

Estudio de un carbón activado obtenido a partir de la semilla del aguacate criollo y su aplicación
en la adsorción de contaminantes en el agua

Cesar Alfredo Moreno Moreno

Juan Pablo Solano Rueda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. en Ingeniería Química

Codirector

Elkin Andrés Silva Calderón

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Programa Académico

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía, darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo y permitirme culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Con profundo amor y gratitud a mis padres, quienes creyeron en mí desde el primer día y me dieron las herramientas para alcanzar mis sueños. Su ejemplo y respaldo han sido mi mayor motivación.

A mis dos hermanos, por el apoyo silencioso pero inquebrantable, por ser mis compañeros de vida y por celebrar cada uno de mis pasos.

Y finalmente, a los amigos y compañeros que hice a lo largo de la carrera.

Cesar Alfredo Moreno Moreno

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía constante y darme fortaleza para poder culminar este largo camino y esta gran etapa de mi vida.

A mis padres y hermana, que por su amor incondicional, sacrificio, paciencia y apoyo inquebrantable han sido el motor que me impulsa a mejorar cada día y son mi mayor motivación.

A mi abuela, que aunque ya no estas con nosotros, te recuerdo con mucho amor y cariño siempre siendo mi confidente y apoyándome siempre desde la distancia.

A mis mascotas, por su tierna compañía, por estar siempre a mi lado en cada noche de desvelo y por llenar mis días de estudio con un poco más de felicidad y tranquilidad.

Y finalmente, a mis grandes amigos y conocidos, por los momentos compartidos, el apoyo mutuo, la lealtad, consejos y la incondicionalidad en todo momento.

A todos ustedes, muchas gracias por ser parte de este sueño.

Juan Pablo Solano Rueda

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional, paciencia y respaldo fueron el pilar fundamental que nos permitió mantener la constancia a lo largo de toda la carrera. Este logro es el resultado de su esfuerzo compartido.

Al Dr. Yesid, por su invaluable guía, su paciencia y el rigor académico compartido durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos y constante disposición fueron pieza clave para orientar nuestro trabajo y llevarlo a feliz término.

A nuestro codirector, el Ing. Elkin Silva, por sus valiosos aportes, su criterio técnico y el acompañamiento brindado en las diferentes etapas de esta investigación.

A todos los compañeros de posgrado, quienes con su experiencia, consejos y orientación nos apoyaron desinteresadamente en el desarrollo y ejecución de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma mater, por abrirnos las puertas y brindarnos los espacios, laboratorios y herramientas necesarias para nuestra formación integral como profesionales.

Tabla de contenido

Introducción	15
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 Marco referencial	18
2.1 Antecedente internacional.....	18
2.2 Antecedente nacional	19
2.3 Antecedente regional	20
3 Marco teórico	21
3.1 La agroindustria	21
3.1.1 Manejo de residuos en la agroindustria.....	21
3.2 El aguacate	22
3.2.1 Industrialización del aguacate	22
3.2.2 Aguacate criollo colombiano.....	22
3.2.3 Producción de aguacate criollo colombiano.....	23
3.3 Carbón activado	24
3.3.1 Caracterización de la materia prima para su procesamiento	24
3.3.2 Proceso de pirolisis.....	25
3.3.3 Métodos de activación de carbón activado.....	25
3.3.3.1 Parámetros más relevantes en la activación del carbón	26

3.3.3.1.1	Naturaleza del Material Precursor	26
3.3.3.1.2	Agente Activante (Activación Química)	26
3.3.3.1.3	Temperatura de Carbonización y Activación	26
3.3.3.1.4	Relación de Impregnación	27
3.3.3.2	Activación química	27
3.3.3.3	Activación física	27
3.3.4	Porosidad	28
3.4	Adsorción	28
3.4.1	Adsorción química	28
3.4.2	Adsorción física	29
3.5	Índice de azul de metileno	29
3.6	Análisis técnico económico	30
4	Metodología	31
4.1	Obtención del carbón activado a partir de la semilla del aguacate criollo	31
4.1.1	Obtención de la materia prima	31
4.1.2	Caracterización de la materia prima	32
4.1.2.1	Análisis próximo	32
4.1.2.1.1	Determinación de humedad	32
4.1.2.1.2	Determinación de cenizas	34
4.1.2.1.3	Determinación de volátiles	35
4.1.2.1.4	Determinación del carbono fijo	36
4.1.3	Obtención de carbón activado	37
4.1.3.1	Carbonización de la materia prima	37

4.1.3.2	Activación del carbón.....	38
4.1.3.2.1	Impregnación del Precursor Carbonizado	38
4.1.3.2.2	Activación Térmica y Repetibilidad Experimental	38
4.1.3.2.3	Lavado, Neutralización y Secado Final.....	39
4.2	Determinación del Rendimiento Másico y Balance de Materia	39
4.2.1	Acondicionamiento de la Biomasa.....	39
4.2.2	Rendimiento de Carbonización (Rc)	40
4.2.3	Rendimiento de Activación Química (Ra).....	40
4.2.4	Rendimiento Global del Proceso (Rg).....	41
4.3	Determinación del desempeño del carbón activado.....	41
4.4	Análisis técnico económico	43
5	Resultados	55
5.1	Caracterización de la materia prima	55
5.2	Rendimiento del proceso de obtención del carbón activado.....	57
5.2.1	Rendimiento global del proceso	59
5.3	Desempeño del carbón activado en la adsorción de contaminantes	59
5.3.1	Cinética de adsorción y porcentaje de remoción.....	60
5.3.2	Capacidad máxima de adsorción (Índice de Azul de Metileno)	61
5.3.3	Disminución de la concentración parcial en el tiempo.....	63
5.4	Análisis Técnico-Económico	64
5.4.1	Descripción del proceso de activación	64
5.4.2	Estructura de Costos e Inversión	66
5.4.3	Análisis de Escenarios y Rentabilidad	67

6	Conclusiones	70
7	Recomendaciones.....	71
	Referencias Bibliográficas	72
	Apéndices.....	76

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Características tolva</i>	44
Tabla 2	<i>Características banda transportadora</i>	44
Tabla 3	<i>Características molino de martillos</i>	45
Tabla 4	<i>Características secador</i>	45
Tabla 5	<i>Características horno de pirólisis</i>	45
Tabla 6	<i>Características tanque de almacenamiento H₃PO₄</i>	46
Tabla 7	<i>Características tanque de impregnación</i>	46
Tabla 8	<i>Características evaporador</i>	46
Tabla 9	<i>Características secador</i>	47
Tabla 10	<i>Características tanque de lavado</i>	47
Tabla 11	<i>Características zaranda</i>	47
Tabla 12	<i>Características sistema de bombeo</i>	48
Tabla 13	<i>Características tanque de almacenamiento de carbón activado</i>	48
Tabla 14	<i>Análisis próximo de la semilla de aguacate criollo</i>	55
Tabla 15	<i>Rendimiento del proceso de carbonización</i>	58
Tabla 16	<i>Rendimiento del proceso de activación del carbón</i>	58
Tabla 17	<i>Rendimiento global del proceso de obtención</i>	59
Tabla 18	<i>Remoción promedio obtenida para el carbón activado y no activado</i>	60
Tabla 19	<i>Capacidad de adsorción</i>	61
Tabla 20	<i>Resumen costos de producción</i>	67
Tabla 21	<i>Rentabilidad proceso por VAN, TIR y ROI</i>	68
Tabla 22	<i>Datos prueba índice de azul de metileno</i>	76

Tabla 23	Balance de masa.....	80
Tabla 24	<i>Consumo energético diario de equipos</i>	87
Tabla 25	<i>Consumo de energía térmica</i>	89
Tabla 26	<i>Costo de equipos</i>	91
Tabla 27	Costos directos e indirectos de la planta.....	93
Tabla 28	<i>Costo de insumos</i>	95
Tabla 29	<i>Factores y requisitos de mano de obra por equipos</i>	97
Tabla 30	Nómina trabajadores.....	98
Tabla 31	Costo operación anual.....	99

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Aguacate criollo colombiano</i>	23
Figura 2 <i>Producción de Aguacate criollo colombiano</i>	24
Figura 3 <i>Diagrama de las fases de la metodología</i>	31
Figura 4 <i>Estufa Memmert</i>	33
Figura 5 <i>Horno mufla</i>	35
Figura 6 <i>Horno tubular para pirólisis</i>	37
Figura 7 <i>Impregnación</i>	38
Figura 8 <i>Prueba de azul de metileno</i>	42
Figura 9 <i>Espectrofotómetro</i>	43
Figura 10 <i>Capacidad de adsorción</i>	62
Figura 11 <i>Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado, que ilustra las fases principales desde la adecuación de la materia prima hasta las etapas de pirólisis y reactivación</i>	66
Figura 12 <i>Factores de relación para estimar la inversión de capital</i>	93
Figura 13 <i>Factores de requisito de trabajadores por equipos</i>	96
Gráfica 1 <i>Representación de la concentración parcial en el tiempo</i>	63
Gráfica 2 <i>Curva de calibración del espectrofotómetro</i>	78

Lista de Apéndices

Apéndice A. Curva de calibración y datos experimentales de cinética de adsorción.....	76
Apéndice B. Dimensionamiento de la planta y balance global de materia.....	79
Apéndice C. Balance de masa y consumo energético específico por equipo	81
Apéndice D. Estimación de costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX)	91
Apéndice E. Especificaciones técnicas y catálogo de maquinaria industrial.....	100

Resumen

Título: Estudio de un carbón activado obtenido a partir de la semilla del aguacate criollo y su aplicación en la adsorción de contaminantes en el agua.*

Autores: Cesar Alfredo Moreno Moreno y Juan Pablo Solano Rueda**

Palabras Clave: Carbón activado, Semilla de aguacate criollo, Activación química, Azul de metileno, Cinética de adsorción, Economía circular, Viabilidad técnico-económica.

El presente proyecto de grado se centró en la valorización de la semilla de aguacate criollo (*Persea americana*), un residuo agroindustrial de gran abundancia regional, mediante su transformación en carbón activado para el tratamiento de aguas contaminadas. El estudio buscó mitigar el impacto ambiental de estos desechos bajo un modelo de economía circular, analizando la capacidad adsorptiva del material y determinando su factibilidad económica para una producción a escala industrial.

La metodología se desarrolló en cuatro fases secuenciales. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica del precursor, confirmando que cuenta con propiedades óptimas para el desarrollo de una estructura porosa. En la fase de síntesis, el material fue sometido a un proceso de carbonización a 400 °C y una posterior activación química con ácido fosfórico (H₃PO₄), empleando una relación de impregnación de 2:1 para garantizar la apertura de los poros. Posteriormente, se validó el desempeño del carbón mediante ensayos de cinética de adsorción con el colorante azul de metileno, logrando un porcentaje de remoción excepcional del 96 % en un tiempo de contacto de tan solo 30 minutos.

Finalmente, se abordó el diseño del proceso para una planta con capacidad de producción de carbón para 1200 kg/día. Para ello, se cotizaron los equipos industriales necesarios para el montaje de la línea de producción, incluyendo el sistema de molienda, hornos rotatorios y tanques de lavado. El análisis financiero determinó que el costo de producción unitario es de \$17,877.93 COP por kilogramo, lo cual, proyectado a 10 años, arroja una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 18.78 %. Los resultados concluyen que la semilla de aguacate es un precursor técnica y financieramente competitivo, con una velocidad de adsorción superior a la de otros materiales convencionales reportados en la literatura.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Doctorado en Ingeniería Química. Codirector: Elkin Andrés Silva Calderón. Ingeniero Mecánico

Abstract

Title: Study of an activated carbon obtained from criollo avocado seed and its application in the adsorption of water pollutants. *

Authors: Cesar Alfredo Moreno Moreno & Juan Pablo Solano Rueda**

Keywords: Activated carbon, Criollo avocado seed, Chemical activation, Methylene blue, Adsorption kinetics, Circular economy, Techno-economic feasibility. Abstract

This graduation project focused on the valorization of the criollo avocado seed (*Persea americana*), a highly abundant regional agro-industrial waste, through its transformation into activated carbon for contaminated water treatment. The study aimed to mitigate the environmental impact of these wastes under a circular economy model, assessing the material's adsorptive capacity and determining its economic feasibility for industrial-scale production.

The methodology was carried out in four sequential phases. Initially, the precursor underwent physicochemical characterization, confirming its optimal properties for developing a porous structure. In the synthesis phase, the material was carbonized at 400 °C followed by chemical activation with phosphoric acid (H₃PO₄), using a 2:1 impregnation ratio to ensure pore development. Subsequently, the carbon's performance was validated through adsorption kinetics tests using methylene blue dye, achieving an exceptional removal percentage of 96% within a contact time of only 30 minutes.

Finally, the process design was addressed for a plant with a capacity of 1200 kg/day. For this purpose, the necessary industrial equipment for the production line assembly was quoted, including the milling system, rotary furnaces, and washing tanks. The financial analysis determined a unit production cost of \$ 17,877.93 COP per kilogram, which, projected over 10 years, yields an Internal Rate of Return (IRR) of 18.78%. The results conclude that the avocado seed is a technically and financially competitive precursor, with an adsorption speed superior to other conventional materials reported in the literature.

*Degree Work

**Physical and Mechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. PhD Chemical Engineering. Codirector: Elkin Andrés Silva Calderón. Mechanical Engineer.

Introducción

El aguacate es un cultivo que ha venido aumentando su producción con el pasar de los años a nivel global. Esto debido a su valor nutricional que lo ha convertido en un fruto bastante consumido. En Colombia, para el año 2021 se registró una producción total de aguacate de 661.237 toneladas (Minagricultura, 2021) donde el 67.5% pertenece a las variedades piel verde y criollo. Este incremento ha consolidado al país como uno de los principales productores a nivel mundial, impulsando la economía agrícola y fomentando la exportación. Asimismo, la industria del aguacate ha provisto de mayores posibilidades económicas para los pequeños y medianos agricultores, promoviendo el trabajo en el campo.

La industrialización de este ha generado grandes volúmenes de desechos los cuales causan contaminación ambiental, manifestación de plagas y costos adicionales para su eliminación (Contreras et al., 2022) entre estos desechos está la semilla, de la cual implica el 16% del peso seco del fruto (Chel-Guerrero et al., 2016), la que, de tantas toneladas de aguacate producidas al año por país, contribuye a una cantidad de materia prima de calidad que no se le está agregando valor.

Buscando el aprovechamiento de esta semilla del aguacate se han estudiado diversas alternativas como lo puede ser la industria textil, medicinal, alimenticia y también se ha demostrado que se puede abordar la industria del tratamiento de agua. Una alternativa prometedora en el tratamiento del agua es la producción de carbón activado a partir de la semilla de aguacate, lo que permitiría su aplicación en la remoción de contaminantes en el agua.

Para esto, se deben examinar diversos factores tanto en el proceso de obtención como en las propiedades finales de este carbón activado. En términos de producción, resulta fundamental

analizar los parámetros operativos de la pirólisis y la activación química para determinar el rendimiento másico del proceso. Dado que la transformación de la biomasa requiere una utilización eficiente de los recursos, un análisis detallado del balance de masa y la estimación de los costos operativos (OPEX) permitirán establecer la viabilidad técnica y económica del proyecto a escala industrial bajo un modelo de economía circular. Por otro lado, en cuanto a las características del producto final, es estrictamente necesario comprobar la efectividad de su estructura porosa determinando su desempeño real en la adsorción de contaminantes en el agua.

Por lo tanto, la pregunta problema que se plantea en este proyecto es: ¿Cuál es el desempeño en la producción y en las propiedades finales del carbón activado obtenido a partir de la semilla de aguacate criollo, en términos de adsorción de contaminantes y viabilidad industrial?

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el desempeño del carbón activado obtenido a partir de la semilla del aguacate criollo, mediante activación química con ácido fosfórico, determinando su capacidad de remoción de contaminantes modelo, así como su viabilidad técnico-económica dentro de un enfoque de economía circular.

1.2 Objetivos Específicos

Obtener un carbón activado a partir de la semilla del aguacate criollo mediante una activación química haciendo uso de ácido fosfórico.

Determinar el rendimiento másico de las etapas de carbonización y activación química mediante el balance de materia para la obtención de carbón activado a partir de biomasa residual.

Determinar el desempeño de un carbón activado para la adsorción de contaminantes en el agua mediante el índice de azul de metileno.

Determinar la viabilidad técnico-económica de la producción de carbón activado a partir de la semilla del aguacate criollo.

2 Marco referencial

Para el desarrollo del presente proyecto, se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a consolidar el marco referencial, integrando trabajos de grado, artículos científicos y estudios técnicos especializados en la síntesis de materiales adsorbentes y la valorización de residuos agroindustriales. Esta recopilación documental permitió sintetizar antecedentes nacionales e internacionales sobre la obtención de carbones activados a partir de biomásas, contextualizando experiencias previas y estableciendo los fundamentos químicos, metodológicos y financieros necesarios para sustentar científicamente el diseño de la planta y la evaluación de la capacidad adsorptiva de la semilla de aguacate.

2.1 Antecedente internacional

En la Universidad de Chile (González, 2017), se realizó un proyecto que se centró en la obtención de un carbón activado a partir de desechos agroindustriales como el aserrín de pino y la cáscara de arroz para adsorber arsénico presente en el agua. Estos carbones fueron activados a partir de los métodos de activación física con CO_2 y N_2 y activación química con ZnCl_2 y H_3PO_4 , junto con modificaciones mediante un proceso de impregnación de hierro para realizar evaluaciones de desempeño que permitan seleccionar el carbón activado más eficiente de acuerdo con ciertas condiciones especificadas. El proceso de obtención se realizó con las distintas etapas de trituración y tamizado, secado, carbonizado y su respectiva activación e impregnación de hierro con procesos específicos para cada fase. Luego se realizó la caracterización de los carbones por medio de pruebas como Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), área superficial BET, PH superficial y difracción de rayos X (XRD). Para las pruebas de adsorción bastó con realizar cinéticas de adsorción de arsénico, y un método colorimétrico para la medición del arsénico. En los resultados se mostró que el precursor que tuvo un bajo contenido de cenizas

(aserrín de pino) propiciaba la síntesis de un carbón activado de alta pureza y mediante las pruebas de síntesis se decidió que el precursor elegido sería el aserrín de pino a pesar que la cáscara de arroz tuvo un rendimiento algo mayor. De este modo, realizado el estudio del aserrín de pino con las distintas activaciones e impregnaciones y comparando su rendimiento con un carbón activado comercial, se definió que el carbón activado de aserrín de pino activado físicamente con CO₂ e impregnado con hierro dependiendo del PH (CAP-CO₂-FE) fue el que mayor capacidad de adsorción de arsénico tuvo respecto a los obtenidos anteriormente.

2.2 Antecedente nacional

Un proyecto desarrollado en la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Grisales A & Rojas W, 2016) consistió en generar un carbón activado a partir de la pulpa del café donde se usó una metodología basada en la activación química de este precursor para obtener el carbón activado, evaluando diferentes activadores (ácido fosfórico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio) en concentraciones del 20% y 40%. El proceso incluyó etapas de carbonización, activación química, lavado y secado del carbón obtenido. Posteriormente, se caracterizaron los carbones activados mediante pruebas de humedad, densidad aparente, contenido de cenizas, pH, solubles en agua y número de yodo, siguiendo normas estandarizadas. Los resultados mostraron que el carbón activado obtenido con ácido fosfórico al 40% presentó los mejores porcentajes de remoción de colorante azul marino Bh en aguas residuales industriales, alcanzando valores similares a los del carbón activado comercial. Además, se observó que la remoción del colorante fue más eficiente en los primeros 30 ml de muestra tratada y que el equilibrio de adsorción se alcanzó después de 7 horas de contacto. Estos resultados demuestran el potencial de la pulpa de café como materia prima para la producción de carbón activado con aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes.

2.3 Antecedente regional

En la Universidad Industrial de Santander (UIS), Ramírez Terán (2013) desarrolló un proyecto centrado en la producción de carbones activados a partir de un residuo agroindustrial abundante en la región como es el bagazo de caña de azúcar, con el fin de evaluar su capacidad de adsorción frente al colorante azul de metileno. El estudio empleó métodos de activación química utilizando ácido fosfórico (H_3PO_4) en dos rutas distintas: activación directa del precursor y activación a partir de biochar pirolítico (proceso de dos etapas). El proceso experimental comprendió las fases de adecuación de la materia prima, impregnación con el agente activante, tratamiento térmico y neutralización del material final. Para validar la efectividad de los carbones, se realizaron caracterizaciones mediante área superficial específica BET y pruebas de desempeño utilizando espectrofotometría para determinar la capacidad de carga. Los resultados revelaron que la temperatura de operación fue la variable determinante en el desarrollo de la porosidad. Se concluyó que la activación directa permitió obtener carbones con una capacidad de adsorción superior, alcanzando valores de hasta 733 mg/g, superando significativamente los 193 mg/g obtenidos en el método de dos etapas, lo que posiciona al bagazo de caña como un precursor regional de alta eficiencia metodológicamente compatible con el uso de H_3PO_4 .

3 Marco teórico

3.1 La agroindustria

La agroindustria se define como la actividad económica que combina la industria con la producción agrícola, esto para desarrollar productos alimenticios o derivados de estos (González, 2013). En la actualidad la agroindustria es reconocida no solo por su impacto económico sino también por su impacto en el medio ambiente, ya que en el procesamiento de las materias primas se producen residuos que si no son bien dispuestos pueden llegar a generar contaminación o problemas de salud pública debido a la manifestación de plagas.

En Colombia, la agroindustria se ha convertido en un pilar fundamental para la economía nacional, ya que al ser un país con diversos climas y suelos se producen una gran variedad de productos agrícolas. Este sector no solo contribuye significativamente al PIB, sino que también genera empleo en zonas rurales, impulsa la modernización del campo y fomenta la exportación de productos.

3.1.1 Manejo de residuos en la agroindustria

Los residuos agroindustriales se definen como materiales, ya sean sólidos o líquidos, que se generaron durante el procesamiento industrial de productos primarios. Si bien estos han dejado de ser útiles para la actividad que los produjo, pueden ser reutilizados o transformados en nuevos productos con valor económico (Saval, 2012).

El tratamiento que se les suele dar a estos residuos agroindustriales recae en darles una disposición a rellenos sanitarios o buscar una forma de agregarles valor. Una de estas formas de agregarles valor que ha cobrado relevancia es el desarrollo de estrategias de economía circular, donde estos desechos no se consideran desperdicio, sino materias primas secundarias para nuevas aplicaciones.

3.2 El aguacate

El aguacate es una fruta de origen tropical que crece en el árbol persea americana. En Colombia el aguacate se encuentra en distintas variedades de las cuales las más comunes son el aguacate Hass, papelillo y criollo.

3.2.1 *Industrialización del aguacate*

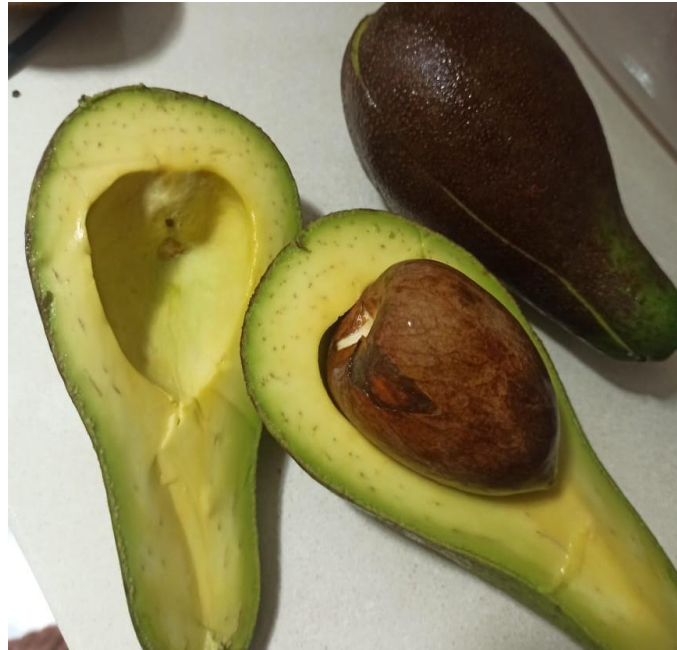
El aguacate ha aumentado su consumo en todo el mundo y debido a esto se han incrementado las áreas de cultivo en los países productores. Gracias a esto el aguacate se ha sometido a una industrialización en la cual se generan productos derivados de este como el aceite de aguacate, antioxidantes, antiinflamatorios derivados de su semilla, diuréticos naturales (Onyedikachi et al., 2024), guacamole, entre otros.

3.2.2 *Aguacate criollo colombiano*

Como lo describe en su proyecto (Acosta M, 2011) la variedad de aguacate criollo es uno de los frutos más consumidos en Colombia, este se distingue por tener un cuello largo, cascara lisa, bajo contenido de aceite, cuenta con un alto contenido de fibra y una semilla grande. Esta variedad es muy utilizada para crear híbridos debido a su alta resistencia a enfermedades y buena adaptación en diferentes suelos térmicos (p. 13).

Figura 1

Aguacate criollo colombiano

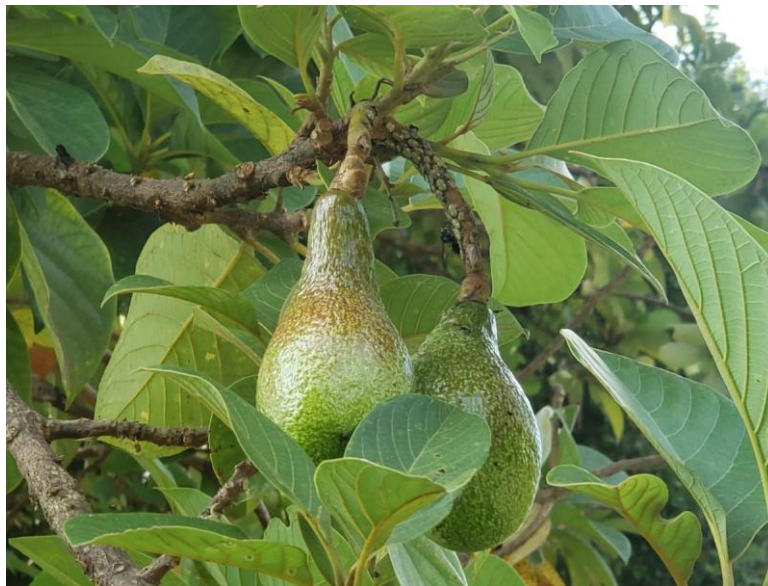
**3.2.3 Producción de aguacate criollo colombiano**

Colombia posee una superficie cultivada de 92.699 hectáreas en todo el país y una producción de 661.237 toneladas, lo que representa un rendimiento de 10 toneladas por hectárea cosechada (Minagricultura, 2021). En los últimos años, esta producción ha ido en aumento, consolidando a Colombia como uno de los principales productores de aguacate del mundo.

Según el Ministerio de Agricultura (2021), aproximadamente el 66% del área sembrada de aguacate en el país corresponde a las variedades de piel verde y criollo. La producción de aguacate criollo alcanza su punto máximo entre marzo y junio, mientras que en el resto del año disminuye en comparación con estos meses de mayor cosecha.

Figura 2

Producción de Aguacate criollo colombiano

**3.3 Carbón activado**

El carbón activado es un elemento artificial que posee una gran porosidad y una extensa superficie interna. Posee una estructura molecular cristalina similar al grafito, lo que le permite tener una gran capacidad adsorptiva, debido a su alta porosidad puede alcanzar áreas superficiales de hasta 1500 metros cuadrados por gramo, (Medina & Manrique, 2018). Estas propiedades lo hacen ideal para la adsorción de moléculas conocidas como adsorbatos.

3.3.1 Caracterización de la materia prima para su procesamiento

Como indica en su proyecto (Gonzales D, 2017) para la obtención de un carbón activado primero se debe someter a la materia prima a una caracterización para tener conocimiento previo

de sus propiedades. Para esto se realizan estudios de humedad, carbono total de la muestra y estudios de química superficial (p. 51).

3.3.2 Proceso de pirólisis

La pirólisis consiste en la degradación térmica de la biomasa bajo condiciones de ausencia total o casi total de oxígeno. Este tratamiento provoca la ruptura de los compuestos orgánicos y la generación de tres productos principales: una fracción gaseosa condensable, una fracción gaseosa no condensable y un residuo sólido denominado char o carbón pirolítico. Cuando el proceso se diseña específicamente para obtener este último, se emplean temperaturas moderadas y velocidades de calentamiento lentas, ya que estas condiciones promueven la formación del sólido carbonoso. El char resultante se caracteriza por su elevado contenido de carbono fijo y estructura porosa, lo cual lo convierte en un material adecuado para su uso como combustible o como base para la fabricación de carbón activado (Demirbas, 2009).

3.3.3 Métodos de activación de carbón activado

Para la obtención del carbón activado se tienen en cuenta 2 métodos de activación, la activación física y la activación química. La elección de cada método depende de distintos factores que van ligados principalmente al precursor o material orgánico base sobre el cual se obtendrá el carbón activado, también esto dependerá de los factores económicos y los de aplicación que se requieran.

Según (Martínez, 2012), variables como tipo de precursor empleado, pretratamiento, modo de activación, etc., marcan las características físico-químicas, tales como la estructura porosa y la química superficial del carbón activado.

3.3.3.1 Parámetros más relevantes en la activación del carbón.

3.3.3.1.1 Naturaleza del Material Precursor. Como menciona en su artículo (Yahya et al., 2015) el material de partida o biomasa juega un rol principal en las propiedades, características y calidad del carbón activado resultante. Específicamente, las proporciones de los componentes lignocelulósicos determinan la estructura porosa final: un mayor contenido de lignina en el precursor favorece la formación de estructuras macroporosas, mientras que un alto contenido de celulosa promueve el desarrollo de estructuras microporosas.

3.3.3.1.2 Agente Activante (Activación Química). Igualmente (Yahya et al., 2015) menciona que la activación química presenta mayores ventajas frente a la física, ya que requiere menores temperaturas, genera un mayor rendimiento de masa y produce porosidades bien desarrolladas en un solo paso. El uso de ácido fosfórico actúa promoviendo la descomposición pirolítica y la formación de estructuras reticuladas (enlaces cruzados) en la biomasa. Este agente es altamente efectivo para la producción de mesoporos, lo cual es fundamental para retener moléculas de mayor tamaño (característica medible mediante índices como el azul de metileno). Operativamente, el ácido fosfórico no es tóxico y facilita la etapa de lavado, requiriendo únicamente enjuagues con agua para recuperar el carbón.

3.3.3.1.3 Temperatura de Carbonización y Activación. En el artículo (Yahya et al., 2015) indican, que la temperatura define tanto el rendimiento másico del proceso como la viabilidad de la estructura porosa. De manera general, un incremento en la temperatura provoca una disminución en el rendimiento sólido del carbón debido a una mayor liberación de gases y líquidos. Para la activación con ácido fosfórico, se requiere una temperatura de activación baja, típicamente alrededor de 400 °C, siendo suficiente para producir un carbón activado de alto grado. Superar los límites térmicos es contraproducente: las estructuras reticuladas formadas por el ácido

alcanzan su límite de estabilidad térmica entre 450 °C y 500 °C. A temperaturas superiores, estas estructuras sufren contracción térmica, reduciendo el desarrollo de la porosidad.

3.3.3.1.4 Relación de Impregnación. Este parámetro se define como la proporción en peso entre el agente activante y el material precursor. Constituye uno de los factores más importantes en la activación química debido a su efecto directo en el desarrollo de los poros. Un aumento en la proporción de ácido incrementa significativamente el área superficial y el volumen de poro. Sin embargo, este incremento en las propiedades de adsorción ocurre a expensas del rendimiento final, el cual disminuye a medida que aumenta la concentración del agente activante. Considerando que el equilibrio entre la temperatura (400 °C) y la relación de impregnación impacta directamente la cantidad de carbón que se logra retener al final del proceso (rendimiento másico).

3.3.3.2 Activación química. Es un proceso que implica la impregnación del material orgánico o precursor con un agente químico activante como el ácido fosfórico (H_3PO_4), cloruro de zinc ($ZnCl_2$), hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH), ácido sulfúrico (H_2SO_4), entre otros. Como indican (Álvarez et al., 2014), tras la impregnación, se deja actuar el agente químico con el material orgánico y se aplica un proceso pirolítico donde la carbonización y la activación se dan al mismo tiempo en un rango de temperaturas de 400°C a 900°C. En esta etapa, el agente químico deshidrata la materia prima y se incrementa el grado de aromatización del carbón, creando la estructura porosa tridimensional.

3.3.3.3 Activación física. También conocida como activación térmica, es un proceso que consiste principalmente en el calentamiento o carbonización del material precursor por medio de pirólisis a temperaturas medias entre 400°C y 900°C seguido de otra etapa de activación que se realiza a temperaturas entre 800°C y 1100°C en presencia de un oxidante como

agente activante que puede ser CO₂ y vapor de agua como se indica en (Universidad de Sevilla, n.d.). De este modo se van generando o abriendo los poros los cuales son indicadores de un carbón activado por la capacidad de adsorción.

3.3.4 Porosidad

Este término refiere a la estructura interna del carbón activado la cual según (Medina González & Manrique-Abril, 2018) se desarrolla y modifica durante la activación y se puede adecuar según la aplicación necesaria.

Esta porosidad permite al carbón activado la alta adsorción de moléculas contaminantes, entre estos poros se encuentran los microporos, mesoporos y macroporos, clasificados por la nomenclatura IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) relacionándolos con un tamaño específico del poro según indican (White et al., 2009).

3.4 Adsorción

Como indica (Carbotecnia, 2023), la adsorción es un fenómeno físico, en donde un compuesto en fase líquida o gaseosa entra en contacto con un sólido adsorbente y este compuesto es adherido a la superficie del sólido mediante una fuerza física conocida como fuerza de dispersión de London.

(Tubert & Talanquer, 2018), mencionan que existen dos tipos de adsorción y que su principal diferencia radica en el tipo de interacciones entre adsorbente y adsorbato.

3.4.1 Adsorción química

Como menciona (González, 2017) en su proyecto, si existen reacciones químicas entre las moléculas adsorbidas y la superficie adsorbente existe un fenómeno conocido como adsorción química o quimisorción, donde los enlaces se asemejan a enlaces químicos y generan calores parecidos a los de una reacción química.

(Tubert & Talanquer, 2018), indican que esta formación de enlaces hace que el proceso de adsorción sea más selectivo debido a la naturaleza de las sustancias que se verán involucradas, ya que hay elementos que no generan enlaces ni compuestos de ningún tipo, como el helio. Este tipo de adsorción es poco utilizada debido a los cambios que causa a la estructura de los distintos compuestos.

3.4.2 Adsorción física

Conocida como fisisorción, (González, 2017) indica que, si las interacciones entre adsorbato y adsorbente se deben a las fuerzas de Van der Waals, las cuales se clasifican como interacciones débiles, se trata de una adsorción física donde las moléculas adsorbidas son ligadas débilmente y los calores de adsorción son bajos. Siendo este el tipo de adsorción más utilizado debido a las condiciones de operación, aplicaciones, capacidad de adsorción y el impacto en la estructura del material.

3.5 Índice de azul de metileno

La prueba del índice de azul de metileno se estima como el número de miligramos de azul de metileno decolorado por 0.1g de carbón activado, es un método rápido para conocer la capacidad de adsorción de un carbón activado frente a moléculas grandes (Rojas-Morales et al., 2016). Esta prueba permite determinar la eficiencia con la que un material puede retener moléculas en su superficie, proporcionando información sobre su estructura porosa y su capacidad de adsorción específica.

El procedimiento consiste en preparar una solución acuosa de azul de metileno a una concentración determinada. A continuación, esta solución se pone en contacto con el material adsorbente, ya sea mediante agitación, filtración o lecho fijo. Luego de un tiempo definido de interacción, se separa la fase líquida del material adsorbente y se mide la concentración de azul de

metileno residual en la solución. La determinación del índice de azul de metileno se realiza comúnmente mediante espectrofotómetro HACH DR2800 a una longitud de onda de 620nm (Rojas-Morales et al., 2016). A partir de estos datos, se calcula la cantidad de azul de metileno adsorbida por unidad de masa del material, lo que permite comparar la capacidad adsorbente entre diferentes muestras.

3.6 Análisis técnico económico

El análisis técnico-económico constituye la columna vertebral en la formulación y evaluación de proyectos industriales, puesto que integra la viabilidad operativa con la sostenibilidad financiera. Según lo establece (Baca Urbina, 2013), el estudio técnico no se limita únicamente a la ingeniería del producto, sino que tiene por objeto proveer la información necesaria para cuantificar el monto de las inversiones y los costos de operación. De esta manera, se define la función de producción óptima que permite la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles para la obtención del bien o servicio final.

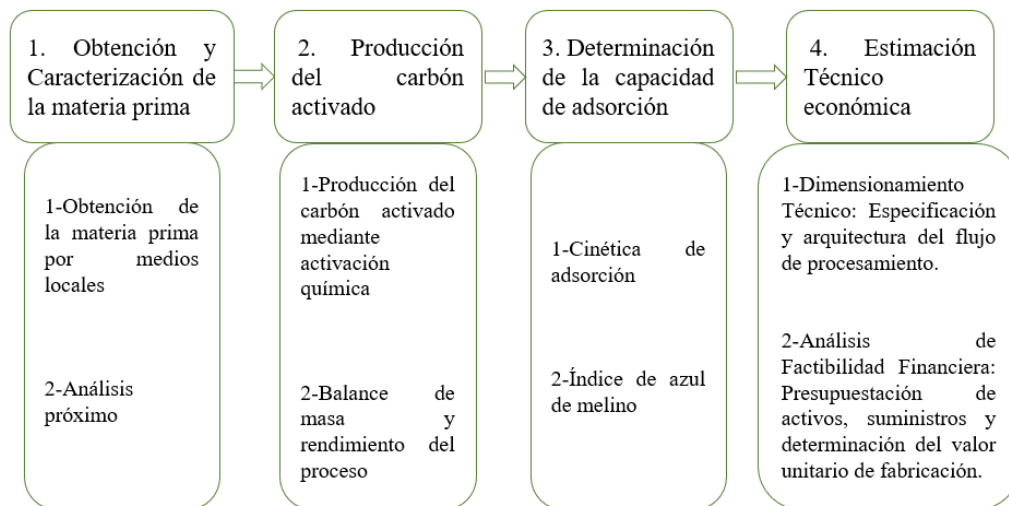
Consecuentemente, el análisis económico actúa como la fase sistematizadora que transforma los datos técnicos (materia prima, maquinaria, mano de obra) en unidades monetarias. Su propósito fundamental es determinar la rentabilidad de la inversión, comparando los costos totales de producción frente a los ingresos proyectados, para así validar si el margen de ganancia es suficiente para cubrir los compromisos financieros y generar valor para el inversionista.

4 Metodología

A continuación, se detallan las fases de desarrollo del proyecto, tomando como base el esquema general del diagrama siguiente:

Figura 3

Diagrama de las fases de la metodología



4.1 Obtención del carbón activado a partir de la semilla del aguacate criollo

4.1.1 Obtención de la materia prima

Bajo los lineamientos de la economía circular, la cual busca reincorporar los residuos agroindustriales como materias primas secundarias de valor agregado, se llevó a cabo la recolección de la biomasa precursora en la Plaza de Mercado de San Francisco (Bucaramanga).

En la búsqueda de la materia prima para el carbón, se estableció una colaboración con dos comerciantes mayoristas distribuidores de aguacates. Se recolectaron unidades que, debido a su estado de sobre maduración o deterioro estético, habían finalizado su ciclo de vida comercial y eran consideradas desecho. Este procedimiento permitió la obtención de la semilla garantizando

su integridad estructural para los procesos posteriores, sin afectar la cadena de suministro de alimentos aptos para el consumo.

4.1.2 Caracterización de la materia prima

Para evaluar la calidad de la semilla de aguacate criollo como materia prima, se determinó su composición mediante análisis próximo siguiendo normas estandarizadas para biomasa. Con el fin de garantizar la repetibilidad de los resultados, cada determinación se realizó por triplicado, lo que permitió disgregar con precisión la estructura del precursor en sus cuatro componentes fundamentales: humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas.

4.1.2.1 Análisis próximo.

4.1.2.1.1 Determinación de humedad. Siguiendo los lineamientos de la norma UNE-EN ISO 18134-1 el ensayo para determinar el contenido de humedad, se realizó por triplicado utilizando placas Petri de 55.85 mm de diámetro, cuya masa inicial se registró haciendo uso de una balanza con precisión de ± 0.1 g. Donde en cada una se depositaron aproximadamente 5 g de biomasa, empleando adicionalmente una placa vacía como referencia de control.

Las muestras se sometieron a secado en una estufa universal (Memmert UN55, figura 3) a temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante. Donde de acuerdo con la norma, este criterio de masa constante se cumple cuando la variación de masa es inferior al 0.2% de la masa inicial tras un periodo de calentamiento adicional de 60 minutos. Finalizado el proceso, las placas se dejaron enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente para su posterior pesaje final y realizar el cálculo del porcentaje de humedad de acuerdo con la ecuación:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (1)$$

Donde:

m_1 es la masa de la bandeja vacía usada para la porción de ensayo, en gramos;

m_2 es la masa de la bandeja y de la porción de ensayo antes del secado (peso a temperatura ambiente), en gramos;

m_3 es la masa de la bandeja y de la porción de ensayo después del secado (peso cuando aún está caliente), en gramos;

m_4 es la masa de la bandeja de referencia antes del secado (peso a temperatura ambiente), en gramos;

m_5 es la masa de la bandeja de referencia después del secado (peso cuando aún está caliente), en gramos.

El resultado se debe calcular con dos cifras decimales y el valor medio de ambas determinaciones se debe redondear con una aproximación de 0.1 % para el informe.

Figura 4

Estufa Memmert



4.1.2.1.2 Determinación de cenizas. Para determinar el contenido de cenizas se realizó un ensayo siguiendo la norma UNE-EN ISO 18122, donde previamente al mismo se acondicionaron los crisoles en un horno mufla (figura 4) a una temperatura de $550 \pm 10^\circ\text{C}$ durante 60 minutos para asegurar la eliminación de impurezas y humedad, siendo posteriormente enfriados en un desecador y pesados en una balanza con precisión de ± 0.1 mg.

Una vez fueron pesados los crisoles, se tomaron muestras de aproximadamente 1.5 g del precursor y se añadieron a los crisoles, los cuales se sometieron a un calentamiento controlado en el horno mufla donde inicialmente se elevó la temperatura uniformemente a 250°C en un intervalo de 35 minutos, manteniendo dicha condición durante 60 minutos para permitir la liberación de volátiles antes de la ignición. Seguidamente, se incrementó la temperatura hasta $550 \pm 10^\circ\text{C}$ en un periodo de 30 minutos, mantenida por 2 horas para garantizar la incineración completa. Finalmente, las muestras se enfriaron en un desecador hasta temperatura ambiente y se registró su masa final para posteriormente realizar el cálculo del porcentaje de cenizas en base seca por medio de la siguiente ecuación:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2)$$

Donde:

m_1 es la masa, en gramos, del plato vacío;

m_2 es la masa, en gramos, del plato más la porción de ensayo;

m_3 es la masa, en gramos, del plato más la ceniza;

M_{ad} es el contenido de humedad en porcentaje de la porción de ensayo según se determina.

El resultado se debe calcular con dos cifras decimales y el valor medio a registrar se debe redondear con una aproximación de 0,1 %.

Figura 5

Horno mufla



4.1.2.1.3 *Determinación de volátiles.* Para determinar la cantidad de materia volátil se siguió la metodología de la norma UNE EN-ISO 18123. Para este ensayo se utilizaron 3 crisoles con su respectiva tapa, los cuales fueron previamente acondicionados llevándolos a una temperatura de $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$ en el horno mufla durante $7 \text{ min} \pm 5 \text{ s}$ para posteriormente dejarlos enfriar en el desecador y tomar sus pesos.

Luego se llenaron los crisoles con $1.5 \pm 0.1 \text{ g}$ de muestra de biomasa junto con la respectiva tapa para después introducirlos al horno previamente calentado a temperatura de $900 \pm 10^{\circ}\text{C}$ y se dejaron durante $7 \text{ min} \pm 5 \text{ s}$. Transcurrido este tiempo, se retiraron los crisoles y se dejaron enfriar al aire libre para luego posicionarlos en el desecador hasta enfriar a temperatura ambiente para su posterior pesaje y cálculo del porcentaje de volátiles en base seca por medio de la siguiente ecuación:

$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] * \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (3)$$

Donde:

m_1 es la masa, en gramos, del crisol vacío y su tapa;

m_2 es la masa, en gramos, del crisol, su tapa y la porción de ensayo antes del calentamiento;

m_3 es la masa, en gramos, del crisol, su tapa y el residuo después del calentamiento;

M_{ad} es la humedad, como fracción másica, de la porción de ensayo determinada según la Norma ISO 18134-3.

El resultado se debe calcular con dos decimales y el valor medio a registrar se debe redondear con una

aproximación del 0,1 %.

4.1.2.1.4 Determinación del carbono fijo. El contenido de carbono fijo se determinó teóricamente por diferencia de masas, basándose en los resultados obtenidos previamente para la materia volátil y las cenizas. Para este cálculo, se empleó una base seca, lo que implica que la suma de los componentes sólidos (materia volátil, cenizas y carbono fijo) constituye el 100% de la masa de la muestra exenta de humedad, el cálculo se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$C_f + A_d + V_d = 100 \quad (4)$$

Donde:

C_f es el contenido de carbono fijo en %;

A_d es el porcentaje de cenizas en base seca;

V_d es el porcentaje de volátiles en base seca.

4.1.3 *Obtención de carbón activado*

4.1.3.1 Carbonización de la materia prima. La carbonización de la semilla de aguacate se llevó a cabo mediante un proceso de pirólisis convencional, orientado a maximizar la producción de material sólido (char). El proceso se realizó en un horno tubular (figura 5), donde se depositaron entre 10 y 15 g de biomasa. Previamente al calentamiento se inyectó nitrógeno (N_2) a un caudal de 100 ml/min durante todo el proceso para garantizar las condiciones de la atmósfera libre de oxígeno.

El protocolo térmico se ejecutó con una rampa de calentamiento controlada de $10^{\circ}C/min$ hasta alcanzar temperatura final de $400^{\circ}C$ manteniendo esta temperatura durante 60 minutos. Finalizado este protocolo, se permitió el enfriamiento del sistema durante 30 minutos manteniendo el flujo de nitrógeno para prevenir formación de cenizas superficiales por oxidación.

Figura 6

Horno tubular para pirólisis



4.1.3.2 Activación del carbón.

4.1.3.2.1 Impregnación del Precursor Carbonizado. Tras la obtención del material carbonizado, se procedió a la etapa de impregnación química empleando ácido fosfórico (H_3PO_4) con una pureza del 85% como agente activante. Se estableció una relación másica de impregnación de 2:1 (agente activante: precursor), diluyendo previamente el ácido en agua destilada para reducir su viscosidad y favorecer la difusión en la matriz porosa. La mezcla resultante se introdujo en un mezclador mecánico, manteniéndose en agitación continua durante un periodo de 12 horas para asegurar una interacción homogénea entre la solución ácida y el sustrato de carbono.

Figura 7

Impregnación



4.1.3.2.2 Activación Térmica y Repetibilidad Experimental. Finalizada la impregnación, se llevó a cabo el tratamiento de activación térmica en un reactor bajo atmósfera

inerte. Con el propósito de verificar la repetibilidad del proceso y la consistencia de los resultados, se realizaron tres activaciones independientes, empleando una masa de 5 gramos de material impregnado seco para cada ensayo. Las muestras fueron sometidas a calentamiento hasta alcanzar una temperatura de activación de 400 °C, manteniéndose en estas condiciones durante un tiempo de residencia de 1 hora. Este tratamiento térmico permitió el desarrollo de la porosidad mediante la reacción química controlada y la evolución de volátiles restantes.

4.1.3.2.3 Lavado, Neutralización y Secado Final. Una vez completado el tiempo de residencia y enfriado el reactor, los productos activados se sometieron a un proceso de lavado exhaustivo para la eliminación del exceso de ácido y compuestos fosfatados residuales. Se realizaron lavados sucesivos con agua destilada caliente, monitoreando el pH del efluente hasta alcanzar la neutralidad. Finalmente, el carbón activado húmedo se secó en estufa a 105 °C hasta obtener peso constante, quedando así acondicionado para los ensayos de caracterización posteriores.

4.2 Determinación del Rendimiento Másico y Balance de Materia

Para evaluar la eficiencia del proceso de obtención de carbón activado a partir de biomasa residual (semillas de *Persea americana*), se estructuró un balance de materia enfocado en la cuantificación del rendimiento másico en cada etapa de transformación. La trazabilidad de la masa se llevó a cabo operando en base seca para mitigar las desviaciones generadas por la humedad inherente de la biomasa. El cálculo se dividió en las siguientes fases operativas:

4.2.1 Acondicionamiento de la Biomasa

Previo a los procesos térmicos, la biomasa húmeda se sometió a un proceso de secado hasta alcanzar un peso constante. Esta masa inicial en base seca se denominó Mbs y constituye la base de cálculo principal para el rendimiento global del sistema.

4.2.2 Rendimiento de Carbonización (R_c)

Durante la etapa de pirólisis, la biomasa seca se transformó en material carbonizado (char), liberando material volátil en forma de gases y alquitranes. La masa del char obtenido tras el enfriamiento se registró como m_{char} . La eficiencia de esta etapa térmica se cuantificó mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{char} = \frac{m_{char}}{m_{inicial}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

Y_{char} es el rendimiento másico de la carbonización en %;

m_{char} es la masa del char, en gramos, obtenido después del proceso;

$m_{inicial}$ es la masa de la semilla de aguacate seca, en gramos.

4.2.3 Rendimiento de Activación Química (R_a)

El material carbonizado (m_{char}) fue sometido a impregnación con el agente activante químico según la relación de impregnación establecida para el diseño experimental. Posteriormente al tratamiento térmico de activación, el material fue sometido a lavados sucesivos para la remoción de los agentes químicos residuales y cenizas, y finalmente secado. La masa final del carbón activado purificado se definió como m_{ca} . El rendimiento aislado de esta etapa se calculó como:

$$R_a = \frac{m_{ca}}{m_{char}} * 100 \quad (6)$$

Donde:

R_a es el rendimiento másico de la etapa de activación en %;

M_{ca} es la masa final del carbón activado tras los procesos de lavado y secado en g;

M_{char} es la masa del material carbonizado que ingresó a la etapa de activación g.

4.2.4 Rendimiento Global del Proceso (R_g)

Para determinar la viabilidad de la producción y la cantidad total de precursor requerida por unidad de producto final, se calculó el rendimiento global del proceso. Este indicador relaciona directamente la masa de carbón activado funcional obtenido con la masa de biomasa residual inicial procesada por medio de la siguiente ecuación:

$$R_g = \left(\frac{m_{ca}}{m_{bs}} \right) * 100 \quad (7)$$

Donde:

R_g es el rendimiento global del proceso en %;

M_{ca} es la masa final del carbón activado tras los procesos de lavado y secado en g;

M_{bs} es la masa inicial del precursor en base seca g.

4.3 Determinación del desempeño del carbón activado

Para evaluar la eficiencia del material adsorbente sintetizado, se procedió inicialmente con la preparación de una solución madre de azul de metileno con una concentración de 10 mg por cada 100 mL de agua destilada (100 mg/L). Esta solución sirvió como contaminante modelo estandarizado para todas las pruebas experimentales. El diseño experimental se estructuró para comparar el desempeño del precursor sin activar (semilla de aguacate criollo) frente al carbón activado sintetizado.

El procedimiento consistió en poner en contacto una dosis de 20 mg de cada material adsorbente con un volumen de 40 mL de la solución madre, manteniendo los recipientes bajo condiciones de agitación constante (figura 7). Para analizar la cinética de adsorción, se realizaron tomas de muestra y mediciones de la concentración residual en intervalos regulares de tiempo

durante un periodo de hasta 6 horas. La cuantificación de la concentración de azul de metileno residual en las alícuotas se realizó midiendo su absorbancia mediante un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Scientific GENESYS 50, figura 8), configurado a una longitud de onda máxima de 620 nm. Este seguimiento periódico permitió determinar la reducción progresiva del colorante en el fluido y establecer el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio de adsorción en cada tipo de material. Finalmente, a partir de las concentraciones en el equilibrio, se procedió a calcular la capacidad de adsorción (q_e) para cuantificar la capacidad máxima de retención por medio de la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) * V}{m} \quad (8)$$

Donde:

q_e es la capacidad de adsorción mg/g;

C_o es la concentración inicial de la solución en mg/L;

C_e es la concentración en el equilibrio en mg/L;

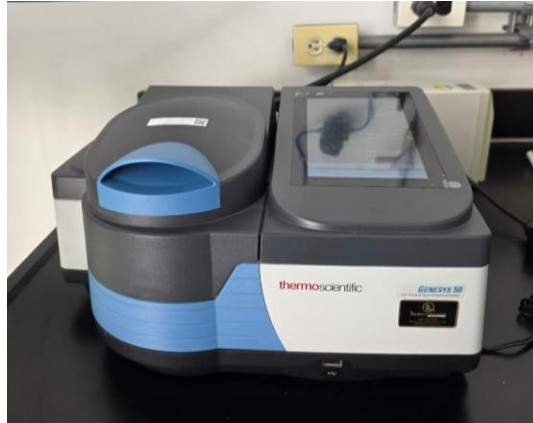
M es la masa del material adsorbente seco utilizado en g;

V es el volumen de la concentración de azul de metileno por frasco expresada en L.

Figura 8

Prueba de azul de metileno



Figura 9*Espectrofotómetro***4.4 Análisis técnico económico**

El análisis técnico-económico del proceso de producción de carbón activado a partir de semilla de aguacate se desarrolló teniendo en cuenta la viabilidad del proyecto a partir de la determinación de costos de inversión (CAPEX), costos operativos (OPEX) y el análisis de indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

En primera instancia, se realizó el diseño conceptual de la planta de proceso, definiendo las etapas unitarias involucradas en la producción del carbón activado, incluyendo pretratamiento de la biomasa, secado, carbonización, impregnación química, activación térmica y postratamiento. A partir de este diseño, se identificaron los equipos principales requeridos, tales como secadores, hornos de pirólisis, reactores de activación, tanques de impregnación y sistemas de transporte de sólidos.

Con esto en mente se cotizaron los diferentes equipos para conocer su costo, principales propiedades y capacidad de trabajo. Se escogieron los siguientes equipos:

Tolva:

Tolva para la recepción de la materia prima: ZEYU-100T

Tabla 1*Características tolva*

Características principales	
Altura	14.26 m
Diámetro	7.3 m
Peso	12.4 T

La tolva se diseñó con una gran capacidad volumétrica para garantizar la continuidad operacional de la planta durante turnos de 12 horas, incluso si el área de recepción de materia prima o el centro de acopio externo se encuentran inactivos. Asimismo, este dimensionamiento permite mantener un banco de reserva de materia prima para asegurar el abastecimiento de los días posteriores.

Banda transportadora:

Banda usada para transportar la materia prima a la trituradora

Tabla 2*Características banda transportadora*

Características principales	
Dimensiones	5m*200mm
Consumo eléctrico	0.37 kW
Capacidad	100 kg/h
Material transportado	Materia prima

Molino:

Molino de martillos para tratamiento de la materia prima: LEABON-9FQ500-50

Tabla 3*Características molino de martillos*

Características principales	
Dimensiones	1250*650*1000 mm
Consumo energético	11 kW
Flujo de entrada	1500-2000 Kg/h

Secador:

Secador rotatorio para la materia prima: **Henan shuliy WD-RD1200**

Tabla 4*Características secador*

Características principales	
Dimensiones	1.2F-12
Consumo eléctrico	7.5 kW
Capacidad	1200 kg/h

Horno de pirolisis:

Horno para la carbonización de la materia prima y activación: **Guoxin-GX800**

Tabla 5*Características horno de pirólisis*

Características principales	
Dimensiones	800F-10000
Consumo eléctrico	17.5Kw
Capacidad	1000 kg/h

Tanque de almacenamiento:

Tanque para el almacenamiento del ácido fosfórico: **Eternit 10000 Litros con Tapa**

Tabla 6*Características tanque de almacenamiento H₃PO₄*

Características principales	
Dimensiones (mm)	2200F-1800
Capacidad	2000 L

Tanque de impregnación:

Tanque donde se impregna el carbón obtenido de la carbonización: **Auris-A200-A-2000L**

Tabla 7*Características tanque de impregnación*

Características principales	
Dimensiones	1700F-2100
Consumo eléctrico	3 kW
Capacidad	2000 L

Evaporador:

Evaporador para el agua con ácido fosfórico: **SUN-SJM3-3200**

Tabla 8*Características evaporador*

Características principales	
Dimensiones	7.3*2.5*10
Consumo eléctrico	32.5 kW
Capacidad	3200 kg/h
Presión de vapor	0.6-0.8 Mpa

Secador:

Secador del carbón activado: **Baichy modelo 800x1000**

Tabla 9*Características secador*

Características principales	
Capacidad	500 kg/h
Diámetro	6000 mm * 600Φ
Potencia	3 kW

Tanque de lavado:

Tanque de lavado del carbón activado: Modelo FYG2000

Tabla 10*Características tanque de lavado*

Características principales	
Capacidad	2000 L
Diámetro	1200 mm
Potencia	4 kW

Zaranda:

Zaranda para la clasificación del carbón activado: **The Nile co., LTD- yk1237**

Tabla 11*Características zaranda*

Características principales	
Dimensiones	4.4 m ²
Consumo eléctrico	11 kW
Capacidad	25-160 Kg/h

Sistema de bombeo

Se eligieron 3 bombas de la misma capacidad, para bombear el H₃PO₄, el agua y el H₃PO₄ residual: **Pedrollo-2CP40/180C**

Tabla 12

Características sistema de bombeo

Características principales	
Dimensiones	7.3*2.5*10
Consumo eléctrico	4.10 kW
Capacidad	450 L/min
Presión	74 psi

Tanque de almacenamiento:

Tanque con capacidad de almacenamiento de 100 toneladas, **modelo: 100T**

Tabla 13

Características tanque de almacenamiento de carbón activado

Características principales	
Capacidad	100 ton
Diámetro	3.16 m
Altura	19 m

Los diferentes balances de masa para cada equipo y su consumo eléctrico se determinaron usando las siguientes formulas:

Balance de masa:

$$\sum m_{entrada} = \sum m_{salida} \quad (9)$$

Donde

$m_{entrada}$: Sumatoria de la masa de todos los materiales que ingresan a un equipo (semilla, ácido, agua, etc.). Medido en Kg/día.

m_{salida} : Sumatoria de la masa de todos los materiales que salen de un equipo (carbón activado, gases volátiles, vapor de agua, licor de lavado). Medido en Kg/día.

Cálculo con Base en Rendimientos (Secado, Pirólisis, Activación)

$$m_{producto} = m_{alimentacion} * \left(\frac{\%rendimiento}{100} \right) \quad (10)$$

Donde:

$m_{producto}$: Masa inicial de la materia prima que entra a sufrir una transformación. Medido en Kg/día.

Consumo eléctrico:

$$E_{elec} = \sum P_{nominal} * t_{operacion} \quad (11)$$

Donde:

E_{elec} : Consumo de energía eléctrica diaria [kWh/día]

$P_{nominal}$: Potencia nominal del motor del equipo [kW]

$t_{operacion}$: Tiempo de operación diario (12h)

Consumo térmico:

Calor Sensible ($Q_{calentamiento}$): Energía para calentar la biomasa, el carbón o el agua líquida hasta una temperatura objetivo.

$$Q_{calentamiento} = m * Cp * (T_{final} - T_{inicial}) \quad (12)$$

Donde:

m : Masa del material a calentar [kg]

C_p : Calor específico del material [kJ/Kg* C°]

T : Temperaturas en grados Celsius [C°]

Calor latente de vaporización (Q_L): Energía para evaporar el agua una vez alcanzados los 100°C (para secador y evaporador)

$$Q_L = m_{evap} * \lambda_{vap} \quad (13)$$

Donde:

m_{evap} : masa de agua a evaporar en kg

λ_{vap} : Calor latente de vaporización del agua (2260 kJ/kg)

Ecuación de Energía Térmica Total Diaria

Para obtener el consumo en la misma unidad comercial de energía kWh, se suman los calores requeridos por el equipo en kJ y se divide entre el factor de conversión kWh = 3600 kJ.

$$E_{termica} = \frac{\sum Q_s + \sum Q_L}{3600} \quad (14)$$

Para el cálculo de la energía del proceso de carbonización y activación se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_{Carbonización\ y\ activacion} = q_{calentamiento} + q_{reacción} \quad (15)$$

Calor de reacción ($q_{reacción}$): Energía que necesita cada kilogramo de biomasa, para que realice el proceso de carbonización.

$$q_{reacción} = h_{reacción} * m \quad (16)$$

Donde:

$h_{reacción}$: es la entalpia de reacción

m : es la masa de todo el lecho

(Van de Velden et al., 2010) expresan valores para entalpías de reacción para algunas biomásas, cuyos valores se encuentran entre 200 y 400 J/g. Al no salir estudio para la semilla de aguacate, se tomó un promedio de los valores presentes en la tabla 4 del mismo documento, y se utilizó un valor de 340 J/g.

Posteriormente la ecuación final de energía de carbonización y activación quedó de esta manera:

$$E_{Carbonización\ y\ activación} = m * Cp * (T_{final} - T_{inicial}) + h_{reacción} * m \quad (17)$$

Posteriormente, se estimó el costo de inversión (CAPEX) mediante el método de factores, el cual consiste en determinar el costo base de los equipos principales y aplicar factores adicionales asociados a instalación, instrumentación. Este método se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C_{capex} = C_{eq} * (1 + \sum_{i=1}^k f_i) \quad (18)$$

Donde:

C_{capex} : Costo total de inversión o capital.

C_{eq} : Costo base de adquisición de los equipos principales.

f_i : Factores de costo adicionales (fracciones del costo del equipo asociadas a instalación, tuberías, instrumentación, etc.).

k : Número total de factores considerados en la estimación.

En paralelo, se calcularon los costos operativos (OPEX), considerando el consumo de materias primas, servicios industriales, mano de obra y mantenimiento. La estimación de estos costos se realizó mediante la siguiente expresión:

$$C_{opex} = C_{materiasprimas} + C_{servicios} + C_{manodeobra} + C_{mantenimiento} \quad (19)$$

C_{opex} : Costos operativos totales del periodo.

$C_{materiasprimas}$: Costo asociado a la adquisición de la semilla de aguacate y los agentes activantes/químicos.

$C_{servicios}$: Costo de los servicios industriales requeridos (energía eléctrica, agua, combustibles o gases).

$C_{manodeobra}$: Costos salariales y prestacionales del personal operativo y administrativo.

$C_{mantenimiento}$ Costos destinados al mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos e instalaciones.

Con base en estos resultados, se determinó el costo unitario de producción por kilogramo de carbón activado, integrando tanto los costos operativos como la inversión inicial distribuida a lo largo de la vida útil del proyecto. Este cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$C_{total} = C_{opex} + \frac{C_{apex}}{N_{total}} \quad (20)$$

Donde:

C_{total} : Costo total de producción por unidad de producto elaborado.

C_{opex} : Costo operativo unitario (costo operativo total dividido por la producción del periodo).

C_{apex} : Inversión total inicial del proyecto.

N_{total} : Producción acumulada (en unidades o kilogramos) estimada durante toda la vida útil de la planta.

Finalmente, se realizó la evaluación financiera del proyecto mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), el cual permite determinar la rentabilidad de la inversión en función del valor del dinero en el tiempo. Este indicador se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} \quad (21)$$

Donde:

VAN: Valor Actual Neto del proyecto.

I_0 : Inversión inicial total en el momento cero ($t=0$).

F_t : Flujo de caja neto generado en el periodo

i : Tasa de descuento o costo de oportunidad del capital.

n : Vida útil del proyecto expresada en años (o periodos).

t : Periodo de tiempo específico que se está evaluando.

Adicionalmente, se determinó la Tasa Interna de Retorno (TIR), definida como la tasa de descuento que hace que el VAN sea exactamente igual a cero:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} \quad (22)$$

Donde:

TIR: Tasa Interna de Retorno. Al igual que en la ecuación anterior, I_0 es la inversión inicial, F_t es el flujo de caja en el periodo t y n es la vida útil. Este indicador evalúa la rentabilidad intrínseca y se compara con el costo de capital para decidir la viabilidad.

Como complemento, se calculó el punto de equilibrio del proceso con el fin de determinar la cantidad mínima de producción y ventas necesaria para cubrir los costos totales sin generar ni pérdidas ni ganancias:

$$Q = \frac{C_{fijos}}{P + C_{variable}} \quad (23)$$

Donde:

Q: Cantidad de equilibrio (unidades o kilogramos que deben producirse y venderse).

C_{fijos} : Costos fijos anuales que no dependen del volumen de producción (ej. seguros, arriendos, depreciación).

P: Precio de venta unitario del carbón activado.

C_{variable} : Costo variable por unidad producida (costos que varían directamente con la producción, como la materia prima).

Para concluir, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de variables críticas como el precio de venta, los costos operativos y la capacidad de producción sobre la rentabilidad del proyecto. Esta metodología permitió identificar que, si bien el proceso a escala piloto presenta limitaciones económicas, la implementación de estrategias de optimización y el escalamiento de la producción mejoran significativamente la rentabilidad, evidenciando el potencial del aprovechamiento de residuos agroindustriales dentro de un enfoque de economía circular.

5 Resultados

En el presente capítulo se exponen los datos experimentales y analíticos obtenidos tras la ejecución de las fases metodológicas del proyecto. En primer lugar, se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de la semilla de aguacate criollo, seguidos por los parámetros de rendimiento del proceso de pirólisis y activación química. Posteriormente, se detallan las propiedades texturales del material y su desempeño en la adsorción mediante el índice de azul de metileno. Finalmente, se consolida la información a través del análisis técnico-económico para determinar la viabilidad de la producción.

5.1 Caracterización de la materia prima

Como punto de partida para la obtención del carbón activado, se evaluó la composición inicial de la biomasa precursora mediante un análisis próximo. En la Tabla 1 se resumen los valores promedio calculados para el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la semilla de aguacate criollo, obtenidos a partir de los ensayos realizados por triplicado.

Tabla 14

Análisis próximo de la semilla de aguacate criollo

Pruebas	Base húmeda		Base seca	
	Humedad	Volátiles	Ceniza	Carbono fijo
PRUEBA 1	71.43	78.09	3.89	18.02
PRUEBA 2	71.50	77.79	3.92	18.28
PRUEBA 3	71.43	77.58	3.90	18.52
Promedio	71.45 ± 0.040	77.82 ± 0.25	3.9 ± 0.015	18.27 ± 0.25

Al comparar los resultados del análisis próximo de la semilla de aguacate criollo con la literatura reportada para otras biomásas de origen agroindustrial, se determina que el material presenta características químicas y estructurales idóneas para la síntesis de carbón activado.

En primer lugar, el contenido de cenizas del 3.90% representa el atributo más favorable del precursor. La literatura establece que, para la obtención de carbones activados con alta capacidad de adsorción, es fundamental que el material de partida posea un contenido de cenizas inferior al 5% (Delgadillo, 2011). Los valores bajos de material inorgánico son cruciales, ya que minimizan la formación de residuos que puedan obstruir el desarrollo de los microporos durante la activación térmica o química. Este valor que se muestra en la tabla 14 (3.90%), asegura una matriz carbonosa más limpia y es consistente con los rangos óptimos (1% - 5%) reportados para biomásas de alta eficiencia comercial, como los residuos de palma africana (Arias & Franco, 2016) y el bagazo de caña de azúcar (Ramírez, 2013).

Por otro lado, el contenido de material volátil (77.82%) se encuentra dentro del rango esperado para residuos biomásicos de origen frutal, los cuales suelen oscilar entre un 70% y un 85% (comparable, por ejemplo, al 81.33% reportado para las semillas de níspero por (Delgadillo, 2011). Si bien este alto porcentaje implica que el rendimiento másico final del carbón será relativamente bajo tras la pirólisis (debido a la gran liberación de gases), esta volatilización es un proceso indispensable. La salida de estos compuestos orgánicos durante la carbonización facilita la creación de la estructura macroporosa inicial, preparándola para el ensanchamiento de los poros en la posterior etapa de activación.

El carbono fijo (18.27%) resulta ser un valor competitivo y superior al reportado para otros precursores comunes, como el bagazo de caña (12.3%) o la madera de palma (9.63%). Este

componente representa la fracción sólida combustible que formará el esqueleto estructural y la superficie específica del carbón activado una vez eliminados los compuestos volátiles.

Finalmente, el alto contenido de humedad (71.45%), característico de las semillas de frutos frescos, confirma la necesidad técnica indispensable de someter la biomasa a una etapa de secado (deshidratación) previo a los procesos térmicos. Esto con el fin de optimizar el consumo energético en los hornos de carbonización y evitar alteraciones o fracturas indeseadas en la estructura física del material.

5.2 Rendimiento del proceso de obtención del carbón activado

El proceso de obtención se evaluó en términos de rendimiento másico para sus dos etapas térmicas principales. En la Tabla 15 se presentan los resultados de la carbonización de la semilla de aguacate criollo, realizada en atmósfera de nitrógeno a 400 °C. A partir de muestras iniciales de biomasa que oscilaron entre 10 y 15 g, se obtuvo un rendimiento promedio de char del 34.75%. Esta pérdida de masa inicial corresponde a la degradación térmica y volatilización de compuestos orgánicos esperada en el proceso de pirólisis.

Al contrastar este valor con otros autores (Ramírez, 2013), el rendimiento de char del 34.75% resulta ser un valor bueno y operativamente favorable. Por ejemplo, en los procesos de carbonización de biomásas, como el bagazo de caña de azúcar, se reportan rendimientos de biochar promedio de un 26.08%. En este contexto, el desempeño de la semilla de aguacate criollo es positivo. Demuestra poseer una estructura lignocelulósica más estable que retiene una mayor fracción de carbono sólido tras la degradación térmica inicial. Esto garantiza una excelente base estructural (char) para la posterior etapa de activación y favorece la viabilidad técnica del proceso, ya que minimiza el desperdicio de masa y optimiza la cantidad de precursor fresco requerido para la producción.

Tabla 15***Rendimiento del proceso de carbonización***

Prueba	Masa inicial de biomasa (g)	Masa de char obtenido (g)	Rendimiento Ychar (%)
1	10.05	3.49	34.70
2	10.26	3.51	34.21
3	11.85	4.31	35.02
4	15.16	5.45	35.92
5	15.11	5.12	33.89
Promedio	12.49 ± 2.52	4.38 ± 0.90	34.75 ± 0.79

Posteriormente, se evaluó la etapa de activación química. Tras impregnar el char con ácido fosfórico y someterlo a un nuevo tratamiento térmico a 400 °C, se procesaron cuatro réplicas de 5.00 g de material impregnado. Finalizados los procesos de lavado y neutralización para remover el agente activante, se obtuvo una masa final promedio de 3.93 g, lo que representa un rendimiento de activación del **78.59%**. Este valor indica la alta proporción de masa que se conservó tras el desarrollo de la estructura porosa.

Tabla 16***Rendimiento del proceso de activación del carbón***

Prueba	Masa impregnada ingresada (g)	Masa de carbón activado obtenida (g)	Rendimiento de activación (%)
1	5	3.91	78.28
2	5	3.9	77.9
3	5	3.93	78.52
4	5	3.98	79.64
Promedio	5	3.93±0.036	78.59 ± 0.75

5.2.1 Rendimiento global del proceso

A partir de las eficiencias individuales obtenidas en las etapas térmicas, se procedió a calcular el rendimiento global (Rs) del proceso productivo con respecto a la biomasa seca inicial. Tomando en consideración que el rendimiento de pirólisis promedió un 35.36% y la activación química conservó un 78.59% de la masa tratada, la eficiencia másica total del sistema se determinó a través del producto de ambas etapas, obteniendo un rendimiento global del 27.79%.

Comparando este resultado con otros autores que utilizaron una metodología similar, se evidencia que el 27.79% es un valor óptimo para procesos de síntesis en dos etapas. Por ejemplo, en la producción de carbones activados empleando ácido fosfórico sobre otros precursores frutales, como la semilla de níspero, se reportan rendimientos que oscilan apenas entre el 20.8% y el 25.3% (Delgadillo, 2011). Por su parte, biomásas lignocelulósicas de amplio uso, como el bagazo de caña, a menudo presentan eficiencias globales aún menores al ser sometidas a dos tratamientos térmicos consecutivos, debido a la gasificación agresiva del material. En este sentido, la capacidad de la semilla de aguacate criollo para retener casi el 28% de su masa seca original confirma la notable estabilidad de su matriz carbonosa.

Tabla 17

Rendimiento global del proceso de obtención

Rendimiento de carbonización (%)	Rendimiento de activación (%)	Rendimiento global (%)
35.36	78.59	27.79

5.3 Desempeño del carbón activado en la adsorción de contaminantes

Para evaluar la capacidad de adsorción del material sintetizado, se empleó el índice de azul de metileno como contaminante modelo. Los ensayos se realizaron comparando el precursor sin

activar, el carbón activado obtenido de la semilla de aguacate criollo. La evolución de la concentración residual del colorante se monitoreó en intervalos de 30 minutos para analizar la cinética del proceso hasta alcanzar el equilibrio de adsorción.

5.3.1 *Cinética de adsorción y porcentaje de remoción*

En la Tabla 18 se presenta el porcentaje de remoción promedio alcanzado por el carbón activado en comparación con el precursor sin activar a lo largo del tiempo de contacto.

Tabla 18

Remoción promedio obtenida para el carbón activado y no activado

Tiempo (horas)	Remoción Precursor sin activar (%)	Remoción Carbón Activado (%)
0.00	0.00	0.00
0.50	8.46	96.49
1.00	12.74	95.91
1.50	16.61	96.44
2.00	21.01	96.45
2.50	25.06	96.47
3.00	28.39	96.46

Como se evidencia en la tabla 18, el proceso de activación química generó un impacto drástico en la capacidad adsorptiva del material. El carbón activado exhibió una cinética de adsorción altamente favorable, logrando remover más del 96% del contaminante en los primeros 30 minutos de contacto, y manteniendo esta remoción a lo largo del ensayo. En contraste, el precursor sin activar presentó una cinética lenta y una capacidad de retención deficiente, alcanzando apenas un 28.39% de remoción tras horas de tratamiento.

Al comparar este desempeño con otros autores, el tiempo de 30 minutos para alcanzar un 96% de remoción resulta ser excepcionalmente rápido. Mientras que este material logra una saturación casi inmediata, otros estudios empleando biomásas agroindustriales requieren tiempos

de contacto prolongados para alcanzar el equilibrio. Como es reportado por (Delgadillo, 2011), menciona que el carbón activado sintetizado a partir de semillas de níspero requirió 6 horas de contacto para estabilizarse, alcanzando tan solo un 60% de adsorción durante la primera hora. De igual manera, biomásas de amplio uso industrial como el bagazo de caña de azúcar (Ramírez, 2013) y los residuos de palma africana (Arias & Franco, 2016) han requerido tiempos de residencia de típicamente 24 horas en sus metodologías estandarizadas para lograr remociones superiores al 90%. Esta notable velocidad de reacción en el material sintetizado sugiere el desarrollo de una red porosa altamente accesible que minimiza la resistencia a la transferencia de masa, representando una gran ventaja operativa al permitir reducir los tiempos de tratamiento frente a otros adsorbentes convencionales.

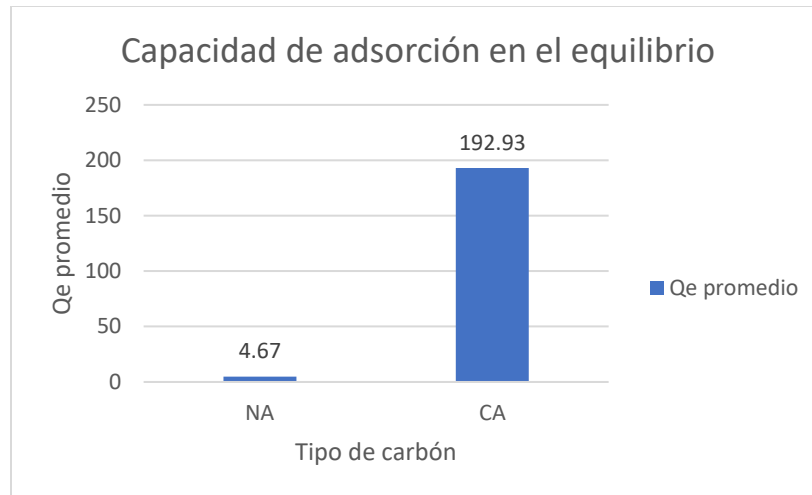
5.3.2 Capacidad máxima de adsorción (Índice de Azul de Metileno)

A partir de los datos de equilibrio alcanzados en la prueba de cinética, se calculó la capacidad máxima de adsorción (q_e). El cálculo se realizó considerando un volumen de solución de 0.04 L y una dosis de material adsorbente de 0.02 g, partiendo de una concentración inicial estandarizada de 100 mg/L.

Tabla 19

Capacidad de adsorción

Material Adsorbente	Remoción máxima alcanzada (%)	Capacidad de adsorción (q_e) (mg/g)
Precursor (Carbón de Semilla cruda)	28.39	4.672
Carbón Activado (Sintetizado)	96.47	192.93

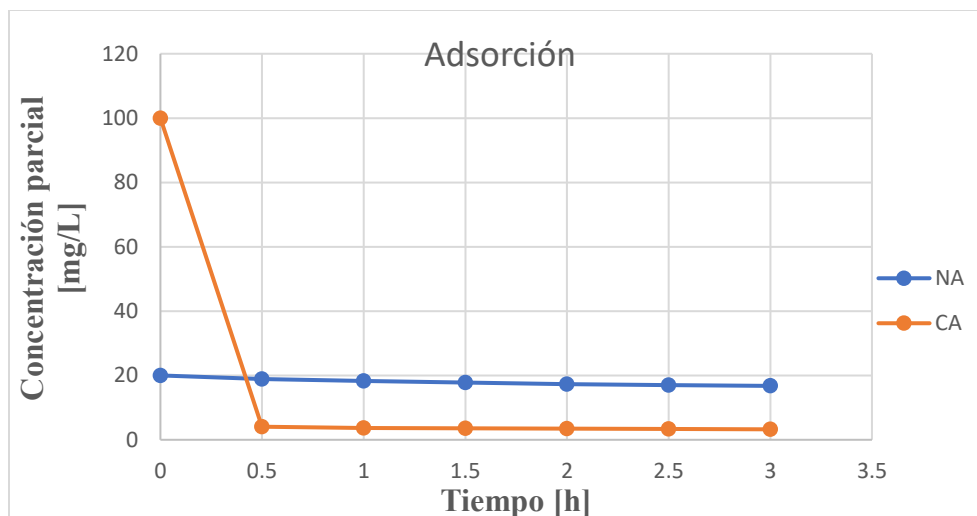
Figura 10*Capacidad de adsorción*

Los resultados demuestran que el precursor natural posee una capacidad de adsorción base de 4.672 mg/g. Sin embargo, tras el proceso de activación química con ácido fosfórico, la capacidad de adsorción del carbón activado sintetizado se incrementó drásticamente hasta alcanzar los 192.93 mg/g. Este valor es consistente con la literatura reportada para otros precursores agroindustriales; por ejemplo, supera la capacidad máxima de adsorción de precursores frutales como la semilla de níspero (188.6 mg/g, (Delgadillo, 2011)) e iguala prácticamente la retención lograda por biomásas de amplio uso industrial como el bagazo de caña de azúcar (193.0 mg/g, (Ramírez, 2013)). Este alto índice de azul de metileno confirma la presencia de una estructura altamente porosa (predominantemente mesoporosa y microporosa), idónea para la retención de moléculas de tamaño considerable en el tratamiento de aguas.

5.3.3 Disminución de la concentración parcial en el tiempo

Gráfica 1

Representación de la concentración parcial en el tiempo



La gráfica anterior detalla el comportamiento cinético de la adsorción del colorante Azul de Metileno en solución acuosa. El objetivo de esta prueba fue comparar la capacidad de remoción del precursor sin activar (NA) frente al carbón activado sintetizado (CA) a lo largo del tiempo.

En la figura, el eje horizontal representa el tiempo de contacto en horas (h), mientras que el eje vertical cuantifica la concentración parcial del colorante residual en el agua, medida en miligramos por litro (mg/L).

Al observar el comportamiento de las curvas, se evidencia una diferencia contundente en el desempeño de ambos materiales:

Comportamiento del Carbón Activado (CA - Línea naranja): El material sintetizado exhibe una cinética de adsorción sumamente rápida y eficiente. Partiendo de una concentración inicial severa de 100 mg/L, el CA logra reducir drásticamente la presencia del colorante en los primeros 30 minutos (0.5 h). A partir de ese punto, la curva se vuelve asintótica, lo que indica que el sistema

alcanzó el equilibrio casi de inmediato y mantuvo la concentración del contaminante en niveles mínimos durante el resto de la prueba (3 horas).

Comportamiento del Precursor No Activado (NA - Línea azul): En contraste, el material crudo (partiendo de una concentración inicial mucho menor, de 20 mg/L) muestra una capacidad de retención casi nula. Su línea se mantiene prácticamente horizontal, disminuyendo de forma muy leve y gradual, lo que demuestra que el material sin tratar no cuenta con la porosidad necesaria para retener el colorante.

5.4 Análisis Técnico-Económico

Para determinar la viabilidad de la producción de carbón activado a partir de la semilla de aguacate criollo, se estructuró un análisis técnico-económico proyectado a la obtención del costo por kg de producto final. Este análisis contempla los gastos de inversión (CAPEX) y la estimación de los costos operativos directos (OPEX) asociados a la producción y la cotización de los equipos bajo el contexto industrial colombiano. Para el alcance del presente análisis, se simulará una planta piloto de producción de carbón activado teniendo en cuenta los distintos costos de los equipos, operación, mano de obra, y los rendimientos posibles a obtener, para poder evaluar si es rentable dicha producción.

5.4.1 Descripción del proceso de activación

Para el proceso de producción de carbón activado a partir de semilla de aguacate criollo, se considera un procesamiento de 15 ton/día de materia prima (debido al rendimiento global del proceso hallado anteriormente) en un molino de martillos para poder llevarlo a un tamaño de partícula adecuado. Posteriormente es llevada a través de bandas transportadoras hacia un secador rotatorio para reducir el contenido de humedad presente.

Este material seco y molido, es sometido a pirólisis en un reactor en atmósfera inerte, a temperaturas de aproximadamente 400°C, para obtener el material carbonizado (char) que será impregnado con ácido fosfórico (H_3PO_4) en un tanque agitador, usando una relación de impregnación 2:1 donde se dejará en contacto durante 2 horas para garantizar una adecuada penetración del agente activante.

Seguidamente, el carbón impregnado es nuevamente introducido en un reactor para su activación térmica a temperaturas de aproximadamente 400°C, donde se desarrolla la estructura porosa del carbón activado. Después de la activación, se lleva el carbón a lavar debido a que aún contiene exceso de ácido fosfórico, este lavado se realiza a una relación de agua de 20 litros por kilogramo de carbón y se efectúa en un tanque de agitación donde hay agua a alta temperatura, buscando con el lavado que el agua residual tenga un ph cercano a 5. Luego el agua con residuos de ácido es transportada a un evaporador, lo que permitirá parte de la recirculación del ácido fosfórico.

Eventualmente el carbón activado y lavado se lleva nuevamente a un horno para su secado a 105°C y finalmente es tamizado para obtener el producto final y ser transportado al lugar de almacenamiento y embalaje.

Figura 11

Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado, que ilustra las fases principales desde la adecuación de la materia prima hasta las etapas de pirólisis y reactivación.



Nota. Adaptado de diagrama del proceso de producción [Fotografía], por Gemini (gemini.google.com)

5.4.2 Estructura de Costos e Inversión

En la Tabla 20 se detalla la composición de la inversión inicial necesaria para la puesta en marcha del proyecto, la cual asciende a \$ 3,448,251,627.71 COP. Este valor integra el costo de adquisición de equipos, la instalación (aplicando factores de ingeniería para obras civiles y tuberías) y el capital de trabajo necesario para la operación.

Tabla 20***Resumen costos de producción***

Costos de producción	Valor
Compra de equipos	\$ 510,927,786.00
Total costos directos	\$ 1,374,395,744.34
Total costos indirectos	\$ 653,987,566.08
Total inversión al capital	\$ 3,448,251,627.71
Costo anual de operación	\$ 6,178,612,693.15
Costo de producción por kilo de carbón	\$ 17,877.93

Para obtener más información sobre la estructura de costos que se tuvieron en cuenta para esta tabla, remítase al Apéndice D.

Para obtener más información sobre los cálculos de consumo de cada equipo y costo de consumo, remítase al Apéndice C.

5.4.3 Análisis de Escenarios y Rentabilidad

A partir del costo de producción unitario identificado (\$ 17,877.93 /kg), se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el Límite de Viabilidad Financiera. En la Tabla 21 se contrastan el punto de equilibrio operativo frente al escenario donde el proyecto comienza a generar un retorno real sobre la inversión, considerando una tasa de descuento del 12% y el pago de impuestos de renta del 35%.

Tabla 21***Rentabilidad proceso por VAN, TIR y ROI***

Escenario	Precio de Venta (COP/kg)	Ingresos Anuales (COP)	VAN a 10 años (12%) (COP)	TIR (%)	ROI Total (10 años)*
Punto de Equilibrio	\$ 17,878	\$ 6,178,636,800	-\$ 3,448,119,915	Negativa	-100.00%
Precio de Mercado	\$ 20,000	\$ 6,912,000,000	-\$ 72,892,945	11.45%	73.24%
Escenario de Viabilidad	\$ 21,000	\$ 7,257,600,000	\$ 1,196,401,481	20.08%	138.39%
Escenario Ideal	\$ 22,000	\$ 7,603,200,000	\$ 2,465,667,630	27.68%	203.54%

Como se evidencia en los resultados obtenidos, existe una sensibilidad crítica del proyecto frente al precio de venta. Si bien el Punto de Equilibrio Operativo se alcanza a los \$17,878/kg, este no garantiza la recuperación de la inversión en el tiempo estimado, reflejando un Retorno de Inversión (ROI) del -100% al finalizar la década. La viabilidad financiera real se manifiesta a partir del Escenario de Viabilidad (\$21,000/kg), donde el VAN se torna positivo, la TIR (18,78%) supera la tasa de descuento del 12%, y se proyecta un ROI a 10 años del 141.60%, asegurando la rentabilidad del proceso de producción frente a las exigencias del mercado.

Al contrastar los escenarios propuestos con las condiciones actuales del mercado nacional, se observa una ventaja competitiva significativa. Tomando como referencia la cotización de carbón activado en polvo de la empresa Disproquímica S.A.S., cuyo valor comercial se sitúa en los \$22,000/kg, se evidencia que el proyecto alcanza su Escenario Ideal precisamente al alinearse con este precio de mercado.

Bajo estas condiciones de paridad de precios, el proceso de producción no solo es técnicamente factible, sino financieramente robusto, alcanzando una TIR del 28.60%, un VAN superior a los \$3,212 millones y un excepcional ROI del 241.83%. Esto indica que, incluso ofreciendo el producto al mismo costo que un distribuidor consolidado, el proyecto genera un retorno altamente atractivo sobre el capital inicial invertido. Esto valida la eficiencia del costo de producción unitario identificado (\$17,877.93 /kg) y otorga holgura financiera. Esta diferencia permite que el proyecto mantenga su viabilidad incluso si fuera necesario ajustar el precio a la baja para competir con distribuidores establecidos, asegurando que la rentabilidad no se vea comprometida ante fluctuaciones del mercado nacional.

El costo de producción actual se estimó en \$17,877.93 COP/kg, un valor superior a los \$5,865 COP/kg proyectados por (Arias & Franco, 2016). Sin embargo, esta diferencia responde directamente a la inflación acumulada durante la última década, la cual ha encarecido de forma ineludible la maquinaria, los insumos químicos, la energía eléctrica y la mano de obra. A pesar de este aumento en los costos operativos contemporáneos, el proyecto sigue siendo altamente lucrativo.

6 Conclusiones

Se logró la obtención exitosa de carbón activado a partir de la semilla de aguacate criollo mediante activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4). El protocolo térmico a $400^\circ C$ y la relación de impregnación 2:1 permitieron transformar un residuo agroindustrial en un material adsorbente funcional, demostrando que la semilla de aguacate es un precursor viable para la producción de materiales carbonosos.

El balance de materia determinó que el proceso posee un rendimiento global del 27.79% en base seca. Este resultado es el producto de una etapa de carbonización con un rendimiento del 35.36% y una etapa de activación química que conserva el 78.59% de la masa tratada.

La evaluación mediante el índice de azul de metileno confirmó una mejora drástica en la capacidad de remoción, pasando de 4.672 mg/g en el precursor natural a 192.93 mg/g en el carbón activado. El material sintetizado alcanzó una remoción del 96% del contaminante en solo 30 minutos, demostrando una estructura porosa (microporosa y mesoporosa) altamente eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas.

El análisis técnico-económico demostró que la producción de carbón activado a partir de semilla de aguacate criollo es viable, al contar con equipos adecuados, un proceso definido y rendimientos que permiten obtener un buen material adsorbente; aunque la inversión inicial y los costos operativos son altos, los indicadores como VAN, TIR y ROI muestran que puede ser rentable al escalar y optimizar la producción, con un costo de \$17,877.93 por kilo y un precio de venta cercano a \$21,000 que lo mantiene competitivo en el mercado.

7 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un barrido de temperaturas de activación (entre 400 °C y 600 °C) con el fin de identificar la condición óptima que maximice el área superficial del material sin afectar negativamente el rendimiento másico del proceso.
- Se recomienda evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado frente a contaminantes de menor tamaño molecular, como fenoles o metales pesados, con el propósito de complementar su caracterización mediante parámetros como el número de yodo y ampliar su potencial de aplicación.
- Se recomienda caracterizar la fracción líquida obtenida durante la pirólisis de la semilla de aguacate, con el fin de determinar su posible aprovechamiento como biocombustible o como fuente de compuestos químicos de valor agregado, en el marco de un enfoque de economía circular.
- Se recomienda profundizar en el análisis técnico-económico mediante la evaluación de escenarios a mayor escala de producción, con el objetivo de identificar economías de escala que permitan reducir el costo de producción por kilogramo y mejorar la viabilidad financiera del proyecto.

Referencias Bibliográficas

Acosta M. (2011). *EVALUACIÓN Y ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE AGUACATE UTILIZANDO TRATAMIENTO ENZIMÁTICO* MARTHA CECILIA ACOSTA MORENO UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL BOGOTÁ, COLOMBIA 2011.

Álvarez, M. Á., Carrasco, F., & Maldonado, J. (2014). *Desarrollo y aplicaciones de materiales avanzados de carbón*. <http://hdl.handle.net/10334/3621>

Arias, L. N., & Franco, E. (2016). *CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE RECOLECCIÓN DE LA PALMA AFRICANA: PLANTEAMIENTO DEL PROCESO Y ESTIMACIÓN DEL COSTO DE PRODUCCIÓN*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/34349>

Baca Urbina, Gabriel. (2013). *Evaluación de proyectos*. McGraw-Hill Interamericana.

Carbotecnia. (2023, February 7). *¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción?*

[https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/#:~:Text=La%20adsorci%C3%B3n%20es%20un%20fen%C3%B3meno,Lo%20que%20lo%20hace%20reversible.)

[Entre-Absorcion-y-](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/#:~:Text=La%20adsorci%C3%B3n%20es%20un%20fen%C3%B3meno,Lo%20que%20lo%20hace%20reversible.)

[Adsorcion/#:~:Text=La%20adsorci%C3%B3n%20es%20un%20fen%C3%B3meno](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/#:~:Text=La%20adsorci%C3%B3n%20es%20un%20fen%C3%B3meno,Lo%20que%20lo%20hace%20reversible.)

[,Lo%20que%20lo%20hace%20reversible.](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/#:~:Text=La%20adsorci%C3%B3n%20es%20un%20fen%C3%B3meno,Lo%20que%20lo%20hace%20reversible.)

Chel-Guerrero, L., Barbosa-Martín, E., Martínez-Antonio, A., González-Mondragón, E., & Betancur-Ancona, D. (2016). Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.052>

Contreras, J., Hoyos-Arbeláez, J., & Gómez, F. (2022). *Valorización de residuos de aguacate*. <https://www.researchgate.net/publication/360474615>

Delgadillo, G. (2011). *PREPARACIÓN - CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE PEPAS DE NÍSPERO DE PALO (Mespilus communi) Y SU APLICACIÓN COMO MATERIAL ADSORBENTE DE FENOL*.

Demirbas, A. (2009). Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 31(12), 1028–1037. <https://doi.org/10.1080/15567030801909383>

Gonzales D. (2017). *DESARROLLO DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES CON APLICACIÓN EN ADSORCIÓN DE ARSÉNICO MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL QUÍMICA E INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA*.

González, B. D. (2017). *DESARROLLO DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES CON APLICACIÓN EN ADSORCIÓN DE ARSÉNICO.*

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147405>

Martínez, M. C. (2012). *PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVO A PARTIR DE LIGNINA PARA SU APLICACIÓN EN PROCESOS DE DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS.* <http://hdl.handle.net/10486/12833>

Medina González, K. D., & Manrique-Abril, R. A. (2018). *REVISTA NACIONAL DE INGENIERIA Use of activated coal for water treatment. Review and case studies.*

<https://agenf.org/ojs/index.php/RNI/article/view/269>

Onyedikachi, U. B., Nkwocha, C. C., Ejiofor, E., & Nnanna, C. C. (2024). Investigation of chemical constituents, antioxidant, anti-inflammatory and nutritional properties of oil of *Persea americana* (Avocado) seeds. *Food Chemistry Advances*, 5.

<https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100770>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers.*

Ramírez, O. I. (2013). *PRODUCCIÓN DE CARBONES ACTIVADOS POR ACTIVACIÓN QUÍMICA CON H₃PO₄ A PARTIR DE CARBÓN PIROLÍTICO DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.*

- Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C., & Colina-Andrade, G. de J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(4), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.005>
- Tubert, I., & Talanquer, V. (2018). Sobre adsorción. *Educación Química*, 8(4), 186. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1997.4.66595>
- Universidad de Sevilla, E. P. S. (n.d.). *MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO*. Retrieved www.aguapedia.net
- Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B., & Dewil, R. (2010). Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable Energy*, 35(1), 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.019>
- White, R. J., Budarin, V., Luque, R., Clark, J. H., & Macquarrie, D. J. (2009). Tuneable porous carbonaceous materials from renewable resources. *Chemical Society Reviews*, 38(12), 3401–3418. <https://doi.org/10.1039/b822668g>
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 46, pp. 218–235). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>

Apéndices

Apéndice A. Curva de calibración y datos experimentales de cinética de adsorción

Este apéndice presenta los datos experimentales obtenidos durante las pruebas de cinética de adsorción utilizando azul de metileno como contaminante modelo. Se evaluó y comparó el desempeño a lo largo del tiempo del material precursor crudo frente al carbón activado sintetizado, también se calculó el índice de azul de metileno de cada medición. Para garantizar la confiabilidad y repetibilidad de los resultados, los ensayos se realizaron por triplicado, tomando lecturas de concentración en intervalos regulares de 30 minutos hasta alcanzar las 3 horas de contacto, como se demuestra en la tabla 22.

Tabla 22

Datos prueba índice de azul de metileno

Prueba	Carbón activo	Concentración inicial	Concentración parcial	%	qe
1	NA	20	20	0	0
2	NA	20	20	0	0
3	NA	20	20	0	0
4	CA	100	100	0	0
5	CA	100	100	0	0
6	CA	100	100	0	0
1	NA	20	18.309	8.455	3.382
2	NA	20	18.828	5.86	2.344
3	NA	20	19.493	2.535	1.014
4	CA	100	2.878	97.122	194.244
5	CA	100	5.017	94.983	189.966
6	CA	100	2.648	97.352	194.704
1	NA	20	17.452	12.74	5.096
2	NA	20	18.461	7.695	3.078
3	NA	20	18.931	5.345	2.138
4	CA	100	3.095	96.905	193.81
5	CA	100	6.158	93.842	187.684
6	CA	100	3.017	96.983	193.966

1	NA	20	16.678	16.61	6.644
2	NA	20	18.302	8.49	3.396
3	NA	20	18.271	8.645	3.458
4	CA	100	2.942	97.058	194.116
5	CA	100	4.591	95.409	190.818
6	CA	100	3.143	96.857	193.714
1	NA	20	15.798	21.01	8.404
2	NA	20	18.145	9.275	3.71
3	NA	20	18.070	9.65	3.86
4	CA	100	2.868	97.132	194.264
5	CA	100	4.432	95.568	191.136
6	CA	100	3.016	96.984	193.968
1	NA	20	14.988	25.06	10.024
2	NA	20	17.911	10.445	4.178
3	NA	20	18.071	9.645	3.858
4	CA	100	2.762	97.238	194.476
5	CA	100	4.356	95.644	191.288
6	CA	100	2.943	97.057	194.114
1	NA	20	14.323	28.385	11.354
2	NA	20	17.808	10.96	4.384
3	NA	20	18.108	9.46	3.784
4	CA	100	2.671	97.329	194.658
5	CA	100	4.241	95.759	191.518
6	CA	100	2.817	97.183	194.366

La gráfica 2 ilustra la curva de calibración construida para determinar la concentración del colorante Azul de Metileno en solución acuosa. En el eje horizontal (abscisas) se representa la concentración conocida del contaminante en miligramos por litro (mg/L), mientras que en el eje vertical (ordenadas) se grafica la absorbancia medida para cada patrón.

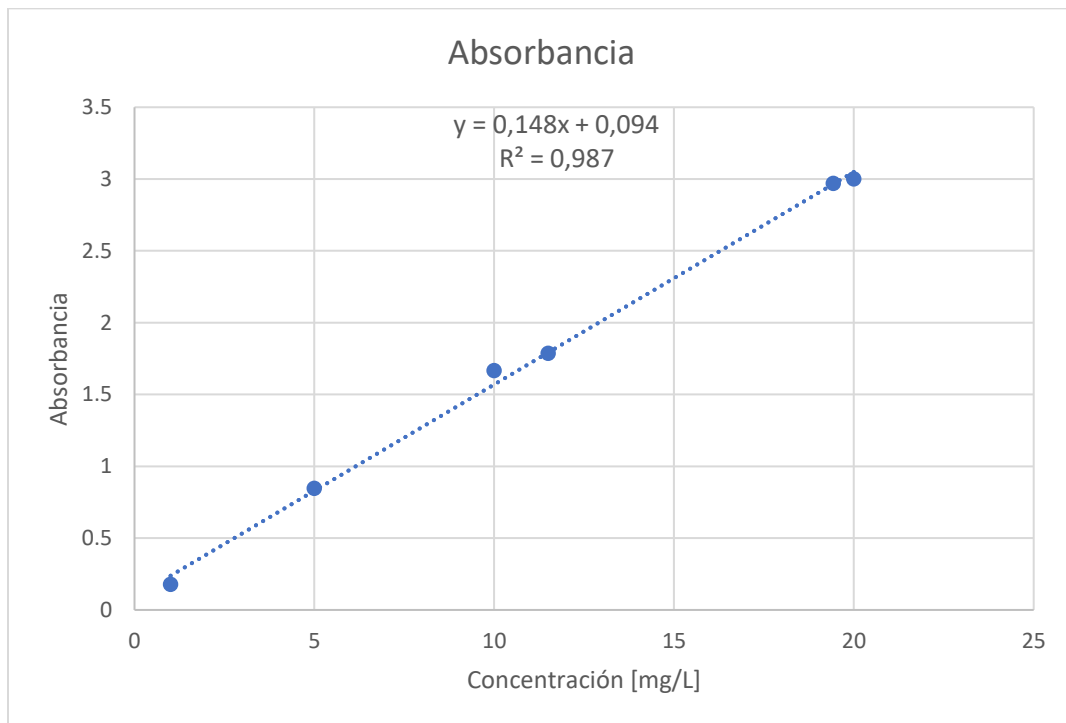
Como se evidencia en la dispersión de los datos, existe una fuerte correlación lineal positiva entre la concentración del colorante y la luz absorbida por la muestra, cumpliendo con la Ley de Beer-Lambert.

El modelo presenta un coeficiente de determinación (R^2) de 0.987. Este valor, muy cercano a la unidad, demuestra un alto grado de linealidad, indicando que el 98.7% de la variabilidad en la

absorbancia es explicada por la concentración del colorante. En consecuencia, se confirma que la curva es estadísticamente confiable y válida para interpolar de manera precisa las concentraciones residuales de Azul de Metileno durante los ensayos de cinética de adsorción.

Gráfica 2

Curva de calibración del espectrofotómetro



Apéndice B. Dimensionamiento de la planta y balance global de materia

Para el dimensionamiento de la planta con una capacidad nominal de 1200 Kg/día de carbón activado, se emplean los rendimientos experimentales obtenidos en el estudio de la semilla de aguacate criollo.

La masa de material carbonizado (m_{char}) que debe ingresar a la etapa de activación se calcula dividiendo la producción final entre el rendimiento de dicha etapa:

$$m_{char} = \frac{m_{activado}}{R_a}$$

Cálculo:

$$m_{char} = \frac{1200 \text{ Kg/dia}}{0.7859} = 1526.91 \text{ Kg/dia}$$

Para obtener la cantidad de char calculada anteriormente, se debe determinar cuánta semilla de aguacate en base seca (m_{bs}) debe procesarse en el horno tubular:

$$m_{bs} = \frac{m_{char}}{R_{char}}$$

$$m_{bs} = \frac{1526.91 \text{ Kg/dia}}{0.3536} = 4318.18 \text{ Kg/dia}$$

Dado que la semilla se recolecta con un alto contenido de agua, se calcula la masa de biomasa fresca (m_{fresca}) requerida antes del secado

$$m_{fresca} = \frac{m_{bs}}{1 - \left(\frac{Hw}{100}\right)}$$

$$m_{fresca} = \frac{4318.18 \text{ Kg/dia}}{1 - (0.7145)} = 15125 \text{ kg/dia}$$

Tabla 23**Balance de masa**

Descripción del Flujo	Valor Calculado (kg/día)
Entrada de Materia Prima	15125
Agua Evaporada (Salida)	10806.8
Biomasa Seca (Intermedio)	4318.2
Gases de Pirólisis (Salida)	2791.3
Char Producido (Intermedio)	1526.9
Impurezas y Lavado (Salida)	326.9
Producto Final	1200

Apéndice C. Balance de masa y consumo energético específico por equipo

Balance de masa para cada equipo con una capacidad de producción de la planta de 1200 Kg/día y una jornada operativa de 12 horas/día.

Parámetros operativos base:

Capacidad de producción (m_{CA}): 1200 kg/día de carbón activado

Jornada de operación: 12 horas/día

Humedad de biomasa (H_w): 71.45%

Rendimiento de carbonización (Y_{char}): 35.36%

Rendimiento de activación (R_a): 78.59%

Masa de biomasa fresca (m_{fresca}): 15125 kg/día

Masa de biomasa seca (m_{bs}): 4318.18 kg/día

Masa de material carbonizado (m_{char}): 1526.91 kg/día

Balance de masa y energía por equipo

Calor específico del agua ($C_{p,agua}$): 4.18 kJ/kg

Calor latente de vaporización (λ_{vap}): 2260 kJ/kg

Calor específico de la biomasa/char ($C_{p,bs}$): 1.5 kJ/kg

Entalpía de reacción ($h_{reacción}$): 340 J/g = 340 kJ/kg

Temperatura ambiente (T_{amb}): 25°C

Factor de conversión: 1 kWh = 3600 kJ

Tolva**Balance de masa:****Entrada: 15,125 kg/día****Salida: 15,125 kg/día****Consumo energético: 0 kWh/día (Descarga por gravedad)****Banda transportadora de semilla fresca**

- *Balance de masa:*
- *Entrada al molino: 1,260.4 kg/h*
- *Consumo energético: Por tabla 13.44 kW*

$$E_{\text{eléctrica}} = 13.44 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 161.28 \text{ kWh/día}$$

Molino de martillos

- *Balance de masa:*
- *Entrada: 15,125 kg/día de semilla húmeda*
- *Consumo energético: Por tabla 11 kW*

$$E_{\text{eléctrica}} = 11 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 132 \text{ kWh/día}$$

Secador rotatorio inicial

- *Balance de masa:*
- *Entrada: 15,125 kg/día de semilla húmeda*
- *Agua evaporada (salida): 10,806.8 kg/día (Por pérdida del 71.45% de la humedad)*

- **Biomasa seca (salida): 4,318.2 kg/día**
- **Consumo eléctrico: Motor 7.5 kW**

$$E_{\text{eléctrica}} = 7.5 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 90 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: calor para evaporar la humedad (100°C)

$$E_{\text{térmica}} = \frac{(m_{\text{agua}} * C_{p,\text{agua}} * \Delta T) + (m_{\text{agua}} * \lambda_{\text{vap}}) + (m_{\text{bs}} * C_{p,\text{bs}} * \Delta T)}{3600}$$

$$Q = [10806.8 * 4.18 * (100 - 25)] + [10806.8 * 2260] + [4318.2 * 1.5 * (100 - 25)] = 28,297,096$$

kJ/día

$$E_{\text{térmica}} = \frac{28,297,096}{3600} = 7,860.3 \text{ kWh/día}$$

Horno rotatorio carbonización

Balance de masa:

Entrada: 4,318.2 kg/día de semilla seca

Gases volátiles (salida): 2,791.3 kg/día (Por pérdida del 71.45% de la humedad)

Char producido (salida): 1,526.9 kg/día

Consumo eléctrico: Motor 17.5 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 17.5 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 210 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: calentamiento a 400°C

$$Q_{\text{pirolisis}} = 4,318.2 * 1.5 * (400 - 25) = 2,428,987 \text{ kJ/día}$$

$$Q_{\text{reacción}} = 340 * 4,318.2 = 1,468,188 \text{ kJ/día}$$

$$Q_{\text{total}} = 3,897,175 \text{ kJ/día}$$

$$E_{\text{térmica}} = \frac{3,897,175}{3600} = 1,082.54 \text{ kWh/día}$$

Tanque de impregnación

Balance de masa:

Relación de ácido 2:1

Entrada: 1,526.9 kg de char + 3,053.8 kg de H₃PO₄ = 4,580.7 kg/día totales

Consumo eléctrico: Motor 3 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 3 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 36 \text{ kWh/día}$$

Horno rotatorio activación

Balance de masa:

Entrada: 4,580.7 kg/día de mezcla

Gases de activación: 326.9 kg/día (1,526.9 kg de char – 1,200 kg CA final)

Salida sólida (CA + ácido remanente): 4,253.8 kg/día

Consumo eléctrico: Motor 17.5 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 17.5 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 210 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: calentamiento a 400°C

$$Q_{\text{activación}} = 4,580.7 * 1.5 * (400 - 25) = 2,576,643 \text{ kJ/día}$$

$$Q_{\text{reacción}} = 340 * 4,580.7 = 1,557,438 \text{ kJ/día}$$

$$Q_{\text{total}} = 4,134,081 \text{ kJ/día}$$

$$E_{\text{térmica}} = \frac{4,134,081}{3600} = 1,148.35 \text{ kWh/día}$$

Tanque de lavado

Balance de masa:

Lavado con relación de 20 L/kg de carbón

Entrada: 4,253.8 (sólido) + 24,000 (kg o L) (agua a alta temp) = 28,253.8 kg/día

Salida CA húmedo: 2,400 kg/día

Salida licor de lavado: 25,853.8 kg/día (22,800 kg agua + 3,053.8 kg de ácido)

Consumo eléctrico: Motor 4 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 4 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 48 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: calentamiento de 25°C a 85°C

$$Q_{\text{agua}} = 24,000 * 4.18 * (85 - 25) = 6,019,200 \text{ kJ/día}$$

$$E_{\text{térmica}} = \frac{6,019,200}{3600} = 1,672 \text{ kWh/día}$$

Evaporador

Balance de masa:

Entrada: 28,253.8 kg/día de licor de lavado

Agua evaporada (salida): 22,800 kg/día

Ácido concentrado (salida): 3,053.8 kg/día (recirculado al tanque de H₃PO₄)

Consumo eléctrico: Motor 32.5 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 32.5 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 390 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: evaporar 22,800 kg de agua

$$Q_{\text{evaporación}} = 22,800 * 2,260 = 51,528,000 \text{ kJ/día}$$

$$E_{\text{térmica}} = \frac{51,528,000}{3600} = 14,313.3 \text{ kWh/día}$$

Secador rotatorio carbón activado

Balance de masa:

Entrada: 2400 kg/día de CA húmedo

Salida: 1200 kg/día CA seco

Consumo eléctrico: Motor 3 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 3 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 36 \text{ kWh/día}$$

Consumo térmico: evaporar agua a 105°C

$$Q_{\text{sec_final}} = (1200 * 2260) + (1200 * 1 * 80) = 2,808,000 \text{ kJ/día}$$

$$E_{\text{térmica}} = \frac{2,808,000}{3600} = 780 \text{ kWh/día}$$

Zaranda

Balance de masa:

Entrada: 1,200 kg/día de CA seco

Consumo eléctrico: Motor 11 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 11 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 132 \text{ kWh/día}$$

Banda transportadora de carbón activado

Balance de masa:

Entrada: 1,200 kg/día de CA seco

Consumo eléctrico: Motor 0.37 kW

$$E_{\text{eléctrica}} = 0.37 \text{ kW} * 12 \text{ h} = 4.44 \text{ kWh/día}$$

Sistema de bombeo

Equipos: 3 bombas centrifugas

Potencia total de bombeo: $3 \times 4.10 \text{ Kw} = 12.3 \text{ Kw}$

Consumo eléctrico diario:

$$E_{elec} = 12.3 \text{ kw} * 12 \text{ h} = 147.6 \text{ Kwh/dia}$$

La siguiente tabla (24) detalla el consumo eléctrico de los equipos principales que conforman la planta de producción de carbón activado. En ella se relaciona la maquinaria necesaria para las distintas etapas del proceso —como bandas transportadoras, molinos, secadores, hornos y tanques de agitación—, especificando la cantidad de unidades y su respectiva potencia nominal en kilovatios (kW).

Tabla 24

Consumo energético diario de equipos

Tipo de Equipo	Cantidad	Potencia	Consumo Diario
		Unitaria [kW]	[kWh/día]
Banda transportadora (Semilla fresca)	1	1.12	13.44
Molino de martillos	1	30	360
Secador rotatorio (Materia prima)	1	7.5	90

Horno rotatorio (Carbonización)	1	17.5	210.0
Tanque de impregnación (Agitador)	1	3	36
Horno rotatorio (Activación)	1	17.5	210.0
Tanque de lavado (Agitador)	1	4	48
Bombas centrífugas	3	4.1	147.6
Evaporador	1	32.5	390
Zaranda vibratoria	1	11	132
Secador de carbón activado	1	3	36
Banda transportadora (Carbón activado)	1	0.37	4.44
Total, planta (día)			1,677.48
Total, planta (mes)			40,259.52
Total, planta (año)			483,114.24
Total Scop/año			\$ 427,870,126.66

Para la proyección de los costos operativos presentados, se utilizó como tarifa de referencia el valor del kilovatio-hora (kWh) establecido por la Electrificadora de Santander (ESSA) para la ciudad de Bucaramanga en el mes de marzo de 2026. El costo unitario aplicado para los cálculos económicos fue de \$885.65 COP/kWh. A partir de esta tarifa base y del requerimiento energético consolidado en la tabla 24, se determinó el gasto total proyectado para el funcionamiento de la planta.

Tabla 25**Consumo de energía térmica**

Equipo	Proceso Térmico	Energía Requerida (kJ/día)	Consumo Diario (kWh/día)
Secador Rotatorio Inicial	Evaporación de humedad (10,806.8 kg agua)	28,297,096	7,860.30
Horno de Carbonización	Calentamiento a 400°C (4,318.2 kg biomasa seca)	2,428,987	1082.54
Horno de Activación	Calentamiento a 400°C (4,580.7 kg mezcla)	2,576,643	1148.35
Tanque de Lavado	Calentamiento de agua (24,000 L) de 25°C a 85°C	6,019,200	1,672.00
Evaporador	Evaporación de agua de lavado (22,800 kg)	51,528,000	14,313.30
Secador de Carbón Final	Evaporación de agua residual a 105°C	2,808,000	780
Total, planta diaria		93,657,926	26,856.49
Total, planta mes		2,247,790,224	644,555.76
Total, planta año		26,973,482,688	7,734,669.12
TOTAL \$COP/AÑO			\$ 1,948,733,295.50

Para determinar la cantidad de combustible necesaria para cubrir una demanda de energía térmica de 26,856.49 kJ/día, se ha desarrollado el siguiente análisis técnico.

El volumen de gas natural requerido se obtiene mediante la relación entre la energía útil demandada por el proceso y el contenido energético real del combustible, ajustado por el rendimiento del equipo de combustión. La fórmula aplicada es:

$$V = E_{\text{t\u00e9rmico}} / \text{PCS} * n$$

Donde:

V: Volumen de gas natural en metros c\u00fabicos (m³).

E t\u00e9rmico: Requerimiento energ\u00e9tico de 26,856.49.

PCS (Poder Calor\u00edfico Superior): Cantidad de energ\u00eda liberada por la combust\u00edon completa.

Se utiliza un est\u00e1ndar de 11.26 kWh/m³.

n (Eficiencia t\u00e9rmica): Factor que compensa las p\u00e9rdidas por chimenea y radiaci\u00f3n. Se ha estandarizado un valor del 85% (0.85) para este an\u00e1lisis.

Apéndice D. Estimación de costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX)

La siguiente tabla detalla los costos de adquisición e inversión inicial correspondientes a los equipos principales requeridos para la planta de producción de carbón activado. En la información tabulada se desglosan los valores comerciales de la maquinaria indispensable para el desarrollo de las etapas mecánicas, térmicas y químicas del proceso a escala industrial.

Se relacionan los precios de los componentes clave, incluyendo los sistemas de transporte de materia prima, los equipos de reducción de tamaño, los secadores y hornos rotatorios para las fases de adecuación térmica, así como la infraestructura de tanques y bombas necesaria para el acondicionamiento del material.

La consolidación de estos montos representa la inversión fija en maquinaria y equipos.

Validando con distintas empresas del mundo, específicamente y en su mayoría chinas, se cotizaron los distintos equipos propuestos para la planta por unidad, eso es representado en la tabla 26 por cantidad, el valor unitario de cada uno y el valor total a pagar.

Tabla 26

Costo de equipos

Equipos	Cantidad [Und]	Valor unitario Equipo [\$COP]	Valor total [\$COP]
Tolva de recepción	1	\$ 36,524,743.00	\$ 36,524,743.00
Molino de martillo	1	\$ 6,866,651.00	\$ 6,866,651.00
Tanque de almacenamiento de ácido 10 m3	1	\$ 10,790,086.00	\$10,790,086.00

Tanque de recuperado 1m3	1	\$ 5,105,957.00	\$ 5,105,957.00
Tanque de impregnación 3,5m3	1	\$15,634,817.00	\$ 15,634,817.00
Tanque de almacenamiento CA 100 ton	1	\$ 27,270,030.00	\$ 27,270,030.00
Tanque de lavado CA 2 m3	1	\$ 10,908,012.00	\$ 10,908,012.00
Secador de carbón activado	1	\$ 10,950,000.00	\$ 10,950,000.00
Secador rotatorio de materia prima	1	\$ 91,627,989.00	\$ 91,627,989.00
Horno rotatorio pirolisis	2	\$ 90,900,100.00	\$ 181,800,200.00
Evaporador	1	\$ 27,270,030.00	\$ 27,270,030.00
Zaranda	1	\$ 17,909,571.00	\$ 17,909,571.00
Bomba centrifuga	3	\$ 6,089,900.00	\$ 18,269,700.00
Banda transportadora	2	\$25,000,000.00	\$ 50,000,000.00
Total, costo de equipos			\$ 510,927,786

A partir de la literatura presentada en el libro de Peters (Peters et al., 2003), se encuentra que en la siguiente figura (12) se deben tener en cuenta costos directos e indirectos para el CAPEX, lo que muestra la inversión de capital fijo que se debe realizar para montar la planta y los equipos.

Figura 12*Factores de relación para estimar la inversión de capital***Table 6-9 Ratio factors for estimating capital investment items based on delivered-equipment cost**

Values presented are applicable for major process plant additions to an existing site where the necessary land is available through purchase or present ownership.[†] The values are based on fixed-capital investments ranging from under \$1 million to over \$100 million.

	Percent of delivered-equipment cost for		
	Solid processing plant ^a	Solid-fluid processing plant ^a	Fluid processing plant ^a
Direct costs			
Purchased equipment delivered (including fabricated equipment, process machinery, pumps, and compressors)	100	100	100
Purchased-equipment installation	45	39	47
Instrumentation and controls (installed)	18	26	36
Piping (installed)	16	31	68
Electrical systems (installed)	10	10	11
Buildings (including services)	25	29	18
Yard improvements	15	12	10
Service facilities (installed)	40	55	70
Total direct plant cost	269	302	360
Indirect costs			
Engineering and supervision	33	32	33
Construction expenses	39	34	41
Legal expenses	4	4	4
Contractor's fee	17	19	22
Contingency	35	37	44
Total indirect plant cost	128	126	144
Fixed-capital investment	397	428	504
Working capital (15% of total capital investment)	70	75	89
Total capital investment	467	503	593

Nota. Adaptado de Plant design and Economics for Chemical engineers (p. 251), por Peters, Timmerhaus y West, 2003, McGrawHillEducation

Esta tabla representa en porcentaje lo que hay que añadirles a los costos del CAPEX para tener un buen estimado de lo que se va a pagar. Esto se representa en la tabla 27 donde se ven todos los costos directos e indirectos.

Tabla 27**Costos directos e indirectos de la planta**

Concepto	Planta de procesamiento de sólidos (\$)
Costos Directos	
Equipo comprado entregado (incluye equipo fabricado, maquinaria de proceso, bombas y compresores)	\$ 510,927,786
Instalación de equipo comprado	\$ 229,917,503.70
Instrumentación y controles (instalados)	\$ 91,967,001.48
Tubería (instalada)	\$ 81,748,445.76
Sistemas eléctricos (instalados)	\$ 51,092,778.60
Edificios (incluyendo servicios)	\$ 127,731,946.50
Mejoras de patio (terreno)	\$ 76,639,167.90
Instalaciones de servicio (instaladas)	\$ 204,371,114.40
Costo directo total de la planta	\$ 1,374,395,744
Costos Indirectos	
Ingeniería y supervisión	\$ 168,606,169.38
Gastos de construcción	\$ 199,261,836.54
Gastos legales	\$ 20,437,111.44
Honorarios del contratista	\$ 86,857,723.62
Contingencia	\$ 178,824,725.10
Costo indirecto total de la planta	\$ 653,987,566.08
Inversión de capital fijo	\$ 2,028,383,310

Capital de trabajo (15% de la inversión de capital total)	\$ 1,419,868,317.29
Inversión de capital total	\$ 3,448,251,627.71

En la siguiente tabla (28), se representan los costos de insumos gastados por día, escalados hasta el año, calculado por la cantidad estimada a usar de los mismos.

Tabla 28

Costo de insumos

Fluido	Cantidad Estimada	Costo \$COP/día
Ácido Fosfórico (85%)	3053.82kg	\$ 11,336,890.41
Agua	24000 litros	\$ 108,072.24
Gas Natural	2805.9 m3	\$ 6,766,427.85
Total día		\$ 18,211,390.50
Total, año		\$ 5,244,880,464

El costo del gas natural calculado se tomó a partir de la tarifa para el mes de marzo de 2026 de Vanti donde el costo por metro cúbico fue de \$ 2,411.58, esta cantidad de gas se calculó teniendo en cuenta las necesidades de cada uno de los equipos que requieren de este servicio para su correcto funcionamiento, el costo del agua se tomó de las tarifas para el mes de abril de 2026 de AMB por metro cúbico de \$ 4,503.01 y el ácido fosfórico de una empresa internacional conocida como Mahaco, el kilo salió a un precio de \$ 3,712.36.

Para el costo y estimación del pago por la mano de obra, se basaron los factores estimados por la literatura del Peters (Peters et al., 2003), y se consideró que se trabajará durante los 12 meses del año a 2 turnos por día durante 24 días al mes, el salario mínimo para el 2026 es de \$COP 2,715,548 según datos del Ministerio del Trabajo y Decretos del Gobierno nacional, tomando en cuenta las prestaciones sociales. Estos factores son presentados en la figura 13.

Figura 13

Factores de requisito de trabajadores por equipos

Table 6-13 Typical labor requirements for process equipment[†]

Type of equipment	Workers/unit/shift
Blowers and compressors	0.1–0.2
Centrifugal separator	0.25–0.50
Crystallizer, mechanical	0.16
Dryer, rotary	0.5
Dryer, spray	1.0
Dryer, tray	0.5
Evaporator	0.25
Filter, vacuum	0.125–0.25
Filter, plate and frame	1.0
Filter, rotary and belt	0.1
Heat exchangers	0.1
Process vessels, towers (including auxiliary pumps and exchangers)	0.2–0.5
Reactor, batch	1.0
Reactor, continuous	0.5

[†]For expanded process equipment labor requirements see G. D. Ulrich. *A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics*, J. Wiley, New York, 1984.

Nota. Adaptado de Plant design and Economics for Chemical engineers (p. 264), por Peters, Timmerhaus y West, 2003, McGrawHillEducation

El cálculo de estos factores de requisito se ven representados y calculados en la tabla 29, lo que permitió calcular la cantidad de personal a contratar y el costo mensual de pago a los mismos según la ley.

Tabla 29***Factores y requisitos de mano de obra por equipos***

Equipo	Nequipo	Operadores por turno y equipo	Operadores por turno y equipo Total
Molino de martillos	1	0.6	0.6
Tanque de impregnación	1	0.2	0.2
Horno	2	0.3	0.6
Tanque de lavado	1	0.2	0.2
Evaporador	1	0.2	0.2
Secador	2	0.2	0.4
Zaranda	1	0.03	0.03
Transportadores	2	0.1	0.2
Total			2.43

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 29, la sumatoria de los factores de mano de obra por equipo indica un requerimiento teórico de 2.43 operadores por turno. Dado que en la práctica no es posible fraccionar el personal, este valor se aproxima al entero superior, estableciendo una necesidad operativa de 3 trabajadores por turno para garantizar el correcto funcionamiento, alimentación y supervisión de toda la maquinaria.

Teniendo en cuenta que el esquema de trabajo propuesto para la planta consta de 2 turnos diarios (operando 24 días al mes), se requiere la contratación de una plantilla total de 6 trabajadores. Para la proyección del costo mensual total por empleado, estimado en \$2.715.548 COP, se tomó como base el Salario Mínimo Mensual Legal Vigente (SMMLV) y el auxilio de transporte estipulados para el año 2026 mediante decreto del Gobierno Nacional. Esta estructura salarial comprende un salario básico de \$1.750.905 y un auxilio legal de transporte de \$249.095, conformando un ingreso total devengado de \$2.000.000 por trabajador. Sobre esta base, el cálculo

de la nómina integra la provisión mensual de las prestaciones sociales, que incluyen la prima de servicios (8,33%) y las cesantías (8,33%) liquidadas sobre el total devengado, junto con los intereses sobre las cesantías (1% sobre el valor de las mismas) y las vacaciones (4,17% calculado únicamente sobre el salario básico). Asimismo, se contemplan los aportes patronales obligatorios correspondientes al Sistema General de Pensiones (12%), la Administradora de Riesgos Laborales para un nivel de Riesgo I (0,522%) y el respectivo aporte parafiscal a la Caja de Compensación Familiar (4%). Finalmente, es fundamental precisar que esta estimación se estructuró aplicando el beneficio de exoneración de aportes establecido en el Artículo 114-1 del Estatuto Tributario colombiano; en consecuencia, al proyectar una figura empresarial que cumple con los requisitos legales frente al Gobierno Nacional para trabajadores que devengan menos de diez salarios mínimos, el costo total excluye los pagos correspondientes a Salud (8,5%), SENA (2%) e ICBF (3%). El total de estos aportes, salario, y auxilios se demuestran en el salario en la tabla 30.

Tabla 30**Nómina trabajadores**

# de Trabajadores	Salario Base (COP/mes)	Total Nómina Mensual (COP)	Total Nómina Anual (COP)
6	\$2,715,548	\$ 16,293,288	\$ 195,519,456

En la tabla 31 se demuestra el cálculo del costo total de operación anual debido a gastos por insumos, este costo eventualmente es dividido entre la cantidad total de carbón activado estimado a producir anualmente para obtener el costo de producción de \$17,877.89 mencionado anteriormente en los resultados.

Tabla 31**Costo operación anual**

Insumo	\$COP/Año
Electricidad	\$ 427,870,126.66
Ácido fosfórico	\$ 3,265,024,438.08
Agua	\$ 31,124,805.12
Gas natural	\$ 1,948,731,220.80
Mano de obra	\$ 195,519,456.00
Depreciación	\$ 310,342,646.49
Total de costo de operación anual	\$ 6,178,612,693.15

Apéndice E. Especificaciones técnicas y catálogo de maquinaria industrial

Molino de martillos

Model	Power(kw)	Capacity(kg/h)	Dimension(mm)	Weight(kg)
9FQ360-20	5.5	300-350	900*500*800	260
9FQ400-28	7.5	400-500	1100*550*850	350
9FQ500-28	11	600-800	1250*650*1000	450
9FQ500-40	22	900-1000	1400*780*1250	750
9FQ500-50	30/37	1500-2000	1600*850*1350	900
9FQ500-60	37/45	2000-3000	1750*900*1550	1300



Nota. Tomado de Molino de martillos [fotografía], Made-in-China ([Máquina de molino de maíz para grano de maíz de 300-500 kg/h Máquina de amolador con fabricantes y proveedores de ciclones – Made-in-China.com](#))

Horno rotativo

WD-RD1200	1000-1200kg/hora	7,5+7,5 kw	1,2 m de diámetro, longitud 12 m
-----------	------------------	------------	----------------------------------



Nota. Tomado de horno rotativo de biomasa [fotografía], alibaba ([Horno automático de carbonización de tambor rotatorio continuo de biomasa Horno de carbonización de carbón vegetal - Horno de carbonización de tambor y estufa de carbón](#))

Silo – tolva de recepción

	Model	Volume (M³)	Ring Beam Height (M)	Diameter (M)	Height of Eaves (M)	Total Height	Weight (T)
7.3 series	7.3×7	408	4.57	7.3	12.4	14.26	12.4
	7.3×10	550			15.76	17.62	15
	7.3×13	692			19.12	20.98	18.3



Nota. Tomado de silo-tolva de recepción [fotografía], Made-in-China ([Silo de pienso animal Shelley China](#) [Fábrica de contenedores de grano de 15 toneladas](#) [Silo de trigo para molino de harina](#) [Fábrica de harina utilizada silos de acero](#) - [Silo de harina de grano y silos de grano](#))

Horno de pirólisis

Specification

TYPE	SIZE	PRODUCTON	POWER	GROSS WEIGHT
GX800-10000	φ800*10000mm	1000kg/h	17.5kw	7500kg
GX1200-10000	φ1200*10000mm	2000kg/h	20kw	9200kg
GX1500-10000	φ1500*10000mm	3000kg/h	29kw	13600kg

Continuous carbonization furnace can be customized in size.



Nota. Tomado de horno de pirólisis [fotografía], made in china ([Horno automático de carbonización de tambor rotatorio continuo de biomasa Horno de carbonización de carbón vegetal - Horno de carbonización de tambor y estufa de carbón](#))

Tanque de impregnación

Capacity	Motor power	Weight	Dimension	
A-200A	5000L	7.5KW	3000kg	Φ2200*2250mm
	3000L	5.5KW	2000kg	Φ1900*2150mm
	2000L	3KW	1500kg	Φ1700*2100mm
	1000L	2.2KW	1000kg	Φ1220*1850mm
	500L	1.5KW	600kg	Φ1000*1380mm
	300L	1.5KW	200kg	Φ900*1250mm
	200L	1.1KW	180kg	Φ800*1150mm
	100L	1.1KW	150kg	Φ650*950mm
	50L	0.55KW	50kg	Φ450*750mm



Nota. Tomado de tanque de impregnación [fotografía], made in china ([Depósito de almacenamiento de tanque de mezcla de calentamiento eléctrico de acero inoxidable de 300-5000L con agitador - máquinas de mezclar tanque de chocolate y máquina de fundición de chocolate](#))

Bandas transportadoras

Parámetro / Especificación	Banda 1 (Acopio a Molienda)	Banda 2 (Producto a Almacenamiento)
Material Transportado	Semilla de aguacate fresca y entera.	Carbón activado seco y clasificado.
Flujo Másico	1,260.4 kg/h.	100.0 kg/h.
Masa Total Diaria	15,125.0 kg/día.	1,200.0 kg/día.
Humedad del Material	71.45%.	~ 0% (Peso constante).
Dimensiones Estimadas	10 metros x 400 mm.	5 a 10 metros x 200 mm
Tipo de Estructura	Abierta, acero al carbono pintado.	Cerrada o encapotada (control de polvo).
Potencia del Motor	1.12 kW (1.5 HP).	0.37 kW (0.5 HP)
Consumo Eléctrico	13.44 kWh/día.	4.44 kWh/día.
Tiempo de Operación	12 horas/día.	12 horas/día.

Tanque de lavado

	FYG100	FYG200	FYG500	FYG1000	FYG1500	FYG2000	FYG2500
Volume (L)	100	200	500	1000	1500	2000	2500
Diameter (mm)	500	600	800	1000	1200	1200	1400
Tank Pressure Mpa	0.25-0.5						
Jacket Pressure Mpa	0.30						
Motor Power KW	1.1	1.5	2.2	4.0	4.0	4.0	5.5
Agitating Speed (r/min)	85						
Tank Type	First Grade Pressure Tank						



Nota. Tomado de tanque de lavado [fotografía], made in china ([Tanque de mezcla de productos químicos de 2000L a la venta Acero inoxidable - Tanque mezclador de acero inoxidable y recipiente de mezcla química](#))

Zaranda

Garantía	UN AÑO	Lugar del origen	Henan, China
Marca	THE NILE CO.,LTD	Dimensión (L*W*H)	3857*2386*2419
modelo	yk1237	piso de zaranda	1
rollo de zaranda	2-50 mm	zona de zaranda	4.4 m ²
tamaño entrada	200 mm	potencia	11 kw
doble amplitud	8 mm	capacidad	25-160
zona de grado	15-20 c°	dimension	3857*2386*2419



Nota. Tomado de zaranda [fotografía], alibaba ([Zaranda Vibratoria De Circulacion - Buy Zaranda De 3 O 4 Pisos Para Seleccionar Materias Primas Product on Alibaba.com](https://www.alibaba.com/supplier/wc4BAAJugXcT))

Tanque de almacenamiento de carbón activado – silo

Name&Specification	Diameter	Thickness of plate	Legs	Weight	Height of silo body	Total height	Height of legs
50T	3.16m	5.4.3mm	219*5.5	4t	5.1m	13.5m	4.2m
100T	3.16m	5.4.3mm	219*5.5	6t	9.3m	19m	
150T	3.6m	6.5.4mm	219*9	10t	10.7m	21m	
200T	4.5m	6.5.5mm	273*7	13t	9.3m	19m	
300T	5m	8.6.5mm	325*9	19t	10.7m	21m	
500T	6m	8.6.5mm	426*12	26t	12m	23m	



Nota. Tomado de almacenamiento de carbón activado – silo [fotografía], made in china
[\(Máquina de construcción ensamblada por silos de cemento de 100 toneladas para almacenamiento a granel de pólvora - Silo de cemento tipo atornillado y almacenamiento de cemento en silos\)](#)

Tanque de almacenamiento de ácido

Capacidades (lts)	5000 litros	10000 litros	25000 litros
Altura (A)	1800	3000	3980
Diámetro (B)	2200	2200	3000
C	1345	2545	3445
D	455	455	535
E	150	200	200
F	150	200	200
G	578	578	578
H	150	150	200
Diámetro Tapa (pulg)	18"	18"	18"



Nota. Tomado de tanque de almacenamiento de ácido [fotografía], cuscobuscal ([Tanque Polietileno Eternit 10000 Litros con Tapa – Buscal S.A.C](#))

Secador rotatorio carbón

Spec. (Dia.x Length mm)	Volume(m ³)	Capacity (t/h)	Gradient (%)	Highest Inlet Air Temperature(°C)	Rotate Speed(r/min)	Main Motor(kw)
Φ600x6000	1.7	0.5-1.5	3~5	700~800	3~8	3
Φ800x8000	4.1	0.8-2.0	3~5	700~800	3~8	4
Φ800x10000	5.1	0.8-2.5	3~5	700~800	3~8	4
Φ1000x10000	7.9	1.0-3.0	3~5	700~800	3~8	7.5
Φ1000x12000	9.4	1.2-3.2	3~5	700~800	3~8	11
Φ1200x8000	9	1.9-2.4	3~5	700~800	3~8	7.5
Φ1200x10000	11.3	2.2-3.0	3~5	700~800	3~8	7.5
Φ1200x12000	13.6	2.4-3.2	3~5	700~800	3~8	7.5
Φ1500x12000	21.2	4.5-5.7	3~5	700~800	2~6	15
Φ1500x14000	24.7	5.3-6.6	3~5	700~800	2~6	15
Φ1500x16000	26.5	5.7-7.1	3~5	700~800	2~6	15
Φ1800x12000	30.5	6.5-8.1	3~5	700~800	2~6	18.5



Nota. Tomado de Secador rotatorio carbón [fotografía], Made-in-China ([Equipo industrial de secador de tambor rotativo, piedra caliza, arena, carbón, aserrín Precio de secador de tambores - Secador rotatorio y secador rotatorio](#))