor, por lo tanto, se tiene que la disolución de azul de metileno no estuvo el tiempo suficiente en contacto con el carbón activado y esto produce una menor adsorción del azul de metileno (Asano, 2007). Por lo tanto, se tiene que estudiar la operación de compactación del carbón activado en el lecho para determinar en qué casos se obtiene el EBCT correspondiente del diseño y no se promueve la obstrucción del filtro.

Por último, se construyó un filtro empleando carbón activado de mezcla (endocarpio – mesocarpio) y teniendo únicamente como medio filtrante el carbón activado debido a que fue el que presentó las condiciones con mejores resultados, con el objetivo de obtener el número de ciclos el cual adsorber el filtro antes de llegar al agotamiento, cabe resaltar que la disolución empleada corresponde a azul de metileno a 400 ppm.

**Cuadro 5.8.** Resultados obtenidos para los ciclos de reutilización del filtro de carbón activado.

Número de ciclo	Concentración Final en la salida del filtro	Porcentaje de remoción
Ciclo 1	9.465 ppm	97.63%
Ciclo 2	60.125 ppm	84.97%
Ciclo 3	108.12 ppm	72.97%
Ciclo 4	125.92 ppm	68.52%
Ciclo 5	149.03 ppm	62.74%
Ciclo 6	153.65 ppm	61.59%

Con base en el cuadro 5.8 se observa que el filtro diseñado no logra remover suficiente azul de metileno para cumplir con la normativa nacional, sin embargo, se tiene que

resaltar la capacidad del filtro para la remoción del azul de metileno, teniendo valores superiores al 70 % para los primeros ciclos de recuperación.

Es importante resaltar que el grado de compactación promueve o limita la canalización del filtro, por lo tanto, al observar el resultado del cuadro 5.7 específicamente para el caso del filtro con solo carbón de endocarpio, se tiene que el EBCT es de  $5.20 \pm 5.28$ , lo que implica una alta canalización en el medio. Adicionalmente, al observar el valor teórico de tratamiento de agua, se tiene que el diseño del filtro sería adecuado para purificar cerca de 32 L de disolución de azul de metileno a 400 ppm, por lo tanto, al observar los resultados del cuadro 5.8, se puede afirmar que existe canalización dentro del diseño actual y por ende es necesario realizar mejoras. Entre las acciones de mejora, se tiene que según Asano, (2007) para aumentar el  $Q_f$  se necesita aumentar el EBCT a valores estándares para sistemas de filtración, por lo tanto, aumentar la altura del cilindro, aumentar el grado de compactación y la cantidad de carbón activado pueden mejorar el  $Q_f$  y permitir que el diseño remueva azul de metileno dentro de la legislación.

## Conclusiones y Recomendaciones

---

### 6.1 Conclusiones

- Se obtiene que el diámetro de los frutos de *Acrocomia* spp se encuentran en un intervalo de 35.86 mm hasta los 39.39 mm (longitudinal y transversal), con un peso entre 19.19 g a 22.34 g y un porcentaje de fraccionamiento de 17.5 % para el epicarpio, 31.4 % para el mesocarpio, 38.0 % para el endocarpio y 13.1 % para el endosperma los cuales son parámetros necesarios para conocer las características de morfológicas de la biomasa con la cual se realizará el aprovechamiento para la producción de carbón activado.
- Se denota que el endocarpio y el endocarpio con remanente de mesocarpio de *Acrocomia* spp, presentan grupos funcionales característicos de materiales lignocelulósicos, y adicionalmente para el caso del endocarpio los picos obtenidos son mucho más intensos que en el mesocarpio-endocarpio y sugeriría mayor presencia de grupos funcionales vinculados a materiales lignocelulósicos.
- El endocarpio de *Acrocomia* spp presenta características que lo vuelven una biomasa apta para la producción del carbón activado entre las cuales resalta su bajo contenido de humedad de aproximadamente 12 % m/m, su alta cantidad de poros observada en su morfología y su alto contenido de carbono de aproximadamente 42 %.
- El carbón activado sintetizado presenta características aptas comparables a otros carbones activados, tales como su alto contenido de carbono de 72 %, su deficiencia de grupos funcionales, su área superficial de 669 m<sup>2</sup>/g y su capacidad de adsorción de 44.61 mg de azul de metileno por g de carbón activado.
- El carbón activado sintetizado presenta en su análisis morfológico mediante SEM acoplado a EDS la presencia de cristales de Silicio (Si), los cuales saturan parte de los poros del carbón activado y afectan su capacidad de remoción.
- Se observa mediante la determinación de los EBCT experimentales que los filtros diseñados se encuentran por debajo del valor de diseño y por lo tanto esto se traduce en la presencia de canalización.

## 6.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio sobre la intervención de los lavados, esto con el objetivo de emplear diferentes sustancias que permitan disminuir la cantidad de agua necesaria y no interfieran en la capacidad de adsorción del carbón activado.
- Determinar la composición de los cristales presentes en los estudios de morfología del carbón activado para conocer si son producto de contaminación o están asociados al proceso de fabricación con la intención de maximizar la capacidad de adsorción de los carbones.
- Estudiar en profundidad el empaquetado de los filtros dado que los resultados obtenidos demuestran que se obtienen diferentes EBCT para los filtros construidos lo que implica que se está generando canalización dentro de los sistemas.
- Realizar correcciones al diseño de los filtros específicamente en parámetros de diseño que promuevan un aumento en el tiempo de contacto, para aumentar la capacidad de adsorción
- Estudiar el carbón sintetizado y los filtros para aguas residuales reales o contaminantes emergentes.
- Profundizar en las condiciones de fabricación del carbón activado mediante un estudio de superficie de respuesta dado que se obtiene la presencia de curvatura en los resultados del análisis de varianza.

## Bibliografía

---

- Abdullah, A., & Mohammed, A. (2019). Scanning Electron Microscopy ( SEM ): A Review Scanning Electron Microscopy ( SEM ): A Review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX*.
- Abuelnoor, N., AlHajaj, A., Khaleel, M., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. M. (2021). Activated carbons from biomass-based sources for CO<sub>2</sub> capture applications. *Chemosphere*, 282, 131111. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>
- Achury Cadena, C. A. (2008). *Obtención de Carbón Activado a partir de cascara de coco : obtención por medio de activación física y química* [Univesidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23588/u303042.pdf?seq>
- Alfaro-Solís, J. D., Montoya-Arroyo, A., Jiménez, V. M., Arnáez-Serrano, E., Pérez, J., Vetter, W., Frank, J., & Lewandowski, I. (2020a). *Acrocomia aculeata* fruits from three regions in Costa Rica: an assessment of biometric parameters, oil content and oil fatty acid composition to evaluate industrial potential. *Agroforestry Systems*, 94(5), 1913–1927. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00511-8>
- Altino, H. O. N., Costa, B. E. S., & da Cunha, R. N. (2017). Biosorption optimization of Ni(II) ions on Macauba (*Acrocomia aculeata*) oil extraction residue using fixed-bed column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4895–4905. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.025>
- Alves, J. L. F., da Silva, J. C. G., Mumbach, G. D., Alves, R. F., de Sena, R. F., Machado, R. A. F., & Marangoni, C. (2022). Potential of macauba endocarp (*Acrocomia aculeate*) for bioenergy production: Multi-component kinetic study and estimation of thermodynamic parameters of activation. *Thermochimica Acta*, 708. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179134>
- Asano, T. (2007). *Water reuse : issues, technologies, and applications*. McGraw-Hill.

- Asimbaya, C., Rosas, N., Endara, D., & Guerrero, V. H. (2015a). Obtención de Carbón Activado a partir de Residuos Lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto. *Revista Politécnica*, 36(3), 24. [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/537](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/537)
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2015). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. (ISO 16948:2015)*. [www.aenor.es](http://www.aenor.es)
- ASTM. (2019). *Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon*. <https://doi.org/10.1520/D2854-09R19>
- Bag, O., Tekin, K., & Karagoz, S. (2020). Microporous activated carbons from lignocellulosic biomass by KOH activation. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 28(12), 1030–1037. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1794850>
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>
- Barbosa Evaristo, A., Correia Martino, D., Henrique Ferrarez, A., Barros Donato, D., de Cássia Oliveira Carneiro, A., & Antônio Saraiva Grossi, J. (2016). POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DO FRUTO DA MACAÚBA E SUA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL ENERGY POTENTIAL OF THE MACAW PALM FRUIT RESIDUES AND THEIR USE IN CHARCOAL PRODUCTION. *Ciência Florestal*, 26(2), 571–577.
- Barroso Benavente, I. (2020). *Termogravimetría. Fundamentos y Aplicaciones*. April.
- Bastidas, M., Buelvas, L. M., Márquez, M. I., & Rodríguez, K. (2010). Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Información Tecnológica*, 21(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000300010>
- César, A. D. S., Almeida, F. D. A., de Souza, R. P., Silva, G. C., & Atabani, A. E. (2015). The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock

- in Brazil. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 49, pp. 1213–1220). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.125>
- Ciconini, G. (2012). *Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil*. UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO.
- Ciconini, G., Favaro, S. P., Roscoe, R., Miranda, C. H. B., Tapeti, C. F., Miyahira, M. A. M., Bearari, L., Galvani, F., Borsato, A. v., Colnago, L. A., & Naka, M. H. (2013b). Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Industrial Crops and Products*, 45, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.008>
- Coimbra, M. C., & Jorge, N. (2011). Proximate composition of guariroba (*Syagrus oleracea*), jervivá (*Syagrus romanzoffiana*) and macaúba (*Acrocomia aculeata*) palm fruits. *Food Research International*, 44(7), 2139–2142. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.032>
- Colombo, C. A., Berton, L. H. C., Diaz, B. G., & Ferrari, R. A. (2018a). Macauba: A promising tropical palm for the production of vegetable oil. *OCL - Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 25(1). <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>
- Consejo Nacional de Rectores. (2019). *Estado de la Nación 2019*. [www.estadonacion.or.cr](http://www.estadonacion.or.cr)
- Consejo Nacional de Rectores. (2020). *Estado de la Nación 2020*. [www.estadonacion.or.cr](http://www.estadonacion.or.cr)
- Córdova López, L., Jiménez Hernández, F. J., Ramírez Soberano, K. A., Hernández Gerónimo, G., Frausto Osorio, J. K., José Aurelio Sosa Olivier, & José Ramón Laines Canepa. (2018). *Diseño y puesta en marcha de filtros de carbón activado de origen vegetal, para emisiones fugitivas de un almacén de residuos peligrosos*. <http://www.amica.com.mx/issn/Tabasco/AMI-136.pdf>
- Coronado Martínez, M. D. C., Cueva-Gálvez, G. E., Gonzáles Mora, H. E., & Carrasco Pérez, P. (2016). Obtención de carbón activado del endocarpio de shapaja (*Attalea phalerata*)

- procedente de la región San Martín, empleando un método físico. *Revista Forestal Del Perú*, 31(2), 90. <https://doi.org/10.21704/rfp.v31i2.1030>
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118131473>
- da Silva, V., Lopez Sotelo, J. B., Correa Guimaraes, A., Hernandez Navarro, S., Sanchez Bascones, M., Navas Gracia, L. M., Martin Ramos, P., & Martin Gil, J. (2017). An example of lignocellulosic waste reuse in two consecutive steps: sorption of contaminants and enzymatic hydrolysis. *Cellulose Chemical and Technical*, 51, 127–136. <https://www.researchgate.net/publication/274249266>
- Danish, M., & Ahmad, T. (2018). A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.003>
- de Lima, N. E., Carvalho, A. A., Meerow, A. W., & Manfrin, M. H. (2018). A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. In *Organisms Diversity and Evolution* (Vol. 18, Issue 2, pp. 151–161). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13127-018-0362-x>
- de Souza, T. N. V., Vieira, M. G. A., da Silva, M. G. C., Brasil, D. do S. B., & de Carvalho, S. M. L. (2019). H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-activated carbons produced from açai stones and Brazil nut shells: removal of basic blue 26 dye from aqueous solutions by adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(28), 28533–28547. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04215-0>
- del Río, J. C., Evaristo, A. B., Marques, G., Martín Ramos, P., Martín Gil, J., & Gutiérrez, A. (2016). Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. *Industrial Crops and Products*, 84, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.018>

- Delgado, N., Marino, D., Capparelli, A., Casas-Zapata, J. C., & Navarro, A. (2022). Pharmaceutical compound removal using down-flow fixed bed filters with powder activated carbon: A novel configuration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107706>
- Dhaarini, S. T., Gomathi, R., Kumaar, C. M., & Yogeswari, K. (2020). An innovative prototype furnace designed to produce activated carbon for removal of chromium from tannery waste. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 6016–6020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.530>
- Duan, D., Chen, D., Huang, L., Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Xiao, G., Zhang, W., Lei, H., & Ruan, R. (2021). Activated carbon from lignocellulosic biomass as catalyst: A review of the applications in fast pyrolysis process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *158*, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105246>
- Duan, D., Feng, Z., Dong, X., Chen, X., Zhang, Y., Wan, K., Wang, Y., Wang, Q., Xiao, G., Liu, H., & Ruan, R. (2021). Improving bio-oil quality from low-density polyethylene pyrolysis: Effects of varying activation and pyrolysis parameters. *Energy*, *232*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121090>
- Dutta, A. (2017). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* (pp. 73–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2>
- el Qada, E. N., Allen, S. J., & Walker, G. M. (2006). Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal: A study of equilibrium adsorption isotherm. *Chemical Engineering Journal*, *124*(1–3), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.08.015>
- Espino Obrego, J. P. (2016). Comparación de los distintos tratamientos para la obtención de carbón activado a nivel laboratorio a partir del endocarpio del coco (cocos nucifera), con base en el índice de yodo [Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala]. In *Emecanica.Ingenieria.Usac.Edu.Gt.*

<http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/wp-content/subidas/6ARTÍCULO-III-INDESA-SIE.pdf>

- Evangelista, S., Viccione, G., & Siani, O. (2019). A new cost effective, long life and low resistance filter cartridge for water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 27, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.004>
- Gale, M., Nguyen, T., Moreno, M., & Gilliard-Abdulaziz, K. L. (2021). Physiochemical Properties of Biochar and Activated Carbon from Biomass Residue: Influence of Process Conditions to Adsorbent Properties. *ACS Omega*, 6(15), 10224–10233. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00530>
- Ghosh, S., Santhosh, R., Jeniffer, S., Raghavan, V., Jacob, G., Nanaji, K., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. (2019). Natural biomass derived hard carbon and activated carbons as electrochemical supercapacitor electrodes. *Scientific Reports*, 9(1), 16315. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52006-x>
- González, J. (2007). Flora digital de palo verde. *Organización Para Estudios Tropicales*, 1–5.
- González Navarrete, B. D. (2017). Desarrollo de carbón activado a partir de desechos agroindustriales con aplicación en adsorción de arsénico. *Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Química Y Biotecnología Desarrollo*, 93.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Edición). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA. [www.FreeLibros.org](http://www.FreeLibros.org)
- Hajji Nabih, M., el Hajam, M., Bouluka, H., Chiki, Z., ben Tahar, S., Idrissi Kandri, N., & Zerouale, A. (2022). Preparation and characterization of activated carbons from cardoon “*Cynara Cardunculus*” waste: Application to the adsorption of synthetic organic dyes. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.414>

- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020a). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *18*(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Herguedas, A. I. de L., & Taranco, C. del P. (2012). *BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD*. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario.
- Hernández Chaverri, R., Mata Segreda, J., Prado Barragán, L., & Buenrostro Figueroa, J. (2022). Physical-chemical characterization of pineapple stubble as possible raw material for bioenergetics. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, *9*(54).
- Hernández Zardón, A. F. (2016). La palma corajo, un recurso natural para la producción sostenible de aceite. *Cultivos Tropicales*, *37*(4), 13–33. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30257.99687>
- Hu, Q., Lan, R., He, L., Liu, H., & Pei, X. (2023). A critical review of adsorption isotherm models for aqueous contaminants: Curve characteristics, site energy distribution and common controversies. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 329). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117104>
- Ighalo, J. O., Arowoyele, L. T., Ogunniyi, S., Adeyanju, C. A., Oladipo-Emmanuel, F. M., Belgore, O. R., Omisore, M. O., & Adeniyi, A. G. (2020). Utilisation of Biomass and Hybrid Biochar from Elephant Grass and Low Density Polyethylene for the Competitive Adsorption of Pb(II), Cu(II), Fe(II) and Zn(II) from Aqueous Media. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, *14*(2), 148–159. <https://doi.org/10.2174/2405520413999201117143926>
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO]. (2022a). *INTE/ISO 17827-1:2022. Biocombustible sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 3:15 mm*. [www.inteco.org](http://www.inteco.org)

- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO]. (2022b). *INTE/ISO 17827-2:2022. Biocombustible sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 2: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o inferior a 3:15 mm.* [www.inteco.org](http://www.inteco.org)
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica. (2020). *ENAH0.2020.Nivel de pobreza por LP según características de los hogares y las personas, julio 2019 y julio 2020.*
- Iphorski, M., & Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e Investigación*, 63(3).
- Kaetzl, K., Lübken, M., Nettmann, E., Krimmler, S., & Wichern, M. (2020). Slow sand filtration of raw wastewater using biochar as an alternative filtration media. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57981-0>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. In *ACS Omega* (Vol. 6, Issue 48, pp. 32342–32348). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Köseoğlu, E., & Akmil-Başar, C. (2015). Preparation, structural evaluation and adsorptive properties of activated carbon from agricultural waste biomass. *Advanced Powder Technology*, 26(3), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.02.006>
- León Ovelar, R., Ortellado, J., Echaury, C., Agüero, J., & Galeano, M. (2019). Residuos de “*Acrocomia aculeata*” como fuente de biomasa: una revisión sistemática. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5(1), 326. <https://doi.org/10.30972/eitt.503768>
- Li, J., Zhou, Q., & Campos, L. C. (2018). The application of GAC sandwich slow sand filtration to remove pharmaceutical and personal care products. *Science of the Total Environment*, 635, 1182–1190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.198>
- Lieb, V. M., Schex, R., Esquivel, P., Jiménez, V. M., Schmarr, H. G., Carle, R., & Steingass, C. B. (2019). Fatty acids and triacylglycerols in the mesocarp and kernel oils of maturing

- Costa Rican *Acrocomia aculeata* fruits. *NFS Journal*, 14–15, 6–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.nfs.2019.02.002>
- Lima, N. E., Carvalho, A. A., Meerow, A. W., & Manfrin, M. H. (2018). A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. In *Organisms Diversity and Evolution* (Vol. 18, Issue 2, pp. 151–161). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13127-018-0362-x>
- Lin, S., Huang, W., Yang, H., Sun, S., & Yu, J. (2020). Recycling application of waste long-root *Eichhornia crassipes* in the heavy metal removal using oxidized biochar derived as adsorbents. *Bioresource Technology*, 314.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123749>
- Luna, D., Gonzáles, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS*, 64(10), 39–48.  
[http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon\\_v2.pdf](http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf)
- Ly, N., Wang, X., Peng, S., Zhang, H., & Luo, L. (2018). Study of the Kinetics and Equilibrium of the Adsorption of Oils onto Hydrophobic Jute Fiber Modified via the Sol-Gel Method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 969. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050969>
- Manals, E., Penedo, M., & Ortega, G. (2011). Thermogravimetric and Thermal Analysis Differential Different Vegetable Biomasses. *Chemical Technology*, 31.
- Martínez, A. (2010). Microanálisis Por Dispersión De Energías De Rayos-X ( XEDS ). In *Servicio de Microscopía Electrónica. SCAI. Universidad de Málaga*.
- Mhemeed, A. (2018). A General Overview on the Adsorption. *Indian Journal of Natural Sciences*, 9(51).
- Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, Pub. L. No. N° 33601, Sistema Costarricense de Información Jurídica (2006).

- Molina González, L. (2017). *Estudio sobre el proceso de producción y la caracterización de la bebida llamada “Vino de Coyol” elaborada a partir de la savia de la palma de Coyol (Acrocomia aculeata) en Nicoya, Guanacaste* [Tesis de Licenciatura para Ingeniería de alimentos., Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/5977>
- Monnier, G. F. (2018). A review of infrared spectroscopy in microarchaeology: Methods, applications, and recent trends. In *Journal of Archaeological Science: Reports* (Vol. 18, pp. 806–823). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.029>
- Montenegro Quesada, D., Montero Rambla, N., Hernández Chaverri, R. A., & Méndez Arias, J. (2021). Production and characterization of activated carbon from pineapple stubble for removal of methylene blue and surfactants. *Journal of Applied Research and Technology*, 19(5), 521–539. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2021.19.5.1480>
- Mopoung, S., & Dejang, N. (2021). Activated carbon preparation from eucalyptus wood chips using continuous carbonization–steam activation process in a batch intermittent rotary kiln. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93249-x>
- Moura, F. C. C., Rios, R. D. F., & Galvão, B. R. L. (2018). Emerging contaminants removal by granular activated carbon obtained from residual Macauba biomass. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 26482–26492. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2713-8>
- Navarro, P., & Vargas, C. (2010). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. *Revista de Metalurgia*, 46(3), 227–239. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0929>
- Nizam, N. U. M., Hanafiah, M. M., Mahmoudi, E., Halim, A. A., & Mohammad, A. W. (2021). The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88084-z>

- Ospina Guarín, V. M., Buitrago Sierra, R., & López López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *TecnoLógicas*, 17(32), 75. <https://doi.org/10.22430/22565337.207>
- Ospina-Guarín, V. M., Buitrago-Sierra, R., & López-López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *TecnoLógicas*, 17(32), 75. <https://doi.org/10.22430/22565337.207>
- Ovelar, R. L., Elena Fernández Boy, M., & Knicker, H. (2017). Caracterización del endocarpio de *Acrocomia aculeata* como sustrato de cultivos. In *Red Española de Compostaje*.
- Pena, J., Villot, A., & Gerente, C. (2020). Pyrolysis chars and physically activated carbons prepared from buckwheat husks for catalytic purification of syngas. *Biomass and Bioenergy*, 132, 105435. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105435>
- Plaza, M. G., Pevida, C., Martín, C. F., Feroso, J., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2010). Developing almond shell-derived activated carbons as CO<sub>2</sub> adsorbents. *Separation and Purification Technology*, 71(1), 102–106. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.11.008>
- Declaratoria de Interés público el aprovechamiento del Coyol (*Acrocomia* SPP) en la producción de biodiesel., Pub. L. No. 41879, Gaceta (2019).
- Quispe, J. I. B., Campos, L. C., Mašek, O., & Bogush, A. (2022). Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: A systematic literature review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 48). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102908>
- Ramírez Muñoz, A. P., Giraldo, S., Flórez Yepes, E., & Acelas Soto, N. Y. (2017). Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 33. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62851>
- Ray, S., & Das, G. (2020). Adsorption. In *Process Equipment and Plant Design* (pp. 351–384). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00012-9>

- Reddy Elavarthi, B. (2021). *GAC filter Design Criteria for Wastewater Treatment for Removal of Organic Micropollutants-A Literature Review*. <http://www.lth.se/chemeng/>
- Rodríguez Bonet, S., Chaparro Aguilera, L., Benítez Villalba, J., Villalba, D., Arévalos Rotela, L., & Benítez Franco, R. (2020). Physicochemical characterization of the pulp and kernel of *Acrocomia aculeata*. *Investigación Agraria*, 22(1), 46–52. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.46-52>
- Rojas, N. G., Villanueva Díaz, P., Campos, E., Alma, M., & Rodríguez, V. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera Año*, 14.
- Rudnykh, S. I., & López-Ríos, V. I. (2018). Elección de la función de deseabilidad para diseños óptimos bajo restricciones. *Revista EIA*, 15(30), 13–24. <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.903>
- Saygılı, H., & Güzel, F. (2016). High surface area mesoporous activated carbon from tomato processing solid waste by zinc chloride activation: process optimization, characterization and dyes adsorption. *Journal of Cleaner Production*, 113, 995–1004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.055>
- Serrano Guerrero, D. J. (2019). *Síntesis de Carbón activado a partir del endocarpio de Cocos nucifera y su aplicación en la adsorción de algunos metales pesados*. Universidad Central del Ecuador.
- SEVILLA, U. (2011). Manual Del Carbón Activo. *Aula.Aguapedia.Org*, 1–89. [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod\\_resource/content/1/CARBoNACTIVO DEFINITIVO tar.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoNACTIVO DEFINITIVO tar.pdf)
- Silva, J. D. C. E., Barrichelo, L. E. G., & Brito, J. O. (1986). ENDOCARPOS DE BABAÇU E DE MACAÚBA COMPARADOS A MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL. *Ipef*, 34, 31–34.
- Silva, M., Baltrus, J. P., Burnett, D. J., & Baltrusaitis, J. (2022). Water Adsorption on Hydroxyapatite and Struvite as a Function of Relative Humidity: Application of BET

- and Freundlich Adsorption Models. *ACS Earth and Space Chemistry*, 6(2), 431–443. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00406>
- Siong, Y. K., Idris, J., & Atabaki, M. M. (2013). Performance of activated carbon in water filters. *Water Resources*, 1–19.
- Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales [ASTM]. (2019). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke (ASTM D5865/D5865M-19)*.
- Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). (2020a). *Standard Test Method for Ash in Biomass*. <https://doi.org/10.1520/E1755-01R20>
- Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). (2020b). *Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass*. <https://doi.org/10.1520/E1756-08R20>
- Solís Fuentes, J. A., Morales Téllez, M., Ayala Tirado, R. C., & Durán de Bazúa, M. D. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal*, 27(1).
- Souza, T. N. V., Vieira, M. G. A., da Silva, M. G. C., Brasil, D. do S. B., & Carvalho, S. M. L. (2019). H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-activated carbons produced from açai stones and Brazil nut shells: removal of basic blue 26 dye from aqueous solutions by adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(28), 28533–28547. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04215-0>
- Sparks, T., & Chase, G. (2016). Filtration – Introduction, Physical Principles and Ratings. In *Filters and Filtration Handbook* (pp. 1–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099396-6.00001-0>
- Takashi Asano. (2015). Water Reuse Issues, Technologies, and Applications Metcalf. In *Metcalf & Eddy* / (Vol. 7, Issue 11).

- Tay, T., Ucar, S., & Karagöz, S. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 481–485. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.011>
- Teixeira, D. A., da Motta, C. R., Ribeiro, C. M. S., & de Castro, A. M. (2017). A rapid enzyme-catalyzed pretreatment of the acidic oil of macauba (*Acrocomia aculeata*) for chemoenzymatic biodiesel production. *Process Biochemistry*, 53, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.12.011>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. v., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tohkemy Corporation. (2022). Filter media. In *TOHKEMY CORPORATION*. <https://doi.org/10.1021/ie50372a013>
- Ulate-Segura, D., & Mata-Segreda, J. (2014). Drying Kinetics as a Method for the Evaluation of Relative Diffusivity of Water in Porous Biomass Materials. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 1–7. <https://doi.org/10.5171/2014.970016>
- Vargas Carpintero, R., Hilger, T., Mössinger, J., Souza, R. F., Barroso Armas, J. C., Tiede, K., & Lewandowski, I. (2021). *Acrocomia* spp.: neglected crop, ballyhooed multipurpose palm or fit for the bioeconomy? A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 41, Issue 6). Springer-Verlag Italia s.r.l. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00729-5>
- Vargas, L., & Maldonado Yactayo, V. (2004). Capítulo 9. Filtración. In Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Ed.), *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de Filtración Rápida* (p. 597). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Vasanth Kumar, K., & Sivanesan, S. (2006). Equilibrium data, isotherm parameters and process design for partial and complete isotherm of methylene blue onto activated

carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 134(1–3), 237–244.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.002>

Velten, S., Boller, M., Köster, O., Helbing, J., Weilenmann, H. U., & Hammes, F. (2011). Development of biomass in a drinking water granular active carbon (GAC) filter. *Water Research*, 45(19), 6347–6354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.017>

Vieira, W. T., Bispo, M. D., de Melo Farias, S., de Almeida, A. D. S. V., da Silva, T. L., Vieira, M. G. A., Soletti, J. I., & Balliano, T. L. (2021). Activated carbon from macauba endocarp (*Acrocomia aculeate*) for removal of atrazine: Experimental and theoretical investigation using descriptors based on DFT. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105155>

Vinayagam, M., Suresh Babu, R., Sivasamy, A., & Ferreira de Barros, A. L. (2020). Biomass-derived porous activated carbon from *Syzygium cumini* fruit shells and *Chrysopogon zizanioides* roots for high-energy density symmetric supercapacitors. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105838>

Visbal H, L., & Rozo Q, A. (2018). Diseño de un Sistema de Filtración Continua Arena - Carbón Activado como herramienta Didáctica en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. *Ingenierías USB Cartagena*, 1–16.  
<https://bibliotecadigital.usb.edu.co/entities/publication/d6a6e40f-f369-4f86-8461-422ffd32a75c>

Walton, K. S., & Snurr, R. Q. (2007). Applicability of the BET method for determining surface areas of microporous metal-organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 129(27), 8552–8556. <https://doi.org/10.1021/ja071174k>

Yahya, M. A., Mansor, M. H., Zolkarnaini, W. A. A. W., Rusli, N. S., Aminuddin, A., Mohamad, K., Sabhan, F. A. M., Atik, A. A. A., & Ozair, L. N. (2018). *A brief review on activated carbon derived from agriculture by-product*. 030023.  
<https://doi.org/10.1063/1.5041244>

- Zamora, N., Gonzáles, J., & Poveda, L. J. (1999). *Árboles y Arbustos del Bosque Seco de Costa Rica*. <http://www.crbio.cr:8080/neoportal-web/species/Acrocomia%20aculeata#description>
- Zhang, F., Zhang, S., Chen, L., Liu, Z., & Qin, J. (2021). Utilization of bark waste of Acacia mangium: The preparation of activated carbon and adsorption of phenolic wastewater. *Industrial Crops and Products*, 160, 113157. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113157>
- Zhang, G., Lei, B., Chen, S., Xie, H., & Zhou, G. (2021). Activated carbon adsorbents with micro-mesoporous structure derived from waste biomass by stepwise activation for toluene removal from air. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105387. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105387>
- Zuo, S., Yang, J., Liu, J., & Cai, X. (2009). Significance of the carbonization of volatile pyrolytic products on the properties of activated carbons from phosphoric acid activation of lignocellulosic material. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 994–1001. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.003>

## Nomenclatura

Símbolo	Magnitud	Unidades
$Q_e$	Cantidad de sustancia adsorbida en la superficie del adsorbente	mg/g
$Q_0$	Cantidad máxima adsorbida de sustancia	mg/g
$C_e$	Concentración adsorbida	ppm
$K_1$	Constante de equilibrio de adsorción de Langmuir	(mg/g) (L/mg)
$K_2$	Constante de disociación de Freunlich	(mg/g) (L/mg)
$n$	intensidad de adsorción	adimensional
$C$	Constante relacionada con el calor de adsorción de la primera capa y las capas siguientes	adimensional
$P$	Presión del sistema	Pa
$P_0$	Presión de vapor del líquido puro	Pa
EBCT	Tiempo de contacto con el lecho vacío	s
$V_b$	Volumen del lecho	$m^3$
$Q$	Flujo volumétrico	$m^3/h$
$V$	Volumen del lecho	$m^3$
$C$	Concentración del contaminante luego del proceso de adsorción	ppm
$C_0$	Concentración del contaminante al inicio	ppm
$m$	masa de carbón activado	g
CUR	Tasa de uso de carbón	mg/L
$M_c$	Masa de carbón en el medio filtrante	mg
$V_t$	volumen en litros	L
$Q_f$	mg de azul de metileno por g de carbón activado	mg/g
$C_r$	Carbón activado requerido	g
$D_c$	desidad de carbón activado	$g/cm^3$
HI	Carga hidráulica	m/h
$A$	Área del lecho	$m^2$



## Apéndices

---

### Apéndice A. Datos Experimentales

**Cuadro A1.** Datos experimentales correspondientes al diámetro longitudinal y transversal para el fruto de *Acrocomia* spp

<b>Código del Coyol</b>	<b>Diámetro longitudinal /(mm)</b>	<b>Diámetro transversal /(mm)</b>
A01	40.9	40.0
A02	39.1	40.8
A03	42.1	41.4
A04	38.6	38.5
A05	36.2	37.5
A06	38.1	39.5
A07	39.0	38.1
A08	37.6	40.6
A09	36.1	37.9
A10	39.3	39.0
A11	38.8	39.1
A12	38.0	39.4
A13	41.7	42.0
A14	37.2	38.8
A15	39.4	39.0
A16	41.6	40.5
A17	39.3	39.0
A18	37.5	38.2
A19	40.0	41.1
A20	38.5	38.5
A21	39.6	39.7
A22	35.9	40.6
A23	39.6	37.6
A24	37.8	37.7
A25	40.1	41.1
A26	38.1	38.0
A27	37.0	39.1
A28	35.9	39.6
A29	37.2	39.2
A30	39.4	40.2

**Cuadro A1 (Continuación).** Datos experimentales correspondientes al diámetro longitudinal y transversal para el fruto de *Acrocomia* spp.

<b>Código del Coyol</b>	<b>Diámetro longitudinal /(mm)</b>	<b>Diámetro transversal /(mm)</b>
A31	39.4	36.1
A32	39.5	39.0
A33	37.2	35.0
A34	36.9	35.6
A35	36.3	33.4
A36	37.4	34.1
A37	38.3	35.4
A38	38.3	38.2
A39	39.5	34.4
A40	38.4	39.9
A41	39.4	36.5
A42	39.8	36.9
A43	36.2	32.6
A44	37.8	34.9
A45	38.1	35.1
A46	39.0	37.0
A47	38.3	37.4
A48	38.5	34.0
A49	38.1	34.7
A50	38.4	37.1
A51	37.2	36.0
A52	37.7	34.3
A53	38.5	36.9
A54	37.9	37.0
A55	40.2	38.8
A56	36.0	35.0
A57	38.5	34.6
A58	39.5	37.0
A59	38.4	33.6
A60	35.5	35.4

**Cuadro A2.** Datos experimentales correspondientes al peso del fruto de *Acrocomia* spp.

<b>Código del Coyol</b>	<b>Peso de Coyoles</b>
A01	22.8677
A02	22.0003
A03	18.6223
A04	15.4424
A05	14.7998
A06	17.4708
A07	19.7304
A08	23.6055
A09	18.0908
A10	18.6774
A11	19.2947
A12	22.4848
A13	13.0450
A14	17.0990
A15	18.0899
A16	22.8619
A17	19.3394
A18	20.6439
A19	18.0165
A20	20.3564
A21	18.9507
A22	17.5259
A23	20.6834
A24	20.5737
A25	23.2677
A26	14.9171
A27	16.3154
A28	21.9170
A29	22.5487
A30	16.3563

**Cuadro A3.** Datos experimentales correspondientes al fraccionamiento del fruto de *Acrocomia* spp.

<b>Código del Coyal</b>	<b>Beaker vacío/ (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Epicarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Mesocarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Endocarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Endosperma / (g)</b>
<b>A01</b>	35.5928	39.7796	35.5919	43.9858	35.5926	44.1138	35.5926	38.7652
<b>A02</b>	35.5929	39.5597	35.5925	43.0023	35.5927	44.6222	35.5924	39.1062
<b>A03</b>	35.5924	39.4882	35.5923	44.0863	35.5924	44.6166	35.5924	38.9927
<b>A04</b>	35.5923	39.1709	35.5925	43.1381	35.5924	43.9325	35.5923	38.5617
<b>A05</b>	35.5926	39.186	35.5928	42.9717	35.5923	42.7114	35.5924	38.5016
<b>A06</b>	35.5924	38.8334	35.5925	42.9015	35.5925	43.8517	35.5925	38.815
<b>A07</b>	35.5925	39.2363	35.5928	41.8697	35.5913	43.0164	35.5913	38.415
<b>A08</b>	35.592	39.5066	35.5921	40.4028	35.5917	43.7978	35.5924	37.7028
<b>A09</b>	35.592	39.2602	35.5923	41.8263	35.5923	43.3836	35.592	38.2334
<b>A10</b>	35.5928	39.7152	35.5912	44.4062	35.5916	44.1352	35.5918	38.5468
<b>A11</b>	35.5924	39.7809	35.5926	42.7072	35.5923	44.1562	35.5922	38.7087
<b>A12</b>	35.5933	39.4525	35.5932	43.1088	35.5916	43.7756	35.5921	38.236
<b>A13</b>	35.5919	40.2912	35.5922	42.4378	35.5913	45.5349	35.5915	38.835
<b>A14</b>	35.5922	39.5291	35.5925	44.5039	35.5924	43.6936	35.5922	39.0125
<b>A15</b>	35.5931	39.4227	35.5931	42.7112	35.593	44.8065	35.5931	38.5099

**Cuadro A3 (Continuación).** Datos experimentales correspondientes al fraccionamiento del fruto de *Acrocomia* spp.

<b>Código del Coyol</b>	<b>Beaker vacío/ (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Epicarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Mesocarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Endocarpio / (g)</b>	<b>Beaker vacío / (g)</b>	<b>Beaker + Masa de Endosperma / (g)</b>
<b>A16</b>	35.5929	39.7474	35.5928	42.4942	35.5929	44.4326	35.5927	38.827
<b>A17</b>	35.5932	39.1643	35.5932	41.702	35.593	41.9218	35.5924	38.2942
<b>A18</b>	35.5925	39.3056	35.5929	41.252	35.5929	44.0332	35.5926	38.217
<b>A19</b>	35.5937	39.7934	35.593	42.6531	35.5925	44.5864	35.5931	38.4205
<b>A20</b>	35.5926	39.3856	35.5932	42.1398	35.5929	44.1792	35.5916	38.3018
<b>A21</b>	35.5921	39.5327	35.5922	43.3149	35.5928	44.3652	35.5926	38.4
<b>A22</b>	35.5932	39.3312	35.5927	42.2154	35.5928	44.5529	35.593	38.4703
<b>A23</b>	35.5929	40.088	35.5926	41.9546	35.5922	44.0531	35.5921	38.6955
<b>A24</b>	35.5923	38.9168	35.5929	40.4722	35.5928	44.3029	35.5925	38.188
<b>A25</b>	35.5928	40.2117	35.5929	44.5237	35.5925	45.1949	35.5927	38.6154
<b>A26</b>	35.5926	38.6861	35.593	41.6787	35.5933	43.485	35.5931	38.4476
<b>A27</b>	35.592	39.8811	35.593	42.4955	35.5932	44.0974	35.5922	38.5847
<b>A28</b>	35.5927	39.5036	35.5926	41.2905	35.5932	43.5243	35.5923	37.6055
<b>A29</b>	35.5932	39.3398	35.5931	43.1129	35.593	44.1894	35.5934	38.4643
<b>A30</b>	35.5936	39.8009	35.5933	42.9403	35.5933	45.5145	35.5931	39.2126

**Cuadro A4.** Datos experimentales correspondientes a la determinación de cenizas para las fracciones del fruto de *Acrocomia* spp.

<b>Código de Coyol</b>	<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Peso de cápsula vacía (g)</b>	<b>Peso de cápsula + Biomasa (g)</b>
0011	Cáscara	31.6580	34.368
0012	Mesocarpio	26.5155	29.3439
0013	Endocarpio	26.9953	33.1597
0014	Endosperma	26.4917	28.3964
0021	Cáscara	26.6399	29.9008
0022	Mesocarpio	29.7168	35.0639
0023	Endocarpio	27.3609	34.446
0024	Endosperma	29.4264	31.9141
0031	Cáscara	31.6621	34.7645
0032	Mesocarpio	26.4923	30.4992
0033	Endocarpio	26.9981	34.0151
0034	Endosperma	26.5188	28.8749
0041	Cáscara	26.6438	29.9316
0042	Mesocarpio	29.7183	33.9901
0043	Endocarpio	29.4271	36.9302
0044	Endosperma	27.3600	30.0604
0051	Cáscara	28.3040	32.0783
0052	Mesocarpio	30.5550	36.5025
0053	Endocarpio	26.5013	34.3089
0054	Endosperma	30.3714	33.0309

**Cuadro A5.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 1 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz /(g)	Masa del tamiz + Endocarpio /(g)
5	4	mm	386.64	403.64
10	2	mm	335.98	646.61
18	1	mm	320.57	444.96
35	500	µm	291.33	317.64
60	250	µm	251.2	267
125	125	µm	259.65	272.07
230	63	µm	235.52	241.79
325	45	µm	234.25	234.33
Fondos			395.35	395.35
Peso	512.9			

**Cuadro A6.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 2 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz (g)	Masa del tamiz + piedra (g)
5	4	mm	386.64	398.26
10	2	mm	335.98	548.42
18	1	mm	320.57	426.48
35	500	µm	291.33	317.44
60	250	µm	251.2	268.97
125	125	µm	259.65	272.81
230	63	µm	235.52	243.32
325	45	µm	234.25	234.32
Fondos			395.35	395.35
Peso	394.88			

**Cuadro A7.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 3 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz (g)	Masa del tamiz + Endocarpio (g)
5	4	mm	386.61	405.57
10	2	mm	336.01	830.75
18	1	mm	320.6	519.1
35	500	µm	291.25	340.1
60	250	µm	251.19	282.3
125	125	µm	259.71	284.67
230	63	µm	235.55	242.43
325	45	µm	234.22	234.22
Fondos			395.47	395.47
Peso	824			

**Cuadro A8.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 1 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz (g)	Masa del tamiz + endocarpio (g)
5	4	mm	386.69	475.6
10	2	mm	336.05	401.94
18	1	mm	320.47	391.27
35	500	µm	291.27	308.11
60	250	µm	251.23	290.34
125	125	µm	259.7	279.79
230	63	µm	235.53	235.92
325	45	µm	234.22	234.24
Fondos			395.32	395.32
Peso	302.05			

**Cuadro A9.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 2 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz (g)	Masa del tamiz + endocarpio (g)
5	4	mm	386.63	608.37
10	2	mm	336.05	369.49
18	1	mm	320.47	357
35	500	µm	291.27	304.73
60	250	µm	251.23	287.95
125	125	µm	259.7	267.88
230	63	µm	235.53	235.57
325	45	µm	234.2	234.24
Fondos			395.35	395.35
Peso	350.15			

**Cuadro A10.** Datos experimentales correspondientes a la corrida 3 para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz (g)	Masa del tamiz + endocarpio (g)
5	4	mm	386.67	565.5
10	2	mm	336	415.59
18	1	mm	320.58	388.26
35	500	µm	291.24	309.13
60	250	µm	251.2	295.098
125	125	µm	259.6	266.79
230	63	µm	235.53	235.53
325	45	µm	234.22	234.22
Fondos			395.32	395.32
Peso	395.078			

**Cuadro A11.** Datos experimentales correspondientes para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de carbón activado de endocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz / (g)	Masa del tamiz + Carbón Activado Endocarpio / (g)
5	4	mm	386.64	398.26
10	2	mm	335.98	548.42
18	1	mm	320.57	426.48
35	500	µm	291.33	317.44
60	250	µm	251.2	268.97
125	125	µm	259.65	272.81
230	63	µm	235.52	243.32
325	45	µm	234.25	234.32
Fondos			395.35	395.35
Peso	394.88			

**Cuadro A12.** Datos experimentales correspondientes para la determinación del tamaño de partícula de la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa del tamiz / (g)	Masa del tamiz + endocarpio-mesocarpio / (g)
5	4	mm	386.8	403.64
10	2	mm	335.85	646.61
18	1	mm	320.48	444.96
35	500	µm	291.3	317.64
60	250	µm	251.14	267
125	125	µm	259.78	272.07
230	63	µm	235.59	241.79
325	45	µm	234.18	234.33
Fondos			395.33	395.35
Peso	521.94			

**Cuadro A13.** Datos experimentales correspondientes para la isoterma de adsorción de azul de metileno elaborada a diferente concentraciones.

ID de muestra	Concentración/ (ppm)	Absorbancia / (adim)
1	100	0.004
1	100	0.012
1	100	0.012
2	200	0.306
2	200	0.341
2	200	0.347
3	300	1.107
3	300	1.121
3	300	1.109
4	400	1.318
4	400	1.365
4	400	1.251
5	500	1.160
5	500	1.165
5	500	1.165
6	600	1.497
6	600	1.466
6	600	1.500
7	700	1.693
7	700	1.702
7	700	1.696
8	800	1.049
8	800	1.049
8	800	1.050
9	900	1.122
9	900	1.130
9	900	1.126
10	1000	1.273
10	1000	1.277
10	1000	1.286

**Cuadro A14.** Datos experimentales correspondientes para la curva de calibración de azul de metileno a 675 nm.

Concentración / (ppm)	Absorbancia / (adim)
1	0.260
2	0.412
3	0.613
4	0.782
5	1.008
6	1.173
7	1.319
8	1.483
9	1.595
10	1.732

**Cuadro A15.** Datos experimentales correspondientes para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp.

Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)	Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)	Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)
0	0	810	3.85	5700	29.66
30	0.07	840	4.01	6000	31.19
60	0.16	870	4.18	6600	34.25
90	0.25	900	4.35	7200	37.3
120	0.36	960	4.68	7800	40.31
150	0.48	1020	5.02	8400	43.27
180	0.6	1080	5.34	9000	46.19
210	0.73	1140	5.67	9600	49.04
240	0.85	1200	6	10200	51.81
270	0.99	1260	6.32	10800	54.52
300	1.13	1320	6.65	11400	57.12
330	1.28	1380	6.97	12000	59.58
360	1.43	1440	7.29	12600	61.89
390	1.58	1500	7.61	13200	63.97
420	1.73	1800	9.23	13800	65.73
450	1.89	2100	10.81	14400	67.08
480	2.04	2400	12.38	15000	68.05
510	2.2	2700	13.96	15600	68.69
540	2.36	3000	15.55	16200	69.07
570	2.52	3300	17.13	16800	69.26
600	2.68	3600	18.71	17400	69.38
630	2.85	3900	20.29	17460	69.39
660	3.01	4200	21.87	17520	69.4
690	3.18	4500	23.45	17580	69.41
720	3.34	4800	25.01	17640	69.42
750	3.51	5100	26.56	17685	69.42
780	3.68	5400	28.12	-	-

**Cuadro A16.** Datos experimentales correspondientes para la curva de secado del endocarpio de *Acrocomia* spp.

Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)	Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)	Tiempo / (s)	Contenido de Humedad / (%)
0	0	870	4.79	8400	39.49
30	0.1	900	4.97	9000	40.2
60	0.21	960	5.33	9600	40.72
90	0.34	1020	5.68	10200	41.1
120	0.48	1080	6.02	10800	41.4
150	0.62	1140	6.37	11400	41.63
180	0.77	1200	6.72	12000	41.82
210	0.93	1260	7.06	12600	41.97
240	1.08	1320	7.4	13200	42.1
270	1.25	1380	7.75	13800	42.21
300	1.42	1440	8.09	14400	42.32
330	1.59	1500	8.43	15000	42.39
360	1.76	1800	10.11		
390	1.94	2100	11.77		
420	2.11	2400	13.4		
450	2.29	2700	15.03		
480	2.46	3000	16.64		
510	2.64	3300	18.23		
540	2.82	3600	19.79		
570	3	3900	21.37		
600	3.18	4200	22.95		
630	3.36	4500	24.5		
660	3.54	4800	26.04		
690	3.72	5100	27.56		
720	3.9	5400	29.06		
725	3.92	5700	30.52		
750	4.08	6000	31.97		
780	4.26	6600	34.65		
810	4.44	7200	36.85		
840	4.62	7800	38.44		

**Cuadro A17.** Datos experimentales correspondientes para la curva de adsorción BET para el carbón activado de endocarpio-mesocarpio.

<b>Presión relativa/ (p/p0)</b>	<b>Cantidad específica adsorbida (nads) / (mol/g)</b>	<b>Presión relativa/ (p/p0)</b>	<b>Cantidad específica adsorbida (nads) / (mol/g)</b>
0	0.00195957	0.50068254	0.00987115
0.00091006	0.00259683	0.55740937	0.01010799
0.00166844	0.00330164	0.63430912	0.01035618
0.00197179	0.00388768	0.69103595	0.01061153
0.00242682	0.00453433	0.75246474	0.01090492
0.00591537	0.00531261	0.81677537	0.01118506
0.02790839	0.0059018	0.84392538	0.01142829
0.02881844	0.00655426	0.88533293	0.01174553
0.05202488	0.00711741	0.90611254	0.01202976
0.07265281	0.00738561	0.92886395	0.01224454
0.09858941	0.00768561	0.93038071	0.01242465
0.1183073	0.00793229	0.94615501	0.01261962
0.14788412	0.00817729	0.9664796	0.01276756
0.1707872	0.00840216	0.96723798	0.01288966
0.21325648	0.00861555	0.9772486	0.01297568
0.30198696	0.00904928	0.9778553	0.01304508
0.32883361	0.00923932	0.98877598	0.01309732
0.42848476	0.00954736		

**Cuadro A18.** Datos experimentales correspondientes para la curva de adsorción BET para el carbón activado de endocarpio.

Presión relativa/ (p/p0)	Cantidad específica adsorbida (nads) / (mol/g)	Presión relativa/ (p/p0)	Cantidad específica adsorbida (nads) / (mol/g)
0	0	0.01050069	0.00464835
0.00030437	0.00011387	0.0141531	0.00501922
0.00030437	0.00021683	0.01719677	0.00567852
0.0009131	0.00031416	0.03424136	0.00607681
0.00106529	0.0004361	0.05006848	0.0062491
0.00121747	0.00058957	0.06437376	0.00646709
0.00152184	0.00074022	0.09678892	0.00672732
0.00152184	0.00086459	0.17470705	0.00709087
0.00243494	0.00110888	0.21777507	0.00720795
0.00258713	0.0013077	0.2664739	0.00731302
0.00243494	0.00151059	0.30756354	0.00740795
0.0038046	0.00172677	0.36919799	0.00750101
0.00243494	0.00193333	0.42200578	0.00758177
0.00258713	0.00217497	0.49459747	0.00763717
0.00350023	0.0024611	0.6017349	0.00772028
0.00456552	0.00288357	0.71130726	0.00779626
0.00456552	0.00314672	0.80657434	0.00785842
0.00350023	0.00352398	0.89636281	0.00791867
0.00700046	0.00385991	0.94932278	0.00796158
0.0085223	0.00427276	0.98341196	0.00799929

**Cuadro A19.** Datos experimentales correspondientes al diseño de los filtros de carbón activado.

Configuración	Tipo de carbón	Tejido de algodón/ (g)	Carbón activado / (g)	Tejido de algodón / (g)	Grava / (g)	Arena / (g)	Volumen de azul de metileno / (m <sup>3</sup> )	Tiempo / (s)
1	Endocarpio	0.1006	13.50345	0.1014	-	-	0.001	797.136
1	Endocarpio	0.1001	13.503	0.1012	-	-	0.001	150.036
1	Endocarpio	0.1002	13.5084	0.1007	-	-	0.001	153.42
1	Endocarpio-Mesocarpio	0.1011	10.50255	0.1023	-	-	0.001	2099.64
1	Endocarpio-Mesocarpio	0.1002	10.50765	0.1043	-	-	0.001	1400.16
1	Endocarpio-Mesocarpio	0.1004	10.50915	0.1013	-	-	0.001	1425.798
2	Endocarpio	0.1043	5.0185	0.1059	10.0204	10.1086	0.001	1321.638
2	Endocarpio	0.1024	5.009	0.1078	10.0033	10.0861	0.001	1662.6
2	Endocarpio	0.1011	5.08525	0.1047	10.0194	10.0687	0.001	1687.8
2	Endocarpio-Mesocarpio	0.1038	5.0005	0.102	10.0464	10.033	0.001	1362.72
2	Endocarpio-Mesocarpio	0.1011	5.0455	0.101	10.0264	10.0481	0.001	1414.68
2	Endocarpio-Mesocarpio	0.1048	5.02775	0.1055	10.0094	10.0455	0.001	901.638

**Cuadro A20.** Datos experimentales correspondientes al número de ciclos de reutilización del filtro para el filtro de carbón activado de endocarpio-mesocarpio.

Número de ciclo	Concentración	Factor de dilución
Ciclo 1	9.465	1
Ciclo 2	2.405	25
Ciclo 3	4.325	25
Ciclo 4	5.037	25
Ciclo 5	5.961	25
Ciclo 6	6.145	25

**Cuadro A21.** Datos experimentales correspondientes al número de ciclos de reutilización del filtro para el filtro de carbón activado de endocarpio-mesocarpio.

Carbón Activado de Endocarpio / (g)	Volumen del carbón activado de endocarpio/ (mL)	Carbón Activado de Endocarpio-Mesocarpio/ (g)	Volumen del carbón activado de endocarpio-mesocarpio (mL)
16.1248	40	31.0266	54
16.0074	46	30.3022	54
14.326	42	31.2681	52

**Cuadro A22.** Datos experimentales correspondientes a la fabricación de carbón activado a las condiciones de 500 °C y 1.5 h.

ID de muestra	Tipo de muestra	Masa Vacía de Cápsula	Masa de cápsula + Biomasa	Masa de cápsula + biomasa + Ácido fosfórico
1	Endocarpio - mesocarpio	27.7875	28.8367	29.8404
2	Endocarpio - mesocarpio	26.0898	27.1081	28.1219
3	Endocarpio - mesocarpio	26.6627	27.6787	28.6995
4	Endocarpio	25.6505	26.6516	28.684
5	Endocarpio	24.9858	25.9702	26.9973
6	Endocarpio	26.1155	27.1207	28.1223

**Cuadro A23.** Datos experimentales correspondientes a las concentraciones finales obtenidas posterior a la adsorción de azul de metileno para los filtros del diseño experimental.

<b>Identificación</b>	<b>Réplicas</b>	<b>Concentraciones/ (ppm)</b>	<b>Factor de dilución/ (mL)</b>
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	8.309	1
	Replica 2	8.426	1
	Replica 3	8.442	1
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	3.002	25
	Replica 2	3.001	25
	Replica 3	3.01	25
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	4.97	25
	Replica 2	5.07	25
	Replica 3	5.082	25
Configuración 1 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	0.466	25
	Replica 2	0.439	25
	Replica 3	0.385	25
Configuración 1 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	0.345	25
	Replica 2	0.358	25
	Replica 3	0.415	25
Configuración 1 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	1.641	25
	Replica 2	1.713	25
	Replica 3	1.664	25
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	7.626	50
	Replica 2	7.979	50
	Replica 3	7.941	50
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	12.161	25
	Replica 2	11.968	25
	Replica 3	11.635	25
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	12.943	25
	Replica 2	12.81	25
	Replica 3	12.496	25
Configuración 2 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	5.318	50
	Replica 2	5.196	50
	Replica 3	5.232	50
Configuración 2 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	2.716	100
	Replica 2	3.095	100
	Replica 3	1.727	100
Configuración 2 carbón activado de endocarpio-mesocarpio	Replica 1	5.235	50
	Replica 2	5.485	50
	Replica 3	5.504	50

**Cuadro A24.** Datos experimentales correspondientes al diseño factorial empleado para la muestra de endocarpio de *Acrocomia spp*

Código del Coyol	Temperatura	Tiempo	Masa de la cápsula vacía/ (g)	Masa de la Biomasa/ (g)	Masa del Activante/ (g)	Masa de carbón obtenida + cápsula / (g)
A14	1	-1	33.2828	1.0336	1.3	34.3926
A10	-1	1	26.2142	1.0644	1.2	27.41
A11	-1	1	26.1674	1.0384	1.2	27.3627
A01	0	0	27.7286	1.0639	1.2	29.0095
A02	0	0	26.0604	1.1031	1.4	27.1753
A19	-1	-1	26.1685	1.0121	1.2	27.3429
A03	0	0	26.6736	1.0362	1.4	27.9129
A15	1	-1	34.3439	1.0221	1.2	35.4336
A17	1	-1	33.5707	1.0231	1.2	34.6441
A29	-1	-1	26.098	1.0199	1.2	27.2985
A20	1	1	33.3733	1.0261	1.2	34.3375
A30	-1	-1	26.6661	1.0257	1.2	27.8903
A18	-1	1	26.7079	1.0073	1.3	27.9747
A25	1	1	34.4322	1.0004	1.2	35.327
A26	1	1	33.6847	1.0355	1.4	34.6384

**Cuadro A25.** Datos experimentales correspondientes al diseño factorial empleado para la muestra de endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia spp*

Código de coyol	Temperatura	Tiempo	Masa de la cápsula vacía/ (g)	Masa de la Biomasa/ (g)	Masa del Activante/ (g)	Masa de carbón obtenida + cápsula / (g)
A12	1	-1	35.2615	1.0513	1.2	36.4317
A08	-1	1	25.7429	1.0472	1.3	27.0716
A09	-1	1	25.0786	1.0208	1.3	26.3741
A04	0	0	25.6515	1.0033	1.3	26.7919
A05	0	0	24.996	1.1252	1.3	26.2272
A23	-1	-1	25.7035	1.0016	1.2	26.8354
A06	0	0	26.1392	1.1683	1.2	27.2794
A13	1	-1	32.2196	1.0397	1.2	33.2916
A16	1	-1	35.565	1.0391	1.2	36.6725
A27	-1	-1	25.0374	1.0182	1.2	26.1916
A24	1	1	35.3543	1.0256	1.3	36.4326
A28	-1	-1	27.7513	1.0007	1.2	28.9235
A07	-1	1	27.7798	1.1011	1.3	29.0937
A21	1	1	32.294	1.0148	1.3	33.276
A22	1	1	35.6273	1.0445	1.2	36.6473

**Cuadro A26.** Datos experimentales correspondientes al porcentaje de humedad del carbón activado.

ID de la muestra	Peso inicial / (g)	Peso seco / (g)
Carbón activado comercial	1.075	0.849
Carbón activado comercial	1.011	0.78
Carbón activado comercial	1.012	0.786
Carbón activado endocarpio	1.002	0.957
Carbón activado endocarpio	1.005	0.959
Carbón activado endocarpio	1.018	0.97
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	1.018	0.929
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	1.015	0.933
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	1.100	1.011

**Cuadro A27.** Datos experimentales correspondientes al porcentaje de humedad de las fracciones de *Acrocomia* spp

<b>Código de Coyol</b>	<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Crisol/ (g)</b>	<b>Masa de muestra + crisol / (g)</b>	<b>Masa de la muestra seca +crisol / (g)</b>
0011	Cáscara	28.7096	31.599	31.1523
0012	Mesocarpio	28.478	31.7856	31.0626
0013	Endocarpio	28.9014	35.4898	34.7607
0014	Endosperma	40.5405	42.5008	42.411
0021	Cáscara	34.3714	37.8684	37.305
0022	Mesocarpio	34.5735	40.8998	39.4691
0023	Endocarpio	40.54	48.021	47.1221
0024	Endosperma	40.2902	42.8444	42.7024
0031	Cáscara	28.2932	32.0412	31.444
0032	Mesocarpio	28.7949	35.0043	33.6016
0033	Endocarpio	39.7733	48.5561	47.6312
0034	Endosperma	39.7733	42.7639	42.576
0041	Cáscara	35.5256	39.4929	38.7918
0042	Mesocarpio	28.2812	34.7497	33.2464
0043	Endocarpio	40.5128	48.7731	47.7701
0044	Endosperma	40.5955	43.4422	43.2557
0051	Cáscara	35.594	39.7005	38.9836
0052	Mesocarpio	28.0245	35.1028	33.3877
0053	Endocarpio	40.4722	48.6813	47.679
0054	Endosperma	40.4398	43.2577	43.0831



## Apéndice B. Datos Intermedios

**Cuadro B1.** Resultados obtenidos para el diámetro promedio longitudinal y transversal del fruto de *Acrocomia* spp

<b>Variable</b>	<b>Diámetro Longitudinal / (mm)</b>	<b>Diámetro transversal / (mm)</b>
<b>Promedio</b>	38,4	37,6
<b>Desviación Estándar</b>	1,5	2,3

**Cuadro B2.** Resultados obtenidos para el volumen, peso y densidad de los frutos de *Acrocomia* spp

<b>Código del Coyol</b>	<b>Volumen/ (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen / (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso / (g)</b>	<b>Densidad / (g/ m<sup>3</sup>)</b>
A01	26884.95	26.88	22.87	0.85
A02	31457.55	31.46	22.00	0.70
A03	23860.40	23.86	18.62	0.78
A04	24486.40	24.49	15.44	0.63
A05	21203.04	21.20	14.80	0.70
A06	22770.84	22.77	17.47	0.77
A07	25130.66	25.13	19.73	0.79
A08	29263.36	29.26	23.61	0.81
A09	24474.43	24.47	18.09	0.74
A10	32009.26	32.01	18.68	0.58
A11	27484.04	27.48	19.29	0.70
A12	28374.91	28.37	22.48	0.79
A13	20143.85	20.14	13.05	0.65
A14	24106.89	24.11	17.10	0.71
A15	24577.51	24.58	18.09	0.74
A16	27955.46	27.96	22.86	0.82
A17	28050.50	28.05	19.34	0.69
A18	23303.29	23.30	20.64	0.89
A19	24020.53	24.02	18.02	0.75
A20	27674.37	27.67	20.36	0.74
A21	25243.33	25.24	18.95	0.75
A22	23223.53	23.22	17.53	0.75
A23	27448.09	27.45	20.68	0.75
A24	27166.97	27.17	20.57	0.76
A25	31687.51	31.69	23.27	0.73
A26	23090.71	23.09	14.92	0.65
A27	24133.01	24.13	16.32	0.68
A28	28313.87	28.31	21.92	0.77
A29	22699.09	22.70	22.55	0.99
A30	23293.43	23.29	16.36	0.70
<b>Total</b>	<b>25685.06</b>	<b>25.78</b>	<b>19.19</b>	<b>0.74</b>
<b>Desviación</b>	<b>1.91</b>	<b>3.04</b>	<b>2.81</b>	<b>0.08</b>

**Cuadro B3.** Resultados obtenidos el peso fresco de cada parte del fruto de *Acrocomia* spp

<b>Código del Coyol</b>	<b>Cáscara /(g)</b>	<b>Mesocarpio / (g)</b>	<b>Endocarpio / (g)</b>	<b>Semilla /(g)</b>	<b>Masa total/ (g)</b>
<b>A01</b>	4.1868	8.3939	8.5212	3.1726	24.2745
<b>A02</b>	3.9668	7.4098	9.0295	3.5138	23.9199
<b>A03</b>	3.8958	8.494	9.0242	3.4003	24.8143
<b>A04</b>	3.5786	7.5456	8.3401	2.9694	22.4337
<b>A05</b>	3.5934	7.3789	7.1191	2.9092	21.0006
<b>A06</b>	3.241	7.309	8.2592	3.2225	22.0317
<b>A07</b>	3.6438	6.2769	7.4251	2.8237	20.1695
<b>A08</b>	3.9146	4.8107	8.2061	2.1104	19.0418
<b>A09</b>	3.6682	6.234	7.7913	2.6414	20.3349
<b>A10</b>	4.1224	8.815	8.5436	2.955	24.436
<b>A11</b>	4.1885	7.1146	8.5639	3.1165	22.9835
<b>A12</b>	3.8592	7.5156	8.184	2.6439	22.2027
<b>A13</b>	4.6993	6.8456	9.9436	3.2435	24.732
<b>A14</b>	3.9369	8.9114	8.1012	3.4203	24.3698
<b>A15</b>	3.8296	7.1181	9.2135	2.9168	23.078
<b>A16</b>	4.1545	6.9014	8.8397	3.2343	23.1299
<b>A17</b>	3.5711	6.1088	6.3288	2.7018	18.7105
<b>A18</b>	3.7131	5.6591	8.4403	2.6244	20.4369
<b>A19</b>	4.1997	7.0601	8.9939	2.8274	23.0811
<b>A20</b>	3.793	6.5466	8.5863	2.7102	21.6361
<b>A21</b>	3.9406	7.7227	8.7724	2.8074	23.2431
<b>A22</b>	3.738	6.6227	8.9601	2.8773	22.1981
<b>A23</b>	4.4951	6.362	8.4609	3.1034	22.4214
<b>A24</b>	3.3245	4.8793	8.7101	2.5955	19.5094
<b>A25</b>	4.6189	8.9308	9.6024	3.0227	26.1748
<b>A26</b>	3.0935	6.0857	7.8917	2.8545	19.9254
<b>A27</b>	4.2891	6.9025	8.5042	2.9925	22.6883
<b>A28</b>	3.9109	5.6979	7.9311	2.0132	19.5531
<b>A29</b>	3.7466	7.5198	8.5964	2.8709	22.7337
<b>A30</b>	4.2073	7.347	9.9212	3.6195	25.095
<b>Total</b>	3.9040	7.0173	8.4935	2.9305	22.3453
<b>Desviación</b>	0.3749	1.0680	0.7543	0.3584	1.9702

**Cuadro B4.** Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad del carbón activado sintetizado y comercial.

Identificación	Humedad / (%)	Promedio / (%)	Desviación estándar / (%)
Carbón activado comercial	21.02		
Carbón activado comercial	22.85	22.07	0.94
Carbón activado comercial	22.33		
Carbón activado endocarpio	4.49		
Carbón activado endocarpio	4.58	4.59	0.11
Carbón activado endocarpio	4.72		
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	8.74		
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	8.08	8.30	0.38
Carbón activado endocarpio-mesocarpio	8.09		

**Cuadro B5.** Resultados obtenidos para la corrida 1 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de Endocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	11.62	0.029426661	0.029426661
10	2	mm	212.44	0.537986224	0.567412885
18	1	mm	105.91	0.268208063	0.835620948
35	500	µm	26.11	0.066121353	0.901742301
60	250	µm	17.77	0.045001013	0.946743314
125	125	µm	13.16	0.03332658	0.980069895
230	63	µm	7.8	0.019752836	0.999822731
325	45	µm	0.07	0.000177269	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B6.** Resultados obtenidos para la corrida 2 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de Endocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	18.96	0.023009709	0.023009709
10	2	mm	494.74	0.600412621	0.62342233
18	1	mm	198.5	0.240898058	0.864320388
35	500	µm	48.85	0.059283981	0.923604369
60	250	µm	31.11	0.037754854	0.961359223
125	125	µm	24.96	0.030291262	0.991650485
230	63	µm	6.88	0.008349515	1
325	45	µm	0	0	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B7.** Resultados obtenidos para la corrida 3 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio.

Número de Tamiz	Tam iz	Unida des	Masa retenida de Endocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	18.96	0.023009709	0.023009709
10	2	mm	494.74	0.600412621	0.62342233
18	1	mm	198.5	0.240898058	0.864320388
35	500	µm	48.85	0.059283981	0.923604369
60	250	µm	31.11	0.037754854	0.961359223
125	125	µm	24.96	0.030291262	0.991650485
230	63	µm	6.88	0.008349515	1
325	45	µm	0	0	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B8.** Promedio de los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio.

Número de Tamiz	Tam iz	Unida des	Masa retenida de Endocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	15.86	0.03	0.027474621
10	2	mm	339.27	0.59	0.61519939
18	1	mm	142.93	0.25	0.862805899
35	500	µm	33.76	0.06	0.921283304
60	250	µm	21.56	0.04	0.958632159
125	125	µm	16.85	0.03	0.987816004
230	63	µm	6.98	0.01	0.999913384
325	45	µm	0.05	0.00	1
Fondos			0.00	0.00	1

**Cuadro B9.** Resultados obtenidos para la corrida 1 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.

Número de Tamiz	Tam iz	Unida des	Masa retenida de Endocarpio-Mesocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	88.91	0.294355239	0.294355239
10	2	mm	65.89	0.218142692	0.218142692
18	1	mm	70.8	0.234398278	0.234398278
35	500	µm	16.84	0.055752359	0.055752359
60	250	µm	39.11	0.129481874	0.129481874
125	125	µm	20.09	0.066512167	0.066512167
230	63	µm	0.39	0.001291177	0.001291177
325	45	µm	0.02	6.62142E-05	6.62142E-05
Fondos			0	0	0

**Cuadro B10.** Resultados obtenidos para la corrida 2 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de Endocarpio-Mesocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	221.74	0.633271455	0.633271455
10	2	mm	33.44	0.095501928	0.728773383
18	1	mm	36.53	0.104326717	0.8331001
35	500	µm	13.46	0.038440668	0.871540768
60	250	µm	36.72	0.104869342	0.97641011
125	125	µm	8.18	0.023361417	0.999771526
230	63	µm	0.04	0.000114237	0.999885763
325	45	µm	0.04	0.000114237	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B11.** Resultados obtenidos para la corrida 3 de la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de Endocarpio-Mesocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	178.83	0.452644794	0.452644794
10	2	mm	79.59	0.20145389	0.654098684
18	1	mm	67.68	0.171307944	0.825406629
35	500	µm	17.89	0.045282197	0.870688826
60	250	µm	43.898	0.111112236	0.981801062
125	125	µm	7.19	0.018198938	1
230	63	µm	0	0	1
325	45	µm	0	0	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B12.** Promedio de los resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de endocarpio-mesocarpio.

Número de Tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de Endocarpio-Mesocarpio/(g)	Fracción másica	Fracción de masa retenida acumulada
5	4	mm	163.16	0.47	0.467383064
10	2	mm	59.64	0.17	0.638225953
18	1	mm	58.34	0.17	0.805335355
35	500	µm	16.06	0.05	0.85134988
60	250	µm	39.91	0.11	0.965672916
125	125	µm	11.82	0.03	0.99953212
230	63	µm	0.14	0.00	0.999942709
325	45	µm	0.02	0.00	1
Fondos			0.00	0.00	1

**Cuadro B13.** Resultados obtenidos para el porcentaje de cenizas para las fracciones del fruto de *Acrocomia* spp

Código de Coyol	Tipo de Muestra	Peso de Cenizas / (g)	Porcentaje de cenizas / (%)
0011	Cáscara	31.7529	3.501845018
0012	Mesocarpio	26.7122	6.954461887
0013	Endocarpio	27.1148	1.938550386
0014	Endosperma	26.5262	1.811308868
0021	Cáscara	26.7601	3.68609893
0022	Mesocarpio	29.9942	5.187858839
0023	Endocarpio	27.4865	1.77273433
0024	Endosperma	29.4734	1.889295333
0031	Cáscara	31.8063	4.64801444
0032	Mesocarpio	26.7507	6.448875689
0033	Endocarpio	27.1291	1.866894684
0034	Endosperma	26.5697	2.16034973
0041	Cáscara	26.7907	4.468033335
0042	Mesocarpio	30.0266	7.217098179
0043	Endocarpio	29.6147	2.500299876
0044	Endosperma	27.4161	2.077470004
0051	Cáscara	28.4557	4.019288345
0052	Mesocarpio	30.8671	5.247583018
0053	Endocarpio	26.6559	1.980121932
0054	Endosperma	30.4242	1.985335589
Promedio de cenizas Cáscara	4.064656014	Desviación estándar	4.064656014
Promedio de cenizas Mesocarpio	6.211175522	Desviación estándar	6.211175522
Promedio de cenizas Endocarpio	2.011720242	Desviación estándar	2.011720242
Promedio de cenizas Endosperma	1.984751905	Desviación estándar	1.984751905

**Cuadro B14.** Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio.

Número de tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de carbón activado/ (g)	Fracción masica	Fraccion de masa retenida acumulada
5	4	mm	11.62	0.029426661	0.029426661
10	2	mm	212.44	0.537986224	0.567412885
18	1	mm	105.91	0.268208063	0.835620948
35	500	µm	26.11	0.066121353	0.901742301
60	250	µm	17.77	0.045001013	0.946743314
125	125	µm	13.16	0.03332658	0.980069895
230	63	µm	7.8	0.019752836	0.999822731
325	45	µm	0.07	0.000177269	1
Fondos			0	0	1

**Cuadro B15.** Resultados obtenidos para la distribución de tamaño de partícula para la muestra de carbón activado de endocarpio.

Número de tamiz	Tamiz	Unidades	Masa retenida de carbón activado/ (g)	Fracción masica	Fraccion de masa retenida acumulada
5	4	mm	403.64	16.84	0.032830351
10	2	mm	646.61	310.76	0.605840839
18	1	mm	444.96	124.48	0.242679456
35	500	µm	317.64	26.34	0.051351035
60	250	µm	267	15.86	0.030919796
125	125	µm	272.07	12.29	0.023959917
230	63	µm	241.79	6.2	0.012087184
325	45	µm	234.33	0.15	0.000292432
Fondos			395.35	0.02	3.89909E-05

**Cuadro B16.** Resultados obtenidos para las isotermas de adsorción de azul de metileno empleando carbón activado sintetizado a 500 °C y 1.5 h.

ID de muestra	Abs 675 (AU)	Cantidad de carbón (g)	Volumen d azul de metileno (L)	Factor de dilución	Concentración Final (Ce)/ (ppm)	Concentración Inicial / (ppm)	Qf/ (mg/g)	Log (Ce)	log (Qf)	1/Ce	1/Qf
Patrón1	0.009	0.01	0.05	25.00	1.609	100	491.954	0.207	2.692	0.621	0.002
Patrón2	0.331	0.01	0.05	25.00	32.135	200	839.325	1.507	2.924	0.031	0.001
Patrón3	1.112	0.01	0.05	25.00	148.633	300	756.837	2.172	2.879	0.007	0.001
Patrón4	1.311	0.01	0.05	25.00	178.316	400	1108.418	2.251	3.045	0.006	0.001
Patrón5	1.163	0.01	0.05	50.00	312.480	500	937.599	2.495	2.972	0.003	0.001
Patrón6	1.488	0.01	0.05	50.00	409.238	600	953.809	2.612	2.979	0.002	0.001
Patrón7	1.697	0.01	0.05	50.00	471.689	700	1141.557	2.674	3.057	0.002	0.001
Patrón8	1.049	0.01	0.05	100.00	556.941	800	1215.294	2.746	3.085	0.002	0.001
Patrón9	1.126	0.01	0.05	100.00	602.685	900	1486.575	2.780	3.172	0.002	0.001
Patrón10	1.279	0.01	0.05	100.00	693.775	1000	1531.126	2.841	3.185	0.001	0.001

**Cuadro B17.** Resultados obtenidos para la adsorción de azul de metileno por g de carbón activado para los carbones sintetizados.

ID de muestra	Tipo de muestra	Masa Final	Masa de carbón luego de lavado / (g)	Abs 675 (AU)	Concentración / (ppm)	Qf / (mg/g)
1	Endocarpio - mesocarpio	1.0492	0.5094	0.251	1.498	39.1148789
2	Endocarpio - mesocarpio	1.0183	0.4937	0.206	1.229	40.3859513
3	Endocarpio - mesocarpio	1.016	0.4163	0.312	1.862	47.8186914
4	Endocarpio	1.0011	0.4509	0.06	0.358	44.3160351
5	Endocarpio	0.9844	0.4939	0.021	0.125	40.4813425
6	Endocarpio	1.0052	0.4077	0.032	0.191	49.0322626



**Cuadro B18.** Resultados obtenidos para las variables de diseño obtenidas para los filtros

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Co-Ce	221.68	ppm
Ce	178.32	
Kf	442.08	(mg/g)(L/mg)
Co	400.00	ppm
1/n	0.16	adim
Co ^1/n	2.59	
GAC USAGE	0.19	g /L
Densidad	3.63E-04	g/L
Densidad	0.36	g/m <sup>3</sup>
EBCT	1.42E-02	h
EBCT	51.04	min
R	9.50	mm
A	2.84E-04	m <sup>2</sup>
V	14176.44	mm <sup>3</sup>
V	1.42E-05	m <sup>3</sup>
Q	1.00E-03	m <sup>3</sup> /h
HL	3.53	m/h
Carbon requerido	5.15	g
Agua tratada	26.54	L
Altura del carbón configuración 1	6.00	cm
Altura del carbón configuración 2	2.00	cm
Arena configuración 2	2.00	cm
Grava configuración 2	2.00	cm

**Cuadro B19.** Resultados obtenidos para las densidades de los carbones activados sintetizados

Carbón Activado de Endocarpio				
	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad (g/L)
	16.1248	40	0.40	403.12
	16.0074	46	0.35	347.99
	14.326	42	0.34	341.10
Promedio	15.49	42.67	0.36	362.95
Carbón Activado de Endocarpio-Mesocarpio				
	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad (g/L)
	31.0266	54	0.57	574.57
	30.3022	54	0.56	561.15
	31.2681	52	0.60	601.31
Promedio	30.87	53.33	0.58	578.73

**Cuadro B20.** Resultados obtenidos para los ciclos de reutilización del filtro con mejores capacidad de remoción de mg de azul de metileno por g de carbón activado.

Número de ciclo	Concentración / (ppm)	Factor de dilución	Concentración Final / (ppm)
Ciclo 1	9.465	1	9.465
Ciclo 2	2.405	25	60.125
Ciclo 3	4.325	25	108.125
Ciclo 4	5.037	25	125.925
Ciclo 5	5.961	25	149.025
Ciclo 6	6.145	25	153.625

**Cuadro B21.** Resultados para la adsorción de azul de metileno para los filtros de carbón activado.

Identificación	Réplicas	Concentración final / (ppm)	Cantidad de carbón / (g)	Qf / (mg/g)
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	8.309	13.50345	29.0067353
	Replica 2	8.426	13.50345	28.9980709
	Replica 3	8.442	13.50345	28.996886
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	75.050	13.503	24.0650226
	Replica 2	75.025	13.503	24.066874
	Replica 3	75.250	13.503	24.0502111
Configuración 1 carbón activado de endocarpio	Replica 1	124.250	13.5084	20.4132244
	Replica 2	126.750	13.5084	20.2281543
	Replica 3	127.050	13.5084	20.2059459
Configuración 1 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	11.650	10.50255	36.9767342
	Replica 2	10.975	10.50255	37.0410043
	Replica 3	9.625	10.50255	37.1695445
Configuración 1 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	8.625	10.50765	37.2466727
	Replica 2	8.950	10.50765	37.2157428
	Replica 3	10.375	10.50765	37.0801273
Configuración 1 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	41.025	10.50915	34.1583287
	Replica 2	42.825	10.50915	33.9870494
	Replica 3	41.600	10.50915	34.1036145
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	381.300	5.0185	3.72621301
	Replica 2	398.950	5.0185	0.20922586
	Replica 3	397.050	5.0185	0.58782505
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	304.025	5.009	19.1605111
	Replica 2	299.200	5.009	20.1237772
	Replica 3	290.875	5.009	21.7857856
Configuración 2 carbón activado de endocarpio	Replica 1	323.575	5.08525	15.0287596
	Replica 2	320.250	5.08525	15.6826115
	Replica 3	312.400	5.08525	17.2262917
Configuración 2 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	265.900	5.0005	26.8173183
	Replica 2	259.800	5.0005	28.0371963
	Replica 3	261.600	5.0005	27.6772323
Configuración 2 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	271.600	5.0455	25.4484194
	Replica 2	309.500	5.0455	17.9367753
	Replica 3	172.700	5.0455	45.0500446
Configuración 2 carbón activado de endocarpio- mesocarpio	Replica 1	261.750	5.02775	27.4973895
	Replica 2	274.250	5.02775	25.0111879
	Replica 3	275.200	5.02775	24.8222366

**Cuadro B22.** Resultados para la curva de secado del endocarpio de *Acrocomia* spp

Tiempo. $t$ /(min)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(g)	Tiempo. $t$ /(s)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(kg)	Humedad. $X$ /(kg/kg)	$-dX/dt$ /(kg/kg s)	Rapidez de secado. $R$ /(kg/m <sup>2</sup> s)
0.00	24.463	0	0.02446	0.7358		
0.50	24.438537	30	0.02444	0.734	0.00006	1.282E-04
1.00	24.4116277	60	0.02441	0.732	0.00006	1.410E-04
1.50	24.3798258	90	0.02438	0.730	0.00008	1.666E-04
2.00	24.3455776	120	0.02435	0.727	0.00008	1.794E-04
2.50	24.3113294	150	0.02431	0.725	0.00008	1.794E-04
3.00	24.2746349	180	0.02427	0.722	0.00009	1.923E-04
3.50	24.2354941	210	0.02424	0.720	0.00009	2.051E-04
4.00	24.1987996	240	0.02420	0.717	0.00009	1.923E-04
4.50	24.1572125	270	0.02416	0.714	0.00010	2.179E-04
5.00	24.1156254	300	0.02412	0.711	0.00010	2.179E-04
5.50	24.0740383	330	0.02407	0.708	0.00010	2.179E-04
6.00	24.0324512	360	0.02403	0.705	0.00010	2.179E-04
6.50	23.9884178	390	0.02399	0.702	0.00010	2.307E-04
7.00	23.9468307	420	0.02395	0.699	0.00010	2.179E-04
7.50	23.9027973	450	0.02390	0.696	0.00010	2.307E-04
8.00	23.8612102	480	0.02386	0.693	0.00010	2.179E-04
8.50	23.8171768	510	0.02382	0.690	0.00010	2.307E-04
9.00	23.7731434	540	0.02377	0.687	0.00010	2.307E-04
9.50	23.72911	570	0.02373	0.684	0.00010	2.307E-04
10.00	23.6850766	600	0.02369	0.681	0.00010	2.307E-04
10.50	23.6410432	630	0.02364	0.677	0.00010	2.307E-04
11.00	23.5970098	660	0.02360	0.674	0.00010	2.307E-04
11.50	23.5529764	690	0.02355	0.671	0.00010	2.307E-04
12.00	23.508943	720	0.02351	0.668	0.00010	2.307E-04
12.08	23.5040504	725	0.02350	0.668	0.00007	1.538E-04
12.50	23.4649096	750	0.02346	0.665	0.00011	2.461E-04
13.00	23.4208762	780	0.02342	0.662	0.00010	2.307E-04
13.50	23.3768428	810	0.02338	0.659	0.00010	2.307E-04
14.00	23.3328094	840	0.02333	0.656	0.00010	2.307E-04

**Continuación del cuadro B22.** Resultados para la la curva de secado del endocarpio de *Acrocomia* spp

Tiempo. $t$ /(min)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(g)	Tiempo. $t$ /(s)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(kg)	Humedad. $X$ /(kg/kg)	$-dX/dt$ /(kg/kg s)	Rapidez de secado. $R$ /(kg/m <sup>2</sup> s)
14.50	23.2912223	870	0.02329	0.653	0.00010	2.179E-04
15.00	23.2471889	900	0.02325	0.650	0.00010	2.307E-04
16.00	23.1591221	960	0.02316	0.643	0.00010	2.307E-04
17.00	23.0735016	1020	0.02307	0.637	0.00010	2.243E-04
18.00	22.9903274	1080	0.02299	0.631	0.00010	2.179E-04
19.00	22.9047069	1140	0.02290	0.625	0.00010	2.243E-04
20.00	22.8190864	1200	0.02282	0.619	0.00010	2.243E-04
21.00	22.7359122	1260	0.02274	0.613	0.00010	2.179E-04
22.00	22.652738	1320	0.02265	0.607	0.00010	2.179E-04
23.00	22.5671175	1380	0.02257	0.601	0.00010	2.243E-04
24.00	22.4839433	1440	0.02248	0.595	0.00010	2.179E-04
25.00	22.4007691	1500	0.02240	0.589	0.00010	2.179E-04
30.00	21.9897907	1800	0.02199	0.560	0.00010	2.153E-04
35.00	21.5837049	2100	0.02158	0.532	0.00010	2.128E-04
40.00	21.184958	2400	0.02118	0.503	0.00009	2.089E-04
45.00	20.7862111	2700	0.02079	0.475	0.00009	2.089E-04
50.00	20.3923568	3000	0.02039	0.447	0.00009	2.064E-04
55.00	20.0033951	3300	0.02000	0.419	0.00009	2.038E-04
60.00	19.6217723	3600	0.01962	0.392	0.00009	2.000E-04
65.00	19.2352569	3900	0.01924	0.365	0.00009	2.025E-04
70.00	18.8487415	4200	0.01885	0.337	0.00009	2.025E-04
75.00	18.469565	4500	0.01847	0.311	0.00009	1.987E-04
80.00	18.0928348	4800	0.01809	0.284	0.00009	1.974E-04
85.00	17.7209972	5100	0.01772	0.257	0.00009	1.948E-04
90.00	17.3540522	5400	0.01735	0.231	0.00009	1.923E-04
95.00	16.9968924	5700	0.01700	0.206	0.00008	1.871E-04
100.00	16.6421789	6000	0.01664	0.181	0.00008	1.859E-04
110.00	15.9865705	6600	0.01599	0.134	0.00008	1.718E-04
120.00	15.4483845	7200	0.01545	0.096	0.00006	1.410E-04
130.00	15.0594228	7800	0.01506	0.069	0.00005	1.019E-04

**Continuación del cuadro B22.** Resultados para la la curva de secado del endocarpio de *Acrocomia spp*

<b>Tiempo. <math>t</math></b> <b>/(min)</b>	<b>Masa del sólido</b> <b>en tiempo <math>i. m_i</math></b> <b>/(g)</b>	<b>Tiempo. <math>t</math></b> <b>/(s)</b>	<b>Masa del</b> <b>sólido en</b> <b>tiempo <math>i. m_i</math></b> <b>/(kg)</b>	<b>Humedad. <math>X</math></b> <b>/(kg/kg)</b>	<b><math>-dX/dt</math></b> <b>/(kg/kg s)</b>	<b>Rapidez de</b> <b>secado. <math>R</math></b> <b>/(kg/m<sup>2</sup>s)</b>
140.00	14.8025613	8400	0.01480	0.050	0.00003	6.729E-05
150.00	14.628874	9000	0.01463	0.038	0.00002	4.550E-05
160.00	14.5016664	9600	0.01450	0.029	0.00002	3.333E-05
170.00	14.408707	10200	0.01441	0.022	0.00001	2.435E-05
180.00	14.335318	10800	0.01434	0.017	0.00001	1.923E-05
190.00	14.2790531	11400	0.01428	0.013	0.00001	1.474E-05
200.00	14.2325734	12000	0.01423	0.010	0.00001	1.218E-05
210.00	14.1958789	12600	0.01420	0.007	0.00000	9.613E-06
220.00	14.164077	13200	0.01416	0.005	0.00000	8.332E-06
230.00	14.14	13800	0.01414	0.003	0.00000	7.050E-06
240.00	14.11	14400	0.01411	0.001	0.00000	7.050E-06
250.00	14.09	15000	0.01409	0.000	0.00000	4.486E-06

**Cuadro B23.** Resultados para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia*

spp

Tiempo. $t$ /(min)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(g)	Tiempo. $t$ /(s)	Masa del sólido en tiempo $i$ . $m_i$ /(kg)	Humedad. $X$ /(kg/kg)	$-dX/dt$ /(kg/kg s)	Rapidez de secado. $R$ /(kg/m <sup>2</sup> s)
0.00	24.245	0	0.02425	2.2701		
0.50	24.2280285	30	0.02423	2.2678	0.00008	8.892E-05
1.00	24.206208	60	0.02421	2.265	0.00010	1.143E-04
1.50	24.1843875	90	0.02418	2.262	0.00010	1.143E-04
2.00	24.157718	120	0.02416	2.258	0.00012	1.397E-04
2.50	24.128624	150	0.02413	2.254	0.00013	1.524E-04
3.00	24.09953	180	0.02410	2.250	0.00013	1.524E-04
3.50	24.0680115	210	0.02407	2.246	0.00014	1.651E-04
4.00	24.0389175	240	0.02404	2.242	0.00013	1.524E-04
4.50	24.0049745	270	0.02400	2.238	0.00015	1.778E-04
5.00	23.9710315	300	0.02397	2.233	0.00015	1.778E-04
5.50	23.934664	330	0.02393	2.228	0.00016	1.906E-04
6.00	23.8982965	360	0.02390	2.223	0.00016	1.906E-04
6.50	23.861929	390	0.02386	2.218	0.00016	1.906E-04
7.00	23.8255615	420	0.02383	2.214	0.00016	1.906E-04
7.50	23.7867695	450	0.02379	2.208	0.00017	2.033E-04
8.00	23.750402	480	0.02375	2.203	0.00016	1.906E-04
8.50	23.71161	510	0.02371	2.198	0.00017	2.033E-04
9.00	23.672818	540	0.02367	2.193	0.00017	2.033E-04
9.50	23.634026	570	0.02363	2.188	0.00017	2.033E-04
10.00	23.595234	600	0.02360	2.182	0.00017	2.033E-04
10.50	23.5540175	630	0.02355	2.177	0.00019	2.160E-04
11.00	23.5152255	660	0.02352	2.172	0.00017	2.033E-04
11.50	23.474009	690	0.02347	2.166	0.00019	2.160E-04
12.00	23.435217	720	0.02344	2.161	0.00017	2.033E-04
12.50	23.3940005	750	0.02339	2.155	0.00019	2.160E-04
13.00	23.352784	780	0.02335	2.150	0.00019	2.160E-04
13.50	23.3115675	810	0.02331	2.144	0.00019	2.160E-04
14.00	23.2727755	840	0.02327	2.139	0.00017	2.033E-04
14.50	23.231559	870	0.02323	2.133	0.00019	2.160E-04
15.00	23.1903425	900	0.02319	2.128	0.00019	2.160E-04
16.00	23.110334	960	0.02311	2.117	0.00018	2.096E-04

**Continuación del cuadro B23.** Resultados para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp

Tiempo. <i>t</i> /(min)	Masa del sólido en tiempo <i>i</i> . <i>m<sub>i</sub></i> /(g)	Tiempo. <i>t</i> /(s)	Masa del sólido en tiempo <i>i</i> . <i>m<sub>i</sub></i> /(kg)	Humedad. <i>X</i> /(kg/kg)	$-dX/dt$ /(kg/kg s)	Rapidez de secado. <i>R</i> /(kg/m <sup>2</sup> s)
17.00	23.027901	1020	0.02303	2.106	0.00019	2.160E-04
18.00	22.950317	1080	0.02295	2.095	0.00017	2.033E-04
19.00	22.8703085	1140	0.02287	2.085	0.00018	2.096E-04
20.00	22.7903	1200	0.02279	2.074	0.00018	2.096E-04
21.00	22.712716	1260	0.02271	2.063	0.00017	2.033E-04
22.00	22.6327075	1320	0.02263	2.053	0.00018	2.096E-04
23.00	22.5551235	1380	0.02256	2.042	0.00017	2.033E-04
24.00	22.4775395	1440	0.02248	2.032	0.00017	2.033E-04
25.00	22.3999555	1500	0.02240	2.021	0.00017	2.033E-04
30.00	22.0071865	1800	0.02201	1.968	0.00018	2.058E-04
35.00	21.6241155	2100	0.02162	1.917	0.00017	2.007E-04
40.00	21.243469	2400	0.02124	1.865	0.00017	1.994E-04
45.00	20.860398	2700	0.02086	1.814	0.00017	2.007E-04
50.00	20.4749025	3000	0.02047	1.762	0.00017	2.020E-04
55.00	20.0918315	3300	0.02009	1.710	0.00017	2.007E-04
60.00	19.7087605	3600	0.01971	1.658	0.00017	2.007E-04
65.00	19.3256895	3900	0.01933	1.607	0.00017	2.007E-04
70.00	18.9426185	4200	0.01894	1.555	0.00017	2.007E-04
75.00	18.5595475	4500	0.01856	1.503	0.00017	2.007E-04
80.00	18.1813255	4800	0.01818	1.452	0.00017	1.982E-04
85.00	17.805528	5100	0.01781	1.402	0.00017	1.969E-04
90.00	17.427306	5400	0.01743	1.351	0.00017	1.982E-04
95.00	17.053933	5700	0.01705	1.300	0.00017	1.956E-04
100.00	16.6829845	6000	0.01668	1.250	0.00017	1.944E-04
110.00	15.9410875	6600	0.01594	1.150	0.00017	1.944E-04
120.00	15.201615	7200	0.01520	1.050	0.00017	1.937E-04
130.00	14.4718405	7800	0.01447	0.952	0.00016	1.912E-04
140.00	13.7541885	8400	0.01375	0.855	0.00016	1.880E-04
150.00	13.0462345	9000	0.01305	0.760	0.00016	1.855E-04
160.00	12.355252	9600	0.01236	0.666	0.00016	1.810E-04
170.00	11.6836655	10200	0.01168	0.576	0.00015	1.759E-04
180.00	11.026626	10800	0.01103	0.487	0.00015	1.721E-04
190.00	10.396256	11400	0.01040	0.402	0.00014	1.651E-04

**Continuación del cuadro B23.** Resultados para la curva de secado del endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp

<b>Tiempo. <i>t</i> / (min)</b>	<b>Masa del sólido en tiempo <i>i</i>. <i>m<sub>i</sub></i> / (g)</b>	<b>Tiemp o. <i>t</i> / (s)</b>	<b>Masa del sólido en tiempo <i>i</i>. <i>m<sub>i</sub></i> / (kg)</b>	<b>Humedad. <i>X</i> / (kg/kg)</b>	<b><math>-dX/dt</math> / (kg/kg s)</b>	<b>Rapidez de secado. <i>R</i> / (kg/m<sup>2</sup>s)</b>
200.00	9.799829	12000	0.00980	0.322	0.00013	1.563E-04
210	9.2397695	12600	0.00924	0.246	0.00013	1.467E-04
220	8.7354735	13200	0.00874	0.178	0.00011	1.321E-04
230	8.3087615	13800	0.00831	0.121	0.00010	1.118E-04
240	7.981454	14400	0.00798	0.077	0.00007	8.575E-05
250	7.7462775	15000	0.00775	0.045	0.00005	6.161E-05
260	7.5911095	15600	0.00759	0.024	0.00003	4.065E-05
270	7.4989785	16200	0.00750	0.011	0.00002	2.414E-05
280	7.452913	16800	0.00745	0.005	0.00001	1.207E-05
290	7.423819	17400	0.00742	0.001	0.00001	7.622E-06
291	7.4213945	17460	0.00742	0.001	0.00001	6.352E-06
292	7.41897	17520	0.00742	0.001	0.00001	6.352E-06
293	7.4165455	17580	0.00742	0.000	0.00001	6.352E-06
294	7.414121	17640	0.00741	0.000	0.00001	6.352E-06
294.75	7.414121	17685	0.00741	0.000	0.00000	0.000E+00

**Cuadro B24.** Resultados obtenidos para el análisis de varianza de la muestra de carbón activado de endocarpio-mesocarpio

Código de coyol	Masa de carbón obtenida/ (g)	Rendimiento / (%)	Masa de carbon /	Adsorbancia Medida	Factos de Dilución	Concentración en ppm	Volumen	Concentración Inicial	Qf	Porcentaje de Remoción
A12	0.8686	83%	0.4871	0.218	0.04	26.6503667	0.03	400	22.99	93.3%
A08	0.9704	93%	0.3283	0.435	0.04	53.1784841	0.03	400	31.69	86.7%
A09	0.9261	91%	0.3372	0.419	0.04	51.2224939	0.03	400	31.03	87.2%
A04	0.7394	74%	0.2873	0.723	0.04	88.3863081	0.03	400	32.54	77.9%
A05	0.8019	71%	0.3444	0.465	0.04	56.8459658	0.03	400	29.89	85.8%
A23	0.8327	83%	0.3938	0.716	0.04	87.5305623	0.03	400	23.80	78.1%
A06	0.8415	72%	0.3135	0.702	0.04	85.8190709	0.03	400	30.07	78.5%
A13	0.8199	79%	0.4426	0.076	0.04	9.29095355	0.03	400	26.48	97.7%
A16	0.7614	73%	0.4257	0.252	0.04	30.806846	0.03	400	26.02	92.3%
A27	0.8485	83%	0.3681	0.594	0.04	72.6161369	0.03	400	26.68	81.8%
A24	0.8695	85%	0.4255	0.251	0.04	30.6845966	0.03	400	26.04	92.3%
A28	0.9291	93%	0.5686	0.2421	0.04	29.596577	0.03	400	19.54	92.6%
A07	0.9867	90%	0.3297	0.297	0.04	36.3080685	0.03	400	33.09	90.9%
A21	0.6195	61%	0.3287	0.01	0.04	1.22249389	0.03	400	36.40	99.7%
A22	0.5263	50%	0.4859	0.018	0.04	2.200489	0.03	400	24.56	99.4%

**Cuadro B25.** Resultados obtenidos para el análisis de varianza de la muestra de carbón activado de endocarpio.

Código del Coyal	Masa de carbón obtenida/ (g)	Rendimiento	Masa de carbón activado	Adsorbancia Medida	Factos de Dilución	Concentración en ppm	Volumen	Concentración Inicial	Qf	Porcentaje de Remoción
A14	0.919	89%	0.398	0.4157	0.01	203.276284	0.05	400	24.71	49.2%
A10	0.7115	67%	0.5727	0.9874	0.10	48.2836186	0.05	400	30.71	87.9%
A11	0.9282	89%	0.621	0.0982	0.10	4.80195599	0.05	400	31.82	98.8%
A01	0.8487	80%	0.3981	0.36417	1	1.7807824	0.05	400	50.01	99.6%
A02	0.7946	72%	0.4085	0.45813	1	2.2402445	0.05	400	48.69	99.4%
A19	0.7024	69%	0.5847	0.77841	0.10	38.0640587	0.05	400	30.95	90.5%
A03	0.8389	81%	0.3749	0.37534	1	1.83540342	0.05	400	53.10	99.5%
A15	0.8332	82%	0.4438	0.3533	0.01	172.762836	0.05	400	25.60	56.8%
A17	0.784	77%	0.4644	0.3351	0.01	163.863081	0.05	400	25.42	59.0%
A29	0.6078	60%	0.472	1.1291	0.10	55.2127139	0.05	400	36.52	86.2%
A20	0.8116	79%	0.4261	0.251	0.10	12.2738386	0.05	400	45.50	96.9%
A30	0.7577	74%	0.5635	0.2421	0.01	118.386308	0.05	400	24.99	70.4%
A18	0.8259	82%	0.5933	0.0931	0.10	4.55256724	0.05	400	33.33	98.9%
A25	0.6669	67%	0.4502	0.4429	0.10	21.6577017	0.05	400	42.02	94.6%
A26	0.6953	67%	0.3995	1.4369	0.10	70.2640587	0.05	400	41.27	82.4%

**Cuadro B26.** Resultados obtenidos para el porcentaje de humedad de las fracciones

<b>Código de Coyol</b>	<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Masa de muestra húmeda / (g)</b>	<b>Masa de la muestra seca / (g)</b>	<b>Porcentaje de Humedad</b>
0011	Cáscara	2.8894	2.4427	15.45995708
0012	Mesocarpio	3.3076	2.5846	21.85874955
0013	Endocarpio	6.5884	5.8593	11.06641977
0014	Endosperma	1.9603	1.8705	4.58093149
0021	Cáscara	3.4970	2.9336	16.11095224
0022	Mesocarpio	6.3263	4.8956	22.61511468
0023	Endocarpio	7.4810	6.5821	12.01577329
0024	Endosperma	2.5542	2.4122	5.559470676
0031	Cáscara	3.7480	3.1508	15.93383138
0032	Mesocarpio	6.2094	4.8067	22.58994428
0033	Endocarpio	8.7828	7.8579	10.53081022
0034	Endosperma	2.9906	2.8027	6.28302013
0041	Cáscara	3.9673	3.2662	17.67196834
0042	Mesocarpio	6.4685	4.9652	23.24031847
0043	Endocarpio	8.2603	7.2573	12.14241614
0044	Endosperma	2.8467	2.6602	6.551445533
0051	Cáscara	4.1065	3.3896	17.45768903
0052	Mesocarpio	7.0783	5.3632	24.2303943
0053	Endocarpio	8.2091	7.2068	12.20962103
0054	Endosperma	2.8179	2.6433	6.196103481

**Cuadro B27.** Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a endocarpio de *Acrocomia* spp producido como carbón activado.

<b>Código de Coyol</b>	<b>Temperatura / (°C)</b>	<b>Tiempo / (h)</b>	<b>Porcentaje de Rendimiento / (%)</b>	<b>Porcentaje de Remoción de azul de metileno / (%)</b>	<b>Qf / (mg/g)</b>
A14	550.0	1.0	50.0%	49.2%	24.7
A10	450.0	2.0	53.5%	87.9%	30.7
A11	450.0	2.0	62.6%	98.8%	31.8
A01	500.0	1.5	37.4%	99.6%	50.0
A02	500.0	1.5	37.0%	99.4%	48.7
A19	450.0	1.0	58.8%	90.5%	31.0
A03	500.0	1.5	36.2%	99.5%	53.1
A15	550.0	1.0	54.4%	56.8%	25.6
A17	550.0	1.0	58.9%	59.0%	25.4
A29	450.0	1.0	47.8%	86.2%	36.5
A20	550.0	2.0	50.3%	96.9%	45.5
A30	450.0	1.0	58.7%	70.4%	25.0
A18	450.0	2.0	60.6%	98.9%	33.3
A25	550.0	2.0	49.0%	94.6%	42.0
A26	550.0	2.0	44.8%	82.4%	41.3

**Cuadro B28.** Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a endocarpio-mesocarpio de *Acrocomia* spp producido como carbón activado.

<b>Código de Coyol</b>	<b>Temperatura / (°C)</b>	<b>Tiempo / (h)</b>	<b>Porcentaje de Rendimiento / (%)</b>	<b>Porcentaje de Remoción de azul te metileno/ (%)</b>	<b>Qf / (mg/g)</b>
A12	550.0	1.0	46.3%	93.3%	23.0
A08	450.0	2.0	31.4%	86.7%	31.7
A09	450.0	2.0	33.0%	87.2%	31.0
A04	500.0	1.5	28.6%	77.9%	32.5
A05	500.0	1.5	30.6%	85.8%	29.9
A23	450.0	1.0	39.3%	78.1%	23.8
A06	500.0	1.5	26.8%	78.5%	30.1
A13	550.0	1.0	42.6%	97.7%	26.5
A16	550.0	1.0	41.0%	92.3%	26.0
A27	450.0	1.0	36.2%	81.8%	26.7
A24	550.0	2.0	41.5%	92.3%	26.0
A28	450.0	1.0	56.8%	92.6%	19.5
A07	450.0	2.0	29.9%	90.9%	33.1
A21	550.0	2.0	32.4%	99.7%	36.4
A22	550.0	2.0	46.5%	99.4%	24.6

**Cuadro B29.** Resultados obtenidos para el factorial correspondiente a los filtros de carbón activado

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Qf / (mg/g)</b>
Solo carbón activado de endocarpio	29.001
Solo carbón activado de endocarpio	24.061
Solo carbón activado de endocarpio	20.282
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	25.333
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	37.181
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	34.083
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	1.508
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	20.357
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	15.979
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio -mesocarpio	27.511
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio - mesocarpio	29.478
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio - mesocarpio	25.777

**Cuadro B30.** Resultados obtenidos para los filtros de carbón activado.

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Tiempo / (s)</b>	<b>Velocidad / (m/s)</b>	<b>EBCT / (s)</b>
Solo carbón activado de endocarpio	797.136	0.004	11.301
Solo carbón activado de endocarpio	150.036	0.024	2.127
Solo carbón activado de endocarpio	153.420	0.023	2.175
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	2099.640	0.002	29.765
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	1400.160	0.003	19.849
Solo carbón activado de endocarpio - mesocarpio	1425.798	0.002	20.213
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	1321.638	0.003	18.736
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	1662.600	0.002	23.570
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio	1687.800	0.002	23.927
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio - mesocarpio	1362.720	0.003	19.319
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio - mesocarpio	1414.680	0.002	20.055
Filtro de tres medios con carbón activado de endocarpio - mesocarpio	901.638	0.004	12.782

## Apéndice C. Muestra de Cálculo

### C.1. Diámetro Promedio del fruto de *Acrocomia* spp

El diámetro promedio longitudinal para el fruto de *Acrocomia* spp se calcula de la siguiente manera:

$$Promedio = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \dots + X_n}{X_n} \quad (C1)$$

Donde

$X_1 - X_n$  = Los diámetros medidos longitudinales para la fruta de *Acrocomia* spp.

Por lo tanto, se toma, los valores del cuadro A1, columna 2, fila 2 a la 72 se tiene lo siguiente:

$$Promedio = \frac{40.9 + 39.1 + \dots + 35.5}{60} = 38.4 \text{ mm}$$

Este dato de promedio de diámetro se encuentra en la columna 2, fila 2 del cuadro B1.

Nota: Similarmente todos los promedios empleados en la tesis se calculan igual.

### C.2 Determinación de la densidad del fruto de *Acrocomia* spp

La densidad del fruto de *Acrocomia* se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen} \quad (C2)$$

Por lo tanto, se toman los valores del cuadro B2 columna 4, fila 2 para el valor de masa y para el caso del volumen se toman los valores del cuadro B2, columna 3, fila 2.

$$Densidad = \frac{22.87}{26.88} = 0.85$$

El valor se encuentra en la columna 5 fila 2.

Nota: Similarmente todos las densidades se calcularon igual.

### C.3 Fracción Másica Retenida

Para la determinación de la fracción másica Retenida se tiene la siguiente ecuación.

$$Fracción \text{ másica Retenida} = \frac{Masa \text{ retenida}}{Masa \text{ total}} \quad (C3)$$

Para la determinación, se emplea los valores del cuadro B5, columna 4 fila 2, y como masa total el valor del cuadro A5 columna 2, fila 11.

$$\text{Fracción másica retenida} = \frac{11.62}{512.9} = 0.02946661$$

Valor que se encuentra en el cuadro B5 columna 5, fila 2.

Nota: Similarmente todos las masas retenidas se calcularon igual

#### **C.4 Curva de Calibración de azul de metileno**

Mediante una regresión lineal graficando los valores del cuadro A14, en donde el eje x corresponde a los valores de la columna 1, fila 2 a la 11 y en el eje y los valores de la columna 2 fila 2 a la 11, da como resultado la ecuación lineal siguiente

$$\text{Absorbancia} = 0.1676 * \text{Concentración} + 0.1159$$

(C4)

#### **C.5 Determinación de la concentración final de azul de metileno**

Para la determinación se emplea la siguiente ecuación

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Absorbancia} - 0.1159}{0.1676} * \text{Factor de dilución}$$

(C5)

Sustituyendo los valores del cuadro B16, columna 2 fila 3 en la absorbancia se tiene

$$\text{Concentración} = \frac{0.331 - 0.1159}{0.1676} * 25 = 32.135$$

Que se encuentra en el cuadro B16, columna 6, fila 3.

#### **C.6 Cálculo de la adsorción de azul de metileno por unidad de carbón activado empleado**

El parámetro empleado para evaluar los mg de azul de metileno removidos por g de carbón activado, se indica a continuación

$$Q_f = \left( \frac{C_0 - C_e}{W} \right) * V_{ads} \quad (C6)$$

Donde:

$Q_f$ = Adsorción de azul de metileno removido por unidad de masa de carbón activado empleado, mg/g

$C_0$ =Concentración inicial de azul de metileno, mg/L

$C_e$ = Concentración final de azul de metileno luego de la adsorción, mg/L

$W$ = Masa de carbón activado empleado en la adsorción, g

$V_{ads}$ = Volumen de disolución empleado

Por lo tanto, empleando los valores del cuadro B16 columna 4,6 y 7, fila 2 se obtiene lo siguiente

$$Q_f = \left( \frac{100 - 1.609}{0.01} \right) * 0.05 = 491.954$$

Valor que se encuentra en la columna 8, fila 2 del cuadro B16.

### **C.7 Tasa de uso de carbón activado**

La ecuación para determinar el uso de carbón activado se visualiza a continuación:

$$CUR = \frac{C_0 - C_E}{K_f * C_0^n} \quad (C7)$$

Donde:

$CUR$ = Tasa de uso de carbón activado g/L

$C_0$ =Concentración inicial de azul de metileno, mg/L

$C_e$ = Concentración final de azul de metileno luego de la adsorción, mg/L

$K_f$ = Constante de disociación de Freundlich, (mg/g) \*(L/mg)

$n$ = intensidad de la adsorción, adim

Los datos que se emplean son de la columna 1, fila 2,4 y 8, del cuadro B18

$$CUR = \frac{221.6836}{442.0791 * 2.5863} = 0.1939$$

El valor obtenido se encuentra en el cuadro B18.

### **C.8 Tiempo de contacto cuando el lecho está vacío (EBCT)**

La ecuación empleada para la determinación del EBCT se muestra a continuación:

$$EBCT = \frac{V_b}{Q} \quad (C8)$$

Donde

EBCT= tiempo de contacto con el lecho vacío, h

$V_b$ =Volumen del lecho, m<sup>3</sup>

Q = Flujo volumétrico m<sup>3</sup>/h

Por lo que se tomaron los valores del cuadro B18, columna 2, fila 18 y 20

$$EBCT = \frac{1.42 \times 10^{-5}}{1.00 \times 10^{-3}} = 1.42 \times 10^{-2}$$

El valor obtenido se presenta en el cuadro B18, columna 2, fila 12.

### C.9 Carbón requerido

La ecuación empleada para la determinación del carbón requerido se muestra a continuación:

$$\text{Carbón requerido} = \frac{\text{Densidad del carbón}}{v_b} \quad (C9)$$

Donde:

$V_b$ =Volumen del lecho, m<sup>3</sup>

Se utilizan los valores del cuadro B18, columna 2, fila 11 y 18.

$$\text{Carbón requerido} = \frac{0.3630}{1.42 \times 10^{-5}} = 5.1$$

El valor obtenido se muestra en el cuadro B17, columna 2, fila 21.

### C.10 Agua tratada

La ecuación empleada para la determinación del agua

$$\text{Agua tratada} = \frac{CUR}{\text{Carbón requerido}} \quad (C10)$$

Se emplean los resultados del cuadro B18, columna 2, fila 9 y 21, a continuación, se muestra la sustitución

$$\text{Agua tratada} = \frac{0.19}{5.14} = 26.54$$

Valor que se encuentra en el cuadro B18, columna 2, fila 23.

### **C.11 Carga hidráulica**

La ecuación para la determinación de la carga hidráulica se muestra a continuación:

$$Hl = \frac{Q}{A} \quad (C11)$$

Donde:

Hl = carga hidráulica m/h

A = área del lecho, m<sup>2</sup>

Q = Flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/h

Se emplean los datos del cuadro B18, columna 2, fila 16 y 20 donde se obtiene lo siguiente:

$$Hl = \frac{1 \times 10^{-3}}{2.84 \times 10^{-4}} = 3.53$$

El valor obtenido se presenta en el cuadro B18, columna 2, fila 21

### **C12. Determinación del porcentaje de humedad de para la muestra de endocarpio**

El porcentaje de humedad se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Humedad} = \left( \frac{\text{Masa fresca} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} \right) * 100 \quad (C12)$$

Se tomaron los datos del cuadro B22, columna 3 y 4, fila 2 y se sustituyeron en la ecuación

$$\% \text{ de Humedad} = \left( \frac{2.8894 - 2.4427}{2.4427} \right) * 100 = 15.56 \%$$

El valor determinado se presenta en el cuadro B22, columna 5, fila 2.

### **C13 Determinación del porcentaje de cenizas para la muestra de endocarpio**

El porcentaje de cenizas se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \left[ \frac{(\text{Peso de crisol con cenizas} - \text{Peso de crisol vacío})}{(\text{Peso de crisol con muestra original} - \text{Peso de crisol vacío})} \right] * 100$$

(C13)

Se tomaron los datos del cuadro A4 columna 2 fila 2 y columna 3 fila 3, adicionalmente los valores del cuadro B13 columna 3, fila 2.

$$\% \text{ Cenizas} = \left[ \frac{(31.7529 - 31.6580)}{34.368 - 31.6580} \right] * 100 = 3.5018 \%$$

El valor reportado se presenta en el cuadro B13, columna 4 fila, 2.

**Apéndice D. Matrices de condiciones para fabricación de carbón activado empleando activación física**

**Cuadro D1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación física

<b>Biomasa</b>	<b>Agente Activante</b>	<b>T. Carbonización (°C)</b>	<b>T. Activación (°C)</b>	<b>Tiempo de activación (min)</b>	<b>Presencia de N2</b>	<b>Superficie de Bet/ (m2/g)</b>	<b>Rendimiento/ (%)</b>	<b>Referencias</b>
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	800	10	No	No reportado	82.3	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	800	20	No	No reportado	81	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	800	30	No	No reportado	81.7	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	900	10	No	No reportado	81.2	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	900	20	No	No reportado	79.3	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	900	30	No	No reportado	80.5	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	1000	10	No	No reportado	79.1	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	1000	20	No	No reportado	78.6	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (granulado)	Aire	500	1000	30	No	No reportado	77.7	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	800	10	No	No reportado	81.9	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)

**Continuación del cuadro D1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación física

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	T. Activación (°C)	Tiempo de activación (min)	Presencia de N2	Superficie de Bet/ (m2/g)	Rendimiento/ (%)	Referencias
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	800	20	No	No reportado	81.1	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	800	30	No	No reportado	80.8	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	900	10	No	No reportado	80.2	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	900	20	No	No reportado	79.8	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	900	30	No	No reportado	79.7	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	1000	10	No	No reportado	78.8	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	1000	20	No	No reportado	79.3	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Endocarpio de Shapaja (polvo)	Aire	500	1000	30	No	No reportado	78.2	(Coronado Martínez <i>et al.</i> , 2016)
Torta de higuera (Ricinus communis)	vapor de agua	800	800	60	Si	255.98	83.37	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	vapor de agua	800	800	120	Si	341.94	74.38	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)

**Continuación del cuadro D1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación física

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	T. Activación (°C)	Tiempo de activación (min)	Presencia de N2	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento/ (%)	Referencias
Torta de higuera (Ricinus communis)	vapor de agua	800	900	60	Si	336.51	76.44	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	vapor de agua	800	900	120	Si	462.44	54.89	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub>	800	800	60	Si	258.81	80.1	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub>	800	900	120	Si	879.08	28.84	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub> /vapor de agua	800	800	60	Si	406.82	71.6	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub> /vapor de agua	800	800	120	Si	565.74	43.38	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub> /vapor de agua	800	800	180	Si	631.32	42.91	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	CO <sub>2</sub> /vapor de agua	800	850	120	Si	655.01	26.95	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Astillas de Eucalyptus	vapor de agua	500	500	120	No	426.8125	31.79	(Mopoung y Dejang, 2021)

**Continuación del cuadro D1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación física

<b>Biomasa</b>	<b>Agente Activante</b>	<b>T. Carbonización (°C)</b>	<b>T. Activación (°C)</b>	<b>Tiempo de activación (h)</b>	<b>Presencia de N2</b>	<b>Superficie de Bet/ (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Referencias</b>
Cáscara de trigo sarraceno	CO <sub>2</sub>	700 °C	850 °C	1,20	Si	578	No reportado	(Pena <i>et al.</i> , 2020)
Syzygium cumini	CO <sub>2</sub>	700 °C	700 °C	2	Si	744	No reportado	(Vinayagam <i>et al.</i> , 2020)
Chrysopogon zizanioides	CO <sub>2</sub>	700 °C	700 °C	2	Si	634	No reportado	



**Apéndice E. Matrices de condiciones para fabricación de carbón activado empleando activación química**

**Cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento o/ (%)	Referencia
Carbón Mineral (Manto 240)	KOH	900	1	15	54.94	No reportado	(Bastidas <i>et al.</i> , 2010)
Endocarpio de Coco	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	15	701.98	No reportado	(Bastidas <i>et al.</i> , 2010)
Endocarpio de Palma Africana	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	15	391.71	No reportado	(Bastidas <i>et al.</i> , 2010)
Fibra de Palma de aceite	ZnCl <sub>2</sub>	550	0.5	24	835.3	No reportado	(Ramírez <i>et al.</i> , 2012)
Cáscara de Palma de Aceite	ZnCl <sub>2</sub>	550	0.5	24	575.1	No reportado	(Ramírez <i>et al.</i> , 2012)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	58.3	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	54.5	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	51.93	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	49.9	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	58.41	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	300	2	24	No reportado	29.67	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	400	2	24	No reportado	57.54	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	51.4	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	2	24	No reportado	35.63	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	700	2	24	No reportado	25.95	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)

**Continuación de cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento/ (%)	Referencia
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	24	No reportado	51.44	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1.5	24	No reportado	53.04	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	54.44	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2.5	24	No reportado	45.83	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Desperdicios de corteza de Acacia mangium	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	3	24	No reportado	38.43	(Zhang <i>et al.</i> , 2021a)
Endocarpio de coco	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	400	2	4	No reportado	61.33	(Serrano Guerrero, 2019)
Endocarpio de coco	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	400	2	4	No reportado	64.35	(Serrano Guerrero, 2019)
Residuo Lignocelulósico de Canelo	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	29.3	(Asimbaya <i>et al.</i> , 2015)
Residuo Lignocelulósico de Laurel	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	26.9	(Asimbaya <i>et al.</i> , 2015)
Residuo Lignocelulósico de Eucalipto	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	2	24	No reportado	28.2	(Asimbaya <i>et al.</i> , 2015)
Torta de higuera (Ricinus communis)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800	1	24	1218.43	No reportado	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Torta de higuera (Ricinus communis)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800	1	24	1197.96	No reportado	(Ospina-Guarín <i>et al.</i> , 2014)
Cáscara de Naranja	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	56.58	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Cáscara de Naranja	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	41.75	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Cáscarilla de Café	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	41.29	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)

**Continuación de cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento / (%)	Referencia
Cáscarilla de Café	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	33.5	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Bagazo de Caña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	48.58	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Bagazo de Caña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	1	16	No reportado	35.1	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Bagazo de Caña	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	16	No reportado	20.03	(Alberto <i>et al.</i> , 2012)
Endocarpio de Coyoil	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	500	1	12	951	No reportado	(Vieira <i>et al.</i> , 2021)
Endocarpio de Coyoil	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	500	1	12	1002	No reportado	(Vieira <i>et al.</i> , 2021)
Semillas de acai		450	2	4	990.81	No reportado	(Viera de Souza <i>et al.</i> , 2019)
Cáscara de nuez de brasil	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	450	2	4	1651.31	No reportado	(Viera de Souza <i>et al.</i> , 2019)
Trozos de tallo de banana	KOH	900	2	96	No reportado	No reportado	(Ghosh <i>et al.</i> , 2019)
Trozos de tallo de banana	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	900	2	96	No reportado	No reportado	(Ghosh <i>et al.</i> , 2019)
Bagazo	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	5	24	No reportado	34.2	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Piel de caña de azúcar	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	5	24	No reportado	38.3	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Bamboo	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	5	24	No reportado	38.9	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de Osmanthus fragrans	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	5	24	No reportado	36.7	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	600	5	24	990.1	65.8	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)

**Continuación de cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento/ (%)	Referencia
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	500	5	24	736.6	70.2	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	550	5	24	855.7	67	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	650	5	24	1006.2	45.5	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	700	5	24	1115.5	41.3	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Ramas de zanthoxylum bungeanum	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	750	5	24	948.4	37.1	(Zhang <i>et al.</i> , 2021b)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	500	1	No reportado	9	22	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	700	1	No reportado	477	20	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	800	1	No reportado	621	18	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	850	1	No reportado	987	16	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	900	1	No reportado	1177	17	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	950	1	No reportado	1352	11	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1000	1	No reportado	1228	10	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	400	1	No reportado	1151	40	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	1215	37	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	600	1	No reportado	1144	35	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)

**Continuación de cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento/ (%)	Referencia
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	700	1	No reportado	882	33	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	800	1	No reportado	836	32	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Cáscara de Naranja	ZnCl <sub>2</sub>	1000	1	No reportado	804	31	(Köseolu y Akmil Başar, 2015)
Torta de semilla de soya	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	400	1	24	643.54	16.22	(Tay <i>et al.</i> , 2009)
Torta de semilla de soya	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600	1	24	1352.86	11.56	(Tay <i>et al.</i> , 2009)
Torta de semilla de soya	KOH	400	1	24	600.05	6.25	(Tay <i>et al.</i> , 2009)
Torta de semilla de soya	KOH	600	1	24	618.54	4.11	(Tay <i>et al.</i> , 2009)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	617	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	722	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	760	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	787	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	500	1	No reportado	495	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	400	1	No reportado	648	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	600	1	No reportado	1093	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	800	1	No reportado	492	No reportado	(Saygılı y Güzel, 2016)

**Continuación de cuadro E1.** Condiciones de fabricación de carbón activado para diferentes biomásas empleando activación química.

Biomasa	Agente Activante	T. Carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Tiempo de activación (h)	Superficie de Bet/ (m <sup>2</sup> /g)	Rendimiento/ (%)	Referencia
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	600	0.5	No reportado	522	No reportado	(Saygili y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	600	2	No reportado	1034	No reportado	(Saygili y Güzel, 2016)
Residuo de Tomate	ZnCl <sub>2</sub>	600	4	No reportado	861	No reportado	(Saygili y Güzel, 2016)
Cunninghamia lanceolata	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	475	1.5	10	1694	38.9	(Zuo <i>et al.</i> , 2009)
Cunninghamia lanceolata	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	475	1.5	10	1910	50.3	(Zuo <i>et al.</i> , 2009)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	360.85	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	752.52	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	1147.37	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	1413.02	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	1489.99	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	550	20 min	24	159.46	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	650	20 min	24	142.54	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	750	20 min	24	1137.88	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	850	20 min	24	1413.02	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
Cáscara de castaña	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	950	20 min	24	1460.24	No reportado	(Duan <i>et al.</i> , 2021)



## Apéndice F Análisis de Varianza de Minitab

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F
Modelo	3	2552,99		68,97%	2552,99	851,00	23,71
Lineal	2	2528,29		68,31%	2528,29	1264,14	35,23
Tipo	1	1596,20		43,12%	1596,20	1596,20	44,48
Configuración	1	932,09		25,18%	932,09	932,09	25,97
Interacciones de 2 términos	1	24,70		0,67%	24,70	24,70	0,69
Tipo*Configuración	1	24,70		0,67%	24,70	24,70	0,69
Error	32	1148,39		31,03%	1148,39	35,89	
Total	35	3701,38		100,00%			

Fuente	Valor p
Modelo	0,000
Lineal	0,000
Tipo	0,000
Configuración	0,000
Interacciones de 2 términos	0,413
Tipo*Configuración	0,413
Error	
Total	

**Figura F1.** Análisis de varianza para los filtros de diseños de carbón activado.

### Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$QF = 25,190 + 6,659 \text{ Tipo} - 5,088 \text{ Configuración} + 0,828 \text{ Tipo*Configuración}$$

**Figura F2.** Ecuación general del modelo para los filtros diseñados

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	162,715	40,679	3,31	0,057
Lineal	2	116,798	58,399	4,76	0,035
Temperatura	1	0,938	0,938	0,08	0,788
Tiempo	1	115,861	115,861	9,44	0,012
Interacciones de 2 términos	1	17,009	17,009	1,39	0,266
Temperatura*Tiempo	1	17,009	17,009	1,39	0,266
Curvatura	1	28,909	28,909	2,35	0,156
Error	10	122,757	12,276		
Total	14	285,473			

**Figura F3.** Análisis de varianza para la muestra producida de carbón activado de endocarpio-mesocarpio

### Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Q_f = 27,36 - 0,28 \text{ Temperatura} + 3,11 \text{ Tiempo} - 1,19 \text{ Temperatura*Tiempo} + 3,47 \text{ Pt Ctral}$$

**Figura F4.** Ecuación general del modelo para la muestra producida de carbón activado de endocarpio-mesocarpio

### Soluciones

Solución	Temperatura	Tiempo	Ajuste	Qf Deseabilidad compuesta
1	-1	1	31,9385	0,735514
2	0	0	30,8318	0,669847
3	1	1	28,9984	0,561057
4	1	-1	25,1649	0,333593
5	-1	-1	23,3429	0,225479

**Figura F5.** Resultados obtenidos para la deseabilidad del carbón activado de endocarpio-mesocarpio

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1258,72	314,680	34,61	0,000
Lineal	2	287,31	143,655	15,80	0,001
Temperatura	1	21,89	21,895	2,41	0,152
Tiempo	1	265,42	265,416	29,19	0,000
Interacciones de 2 términos	1	205,48	205,476	22,60	0,001
Temperatura*Tiempo	1	205,48	205,476	22,60	0,001
Curvatura	1	765,93	765,932	84,25	0,000
Error	10	90,92	9,092		
Total	14	1349,63			

**Figura F6.** Análisis de varianza para la muestra producida de carbón activado de endocarpio.

### Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Q_f = 32,737 + 1,351 \text{ Temperatura} + 4,703 \text{ Tiempo} + 4,138 \text{ Temperatura*Tiempo} + 17,86 \text{ Pt Ctrial}$$

**Figura F7.** Ecuación general del modelo para la muestra producida de carbón activado de endocarpio.

### Soluciones

Solución	Temperatura	Tiempo	Qf Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	0	0	50,6011	0,911876
2	1	1	42,9283	0,641603
3	-1	1	31,9508	0,254917
4	-1	-1	30,8209	0,215114
5	1	-1	25,2464	0,018753

**Figura F8.** Resultados obtenidos para la deseabilidad del carbón activado de endocarpio



**Apéndice G. Planos referentes al diseño de los filtros de carbón activado**