

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.

1.1.1. Generalidades

El uso de los materiales de carbón se pierde en la historia, de forma que es prácticamente imposible determinar con exactitud cuando el hombre comenzó a utilizarlos. Lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad denominamos carbones activos, es decir carbones con una estructura porosa altamente desarrollada, ya se empleó como adsorbente el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente desvolatilizadas o quemadas. (Menéndez, 2008)

Los primeros usos de materiales a base de carbón fueron en aplicaciones médicas. Para ello usaban carbón vegetal como adsorbente preparado a partir de madera carbonizada, así lo describen los griegos en un papiro encontrado en Tebas que data de 1550 a.C. Posteriormente, los griegos amplían su uso para filtrar el agua, con el fin de eliminar malos olores y sabores y prevenir enfermedades. De igual forma, se sabe que los barcos fenicios almacenaban el agua para beber en barriles de madera parcialmente quemados en su interior. (Grisales y Rojas, 2016)

La primera aplicación industrial del carbón activo tuvo lugar en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorante en la industria del azúcar. Esta aplicación permaneció en secreto durante 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. (Grisales y Rojas, 2016)

En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

En 2009 Zenteno, W. trabajó en la **“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVO A PARTIR DE RESIDUOS DE LA MADERA”** concluyó que, durante la elaboración del presente trabajo de investigación, se logró determinar las variables de mayor

incidencia en las diferentes etapas del proceso de obtención del carbón activo por el método de activación química. (Luna, González, Gordon y Martín, 2007)

En el 2010, Primera O., Colpas F., Meza E & Fernández R., de la Universidad de Cartagena, Colombia, trabajaron en **“CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR Y ZURO DE MAÍZ PARA LA ADSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO”**. Concluyeron que los carbones activados obtenidos fueron más selectivos para adsorber cadmio que plomo y que la remoción de estos metales pesados fue de mayor facilidad cuando se encontraban solos.

En la actualidad existe una gran diversidad de métodos y materias primas para la obtención de carbón activado lo cual da una activación en mayor o menor grado de los materiales carbonizables, todo lo anterior da como consecuencia que los carbones activados presenten diferencias físicas de acuerdo a la materia prima y el método a través del cual se obtuvieron. (Talledo, 2013)

En el año 2012 Garzón J. & González L., investigaron **“ADSORCIÓN DE CR (VI) UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA”**. Determinaron que el pH con mayor eficiencia para la adsorción de Cr (VI) resultó ser de 3 con un 86,05% de remoción en 60 minutos y para valores inferiores se produce una competencia entre los iones de Cr^{6+} y H^+ por los lugares activos en el carbón activado lo que hace disminuir una retención de Cr (VI).

En el año 2017 Oña E. trabajó en la investigación de **“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO, A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE IABSA EN EL DEPARTAMENTO DE TARIJA”**. Concluyó que es posible obtener carbón activado de bagazo de azúcar del ingenio de Bermejo, aplicando el proceso de activación química con ácido fosfórico.

En el año 2017 García A. y Ganillo A. Trabajaron en **“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES EN EL PROCESO DE PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVO DE CÁSCARA DE NARANJA VALENCIA (*Citrus Sinensis Linn Osbeck*)”**, concluyeron que la cáscara de naranja Valencia es una

materia prima potencial para la obtención de carbón activo debido a su alto contenido de carbón (84,68%) y su bajo contenido de cenizas (5,44%). El rendimiento del carbón activo es del 54% en base a cáscara de naranja seca preincinerada.

1.1.2. Conceptualización de la idea del proyecto

Actualmente se está produciendo un incremento muy significativo del agua para el uso industrial. El sector industrial consume ingentes cantidades de agua y es responsable de gran parte de la contaminación que se genera sobre el medio ambiente, debido a la cantidad de desechos peligrosos que produce. El agua tiene un gran valor económico, social y ambiental, porque es imprescindible para el desarrollo económico y como soporte de cualquier forma de vida. A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química.

Es por esto que el presente proyecto propone la obtención de carbón activado para su uso en el tratamiento de aguas residuales industriales, ya que este producto es hidrofóbico y tiene una fuerte afinidad por los compuestos orgánicos y los contaminantes no polares, lo que lo hace una de las mejores opciones para tratar el agua residual de muchas industrias. (Sela, 2018)

Además, que para la obtención del carbón activado se quiere aprovechar uno de los residuos agroindustriales, como lo es la cáscara de plátano, que tiene una alta composición en lignina, un componente esencial para ser un buen candidato como materia prima para la obtención de carbón activado. (García Barrera, 2016)

La reutilización de la cáscara de plátano en la generación de productos con valor agregado, como el carbón activado, también es una alternativa para reducir parcialmente su impacto negativo, ya que al no ser utilizado correctamente provoca problemas ambientales, tales como la generación de lixiviados, olores, gases de efecto invernadero (principalmente metano), y la proliferación de vectores.

1.1.3. Descripción y caracterización del producto

El carbón activado es un adsorbente muy versátil ya que el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de tecnología actual y futura. Los carbones activados comerciales son preparados a partir de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente, materiales orgánicos como, madera, huesos, cáscaras de semillas de frutos, como también, carbón mineral, breas, turba y coque. La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final deben ser igualmente tomados en cuenta. (Canales, 2018)

Los carbones activados cuentan con la ventaja de controlar los olores de las aguas residuales mejor que otros materiales, pudiendo estar en polvo o en forma granular. La dosis de tratamiento con carbón activado en polvo, suele ser menor de 5 mg/l, aunque variará en función de las características de los contaminantes y de la calidad final requerida. El carbón granular se usa en lechos fijos solo o formando una bicapa con arena. (Bonilla, 2017)

En el cuadro I-1, se puede observar la aplicación de los distintos carbones activados en aguas residuales.

Cuadro I-1: Aplicación de los distintos carbones activados en aguas residuales

Base materia del carbón activo	Distribución de tamaño de poros	Tipos de contaminantes a ser retenidos
Cáscara de coco	Microporoso	Moléculas pequeñas: compuestos clorados, compuesto orgánicos volátiles, etc.
Cáscara de plátano	Amplia distribución de poros	Moléculas de diferentes tamaños.
Mineral bituminoso	Mesoporoso	Compuestos de peso molecular intermedio: herbicidas, pesticidas, etc.
Mineral Lignítico	Amplia distribución de poros	Contaminantes tamaño molecular variado: aguas residuales de distintos orígenes.
Madera	Macroporoso	Contaminantes de alto peso molecular: grasas, aceites, tintes, etc.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

1.1.4. Aplicaciones del producto

Las aplicaciones más relevantes del carbón activado se basan en sus buenas propiedades adsorbentes, su alta superficie y porosidad.

Tales características dan como resultado que el carbón activado sea utilizado principalmente para eliminar contaminantes del aire, agua y otros líquidos, los contaminantes presentes que son retenidos por el carbón activado de manera más eficaz son:

- ✓ **Contaminantes orgánicos:** colorantes y compuestos coloreados, gran cantidad de compuestos aromáticos (derivados bencénicos, fenoles, compuestos aromáticos nitrados, etc.), pesticidas, diversos macro-moléculas orgánicas (sustancias húmicas, etc.).

- ✓ **Contaminantes inorgánicos:** ácido hipocloroso y cloro, amoníaco, cloruro de mercurio (II), cianuros, dicromatos, yodo, permanganatos, etc.

Como se puede apreciar el carbón activado puede eliminar una gran cantidad de contaminantes presentes en los medios mencionados las aplicaciones que se le da son variadas: recuperación de disolventes, desodorización del aire, mascarillas de protección, eliminación de cianuro y cromo, tratamiento de agua potable, tratamiento de aguas residuales sobre todo en la etapa de limpieza final cuando los demás procesos no han demostrado la eficacia requerida en los tratamientos, etc. (Rodríguez, 2003) Todos los sólidos tienen propiedades, a la propiedad de adherir una molécula que fluye a sus paredes se le llama “adsorción”. Es llamado “adsorbente” el sólido y la molécula, “adsorbato”. Después de la filtración el proceso más utilizado es el uso del carbón activado en la purificación. (Arellano, Nicasio y Ruiz, 2017)

Algunas de las aplicaciones del carbón activado se encuentran mencionada en el cuadro I-2:

Cuadro I-2: Aplicaciones del carbón activado

APLICACIÓN EN:	FUNCIÓN
Potabilización de agua	Retiene plaguicidas, sustancias aceitosas o grasosas, detergentes, productos de desinfección, toxinas, colorantes, sustancias producidas por la descomposición productos alimenticios o de desechos de animales.
Purificación de aire y deodorización	Recirculación de aire en lugares públicos, ventilación en drenajes y plantas de tratamiento de agua, lugares de aplicación de pinturas, lugares que almacenan y aplican solventes.
Tratamiento de personas con intoxicación	El carbón activado se considera el “antídoto más universal”, y se aplica en hospitales.
Refinación de azúcar	El objetivo es evitar que el azúcar se fermente.
Decoloración de aceites vegetales	Se usa junto con arcilla activada para promover la decoloración y la purificación de aceites.
Decoloración y deodorización de bebidas alcohólicas	Utilizado en vinos de uva y destilados de cualquier origen
Recuperación de oro	El oro que no se puede separar de los minerales por los procesos de flotación, se disuelve en cianuro de sodio y se adsorbe en carbón activado.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Generalmente podría obtenerse carbón activado de cualquier partícula que esté conformada de carbono. Aunque si las partículas de carbono están muy ordenadas

como es el caso del diamante, es más difícil eliminar algunos átomos de carbono para generar espacios vacíos y poros.

Entre las materias primas más utilizadas para fabricar el carbón activado tenemos las maderas poco duras como las maderas de pino, los carbones minerales y cáscaras de vegetales o semillas de frutas, cáscara de coco, semillas de aceitunas, cáscara de nuez, etc. Los carbones activados generados a partir de carbones minerales tienen en su distribución una amplia gama de poros, esto ayuda para retener compuestos de distintos tamaños moleculares. La materia prima proveniente de cáscaras o huesos duros, forman poros pequeños, y se los pueden aplicar en el tratamiento potabilización de aguas que provienen de pozos y de gases. (Villegas, 2001)

1.1.5. Aspectos del mercado

1.1.5.1. Mercado consumidor

El carbón activado posee diversas aplicaciones, lo cual permite tener una amplia gama de potenciales clientes, en especial las industrias, que tienen el interés de reducir sus índices de contaminación. Existe un mercado real de consumo de carbón activado en Bolivia y el mundo, el consumo global del carbón activado se valoró en más de 1,6 Mega toneladas durante 2021, y se prevé que el mercado registre una tasa de crecimiento de más del 3 % entre el 2022 y el 2027.

En el cuadro I-3, se menciona a los potenciales consumidores de carbón activado en Bolivia.

Cuadro I-3: Principales consumidores de carbón activado

INDUSTRIA	DEPARTAMENTO	APLICACIÓN
ADM SAO S.A.	Santa Cruz	Tratamiento de aguas residuales.
ARANJUEZ	Tarija	Tratamiento de aguas residuales, decoloración de vinos.
CASCADA DEL SUR S.A.	Tarija	Purificación de agua potable y decolorante de jarabes.
CBN	Tarija	Remoción de olor.
COCA-COLA	Tarija	Purificación de agua potable, decolorante de jarabes y/o del azúcar.
COSAALT	Tarija	Tratamiento de aguas.
IABSA	Tarija	Clarificación de jugo concentrado.
Industrias De Aceite S.A.	Santa Cruz	Remoción de color, olor sabor.
Minería San Cristóbal	Potosí	Recuperación de oro.
PIL TARIJA	Tarija	Purificación de agua potable
YPFB	Cochabamba, Tarija, Santa Cruz	Recuperación de solventes.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El precio de carbón activado en polvo en Tarija es de 5.50 dólares el kg y el carbón activado granular 5.80 dólares.

1.1.5.2. Mercado Competidor

Actualmente Bolivia no cuenta con industrias que se dediquen a la obtención de carbón activado.

A nivel latinoamericano existen algunas plantas productoras de carbón activado, siendo México el mayor productor de la región donde las principales empresas son Clarimex

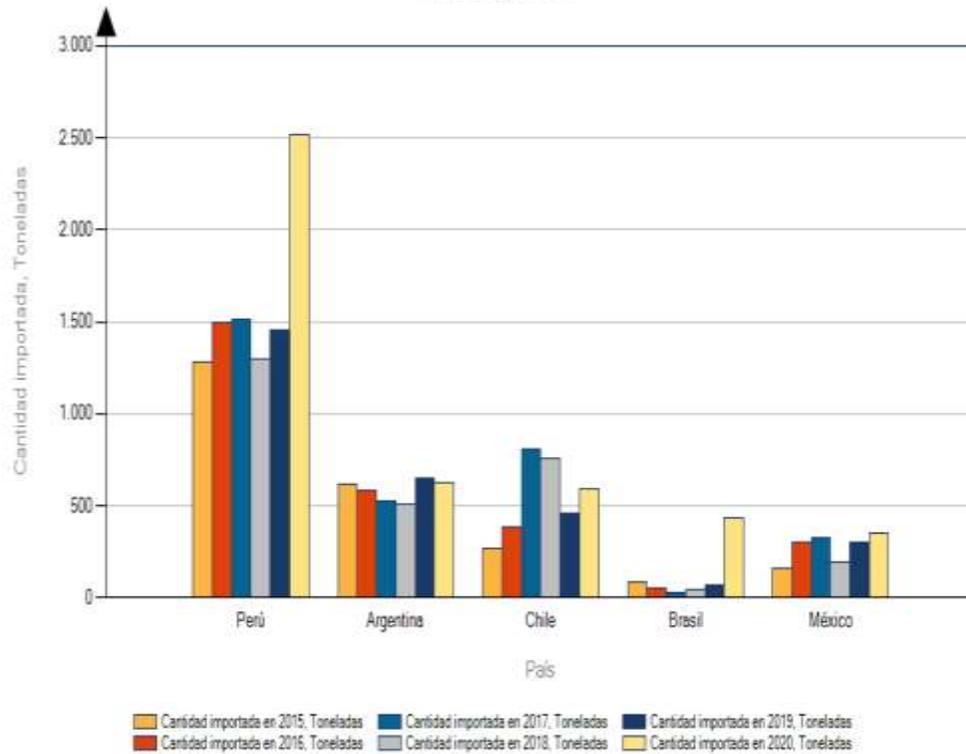
(con plantas en México y Brasil), Carbonapelsa, y Carbotecnia. Por otra parte, desde 1997, Ecuador posee una planta perteneciente a la compañía Ekokarbones, cuya capacidad es de 800 toneladas anuales, la cual actualmente produce principalmente carbones activados granulares utilizando como materia prima la cáscara de coco. En Chile, desde 1993 Petrochil posee la única planta existente en el país, cuya capacidad es de 500 toneladas anuales. (Sevillano y Torres, 2007)

Bolivia importa carbón activado de distintos países del mundo debido a la falta de industrias productoras.

En la fig. 1-1, se puede observar la lista de los principales países proveedores de carbón activado de Bolivia, y las cantidades importadas desde el año 2015 hasta el 2020.

Fig. 1-1. Principales países proveedores de carbón activado a Bolivia

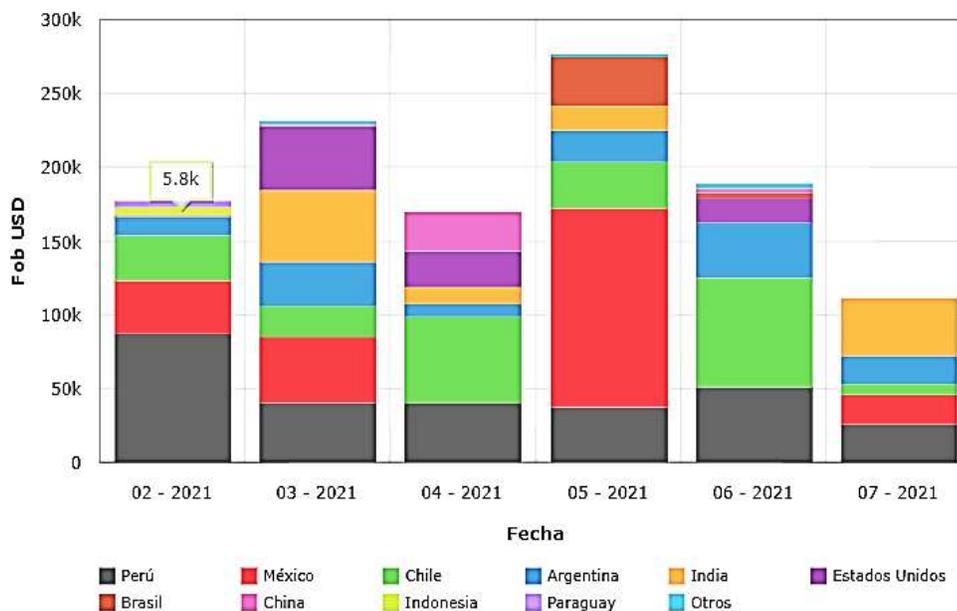
Lista de los mercados proveedores para un producto importado por Bolivia, Estado Plurinacional de
Producto : 3802 Carbón activado; materias minerales naturales activadas; negro de origen animal,
incl. el agotado



Fuente: ITC, 2021.

En la fig. 1-2, se puede observar la cantidad en USD de carbón activado importado por Bolivia desde febrero del 2021, hasta junio del 2021.

Fig. 1-2. Cantidad de carbón activado importado por Bolivia en dólares americanos



Fuente: Comex, 2021.

1.1.6. Procesos tecnológicos empleados

En función de la tipología de técnicas podemos diferenciar tres grandes grupos:

- ♣ Artesanales
- ♣ Semiindustriales
- ♣ Industriales

A continuación, en el cuadro I-4 se detallan algunos de los procesos tecnológicos más empleados para la obtención de carbón activado, agrupándolos atendiendo a la clasificación anterior:

Cuadro I-4. Procesos tecnológicos empleados

		Separación entre la madera y el aire ambiental	Procedencia del calor
Artesanal	Parva tradicional	Tierra	
	Parva sueca con chimenea	Tierra	De la propia madera
	Fosa de tierra	Tierra	De la propia madera
	Horno casamance	Tierra	
Semindustriales	Horno de colmena brasileño	Ladrillo	De la propia madera
	Horno media naranja argentino	Ladrillo	De la propia madera
	Horno de colina	Ladrillo	De la propia madera
	Horno Missouri	Cemento armado	De la propia madera
	Horno Schwartz	Ladrillo acero	
	Horno metálico español	Acero	
	Horno TPI	Acero	De la propia madera
	Horno carbofrance	Acero	De la propia madera
	Horno bataillon	Acero	
	Horno magnien	Acero	
Industriales	Horno lambiotte	Acero	De la propia madera
	Horno Pillard	Acero	De la propia madera
	Aldred process plant	Acero	De la propia madera
	Horno Coppe	Acero	De la propia madera
	Horno Lurgi	Acero	De la propia madera

Fuente: Manual del carbón activo.

1.1.7. Materia Prima

Entre las propiedades que debe tener una materia prima para la producción de carbón activado se cuentan su abundancia, su dureza, una estructura inherente de poros, alto

contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización. Entre las materias primas mayormente utilizadas se tienen diferentes tipos de madera, carbón, lignito y cáscaras y huesos de algunas frutas, como el coco y las olivas respectivamente. (Gómez, Klose, Rincón y Wiest, 2004)

En los últimos años se ha extendido la investigación sobre el empleo de materiales de bajo costo como adsorbentes. En este sentido, materiales naturales disponibles en grandes cantidades o ciertos productos residuales de operaciones industriales o agrícolas pueden ser utilizados con este fin. (Paredes, 2011)

La cáscara de banana ha demostrado ser no solo un adsorbente económico y de alta disponibilidad, sino que también bastante prometedor para la remoción de compuestos orgánicos. (Pinto, 2017)

Durante el 2019, la Universidad Tecnológica de Panamá, cinco estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, evaluaron cuatro filtros de carbón activado hechos a partir de cáscaras de cuatro diferentes tipos de fruta con alto contenido de carbohidratos. Las frutas utilizadas fueron: naranja, piña, coco y plátano. Los filtros fueron evaluados por su capacidad de eliminar compuestos presentes en las aguas de ríos, pozos, lagos, etc. Este trabajo presenta el método utilizado para la producción del carbón activado y el procedimiento en la realización de las pruebas de turbiedad y alcalinidad realizadas. Los resultados obtenidos muestran la disminución de los niveles de alcalinidad y turbiedad en el agua, llegando incluso alcanzar el nivel óptimo para el consumo humano. (Arrocha, Guevara, González, Rivas y Delgado, 2019)

Bolivia es un país donde la producción de plátano es elevada, es por esto que existen derivados del plátano, como lo es el K'asi de plátano o plátano deshidratado. Actualmente en Bolivia existen dos plantas liofilizadoras de fruta, entre ellas el plátano, una planta de Villa Tunari ubicada en Cochabamba y la planta de Palos Blancos, La Paz. Estas dos plantas cuentan con una capacidad productiva por mes de 200 toneladas de fruta fresca para la obtención de 20 toneladas de fruta liofilizada y el procesamiento

de 2 400 toneladas de fruta fresca para la producción de 240 toneladas de fruta liofilizada por año.

En la figura 1-3, se puede observar parte del proceso de obtención del plátano liofilizado.

Fig. 1-3. Planta liofilizadora de frutas, Villa Tunari



Fuente: ABI, 2021.

1.1.8. Identificación del problema

El problema que se desea solucionar parcialmente, es la creciente importación del carbón activado, con la consiguiente pérdida de divisas para el país de Bolivia.

1.1.6.1. Causas/Efectos directos

Causa

- No existen fábricas actualmente que produzcan carbón activado en Bolivia.

Efecto

- Aumento de la importación del carbón activado a costos elevados.

1.1.8.1. Actores involucrados en el Proyecto

Los autores involucrados en el presente proyecto serán las empresas que desechan la cáscara de plátano y los consumidores del producto a obtener.

1.1.9. Planteamiento Técnico propuesto

Para solucionar parcialmente el problema de desarrollado, se plantea producir experimentalmente carbón activado de calidad, aprovechando un residuo orgánico como materia prima, el cual es la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*), para el tratamiento de aguas residuales industriales.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General

- Obtener experimentalmente carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*) proveniente del trópico boliviano, mediante activación química, para el tratamiento de aguas residuales industriales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*) proveniente del trópico boliviano, utilizada como materia prima para la obtención de carbón activado.
- Seleccionar las características y parámetros de calidad del carbón activado a obtener a partir de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).
- Analizar y seleccionar el proceso tecnológico industrial de obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).
- Formular y ejecutar la fase experimental para el proceso de obtención del carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).
- Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).
- Determinar el rendimiento del proceso experimental de obtención de carbón activado de cáscara de plátano
- Seleccionar el proceso óptimo de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).

1.3. Justificación e importancia del proyecto

1.3.1. Justificación técnica

Con el presente trabajo de investigación se pretende aprovechar los desechos agroindustriales, como lo es la cáscara de plátano de la variedad *Musa Cavendishii*, para obtener carbón activado, que será utilizado para el tratamiento de aguas residuales industriales, pretendiendo buscar nuevas materias primas para la obtención del carbón activado, dándole valor agregado a los desechos orgánicos.

1.3.2. Justificación Económica

La materia prima a utilizar en esta investigación es la cáscara de plátano provenientes de las plantas liofilizadoras de fruta de Palos Blancos, en La Paz y de Villa Tunari, en Cochabamba. El aprovechamiento de residuos agroindustriales como la cáscara de plátano, es una estrategia que permite la adecuación de este subproducto como fuente de materia prima renovable para el país, en la obtención de carbón activado, generando posibilidades económicas para la producción a media y gran escala de carbón activado ya que la cáscara de plátano aún no tiene un valor agregado.

1.3.3. Justificación Social

Mediante esta investigación se plantea generar un impacto social con la producción de carbón activado, el producto obtenido será utilizado en la remoción de agentes contaminantes presentes en aguas residuales de tipo industrial, las cuales son producidas por las industrias presentes en la región y que depositan aguas directamente a los sistemas de drenajes convirtiéndose en un factor adicional en la contaminación del agua potable, además debido a la alta demanda que tiene el carbón activado en otros países la producción de carbón activado puede fortalecer y ayudar al desarrollo de la industria del país, generando fuentes de empleos directos e indirectos.

1.3.4. Justificación ambiental

La creciente preocupación mundial sobre la contaminación ambiental ha llevado a los científicos de las últimas décadas a buscar alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados. La adsorción es reconocida por su fácil aplicación,

bajo costo y alta eficiencia de remoción, el principal material empleado en este procedimiento y el más estudiado durante años es el carbón activado.

El aprovechamiento de la cáscara de plátano para la obtención de carbón activado ayudaría a reducir el impacto ambiental que provocaría este subproducto al no darle un tratamiento ya que su degradación en el suelo puede traer consecuencias medio ambientales como: acidificación del suelo provocando un desequilibrio de sus nutrientes y pH, contaminación de aguas y focos de infección. Los impactos ambientales que se generarían por la producción de carbón activado a nivel industrial son: emisiones de gases con alto contenido de CO₂ y generación de aguas residuales.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

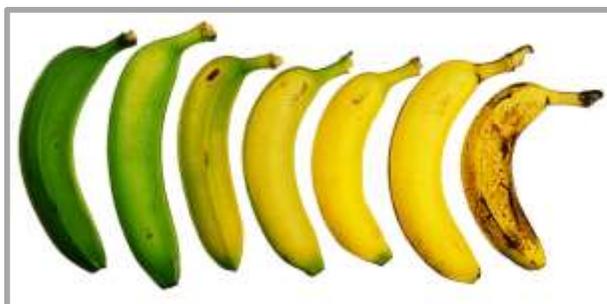
2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Plátano

El plátano o banano es una fruta amarilla, de forma alargada, que encontramos en el mercado en grupos de tres a veinte, de forma similar a un pepino triangular, oblongo, su sabor es más o menos dulce según la variedad. y normalmente su color depende de la etapa de madurez en que se encuentre.

En la figura 2-1 se puede observar las diferentes etapas de maduración del plátano.

Fig. 2-1. Etapa de maduración del plátano



Fuente: Fruit Spanish, 2008.

El consumo en fresco como postre del plátano es el más normal, incluso frito, pero, además, otros plátanos, como el plátano macho, se cocinan y consumen cuando todavía están verdes. Una parte de los plátanos maduros se utiliza para producir crujientes rodajas de plátano deshidratado o harina de plátano. También en algunas zonas del Este de África los plátanos maduros se usan para elaborar una cerveza con bajo contenido en alcohol. Otros productos son el puré, zumo, licor y golosinas. Además, esta fruta es una buena fuente de energía, ya que aporta entre 88 y 95 kcal/100 g y es una fuente importante de vitamina A y potasio. Se pueden distinguir algunas variedades por su diferencia de tamaño, color, que puede ser verde, amarillo o rojo, sabor más o menos dulce y su forma de consumo. (Gonzales, Chiroque, Chung, Florián y mora, 2021)

La familia de plantas plátano comprende unas 40 especies repartidas en 3 géneros principales (Musa, Musella, y Ensete), que son de gran importancia económica en nuestro país. Estos 3 géneros se pueden observar a continuación en el cuadro II-1.

Cuadro II-1. Principales géneros de la familia de plantas de plátano

Género	Características	Fotografía
Musa	Es un importante cultivo hortícola en áreas tropicales y subtropicales del mundo que es rico en compuestos de carbohidratos (ácido ascórbico, β -caroteno y azúcares solubles), fenoles, ácido fólico y minerales, como potasio, calcio, fósforo, magnesio y zinc.	
Musella	Es nativa de la provincia de Yunnan al sur de China, ubicada entre 1.500 a 2.500 m s. n. m., indicándose en la actualidad la posibilidad de su extinción en el hábitat natural, pues, solo puede ser encontrada como una planta ornamental en las casas.	
Ensete	Es un género de plantas con flores monocárpicas nativas de las regiones tropicales de África y Asia. Es uno de los dos géneros de la familia del banano, Musaceae, e incluye el falso banano o enset (<i>E. ventricosum</i>), un cultivo alimenticio de importancia económica en Etiopía.	

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los plátanos se pueden recolectar todo el año, incluso en un año se pueden hacer tres recolecciones y su abundancia depende de la estación. Los destinados a la exportación se recogen verdes y se llevan en barcos frigoríficos hasta su destino. Posteriormente maduran con facilidad en cámaras acondicionadas para ello. En el proceso de maduración el almidón de la fruta se transforma en azúcar y al mismo tiempo se forman las sustancias aromáticas y los ácidos que equilibran la dulzura. Una vez maduros no se deben meter en el frigorífico doméstico porque pierden sabor con el frío y pueden estropearse. (Rosales, Álvarez y Vargas, 2010)

2.1.1. Composición química de la cáscara de plátano.

La cáscara de plátano se transforma alrededor del 90% de su almidón a azúcares aproximadamente 12 días después de su cosecha; un contenido de hasta 14,6% de azúcares en base seca ha sido encontrado. El contenido de fibra en la cáscara es de 13% en base seca: Los principales componentes de la cáscara son: celulosa (25%), hemicelulosa (15%) y lignina (60%). (Romero, 2014)

La cáscara de plátano tiene una propiedad de adsorción. La cáscara molida tiene la capacidad para extraer iones de metales pesados del agua y de los parámetros que intervienen en este proceso. La adsorción de la cáscara de plátano se debe en gran parte a la lignina que son polímeros insolubles, presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina. (Pinto, 2017)

2.1.2. Propiedades funcionales de la cáscara de plátano

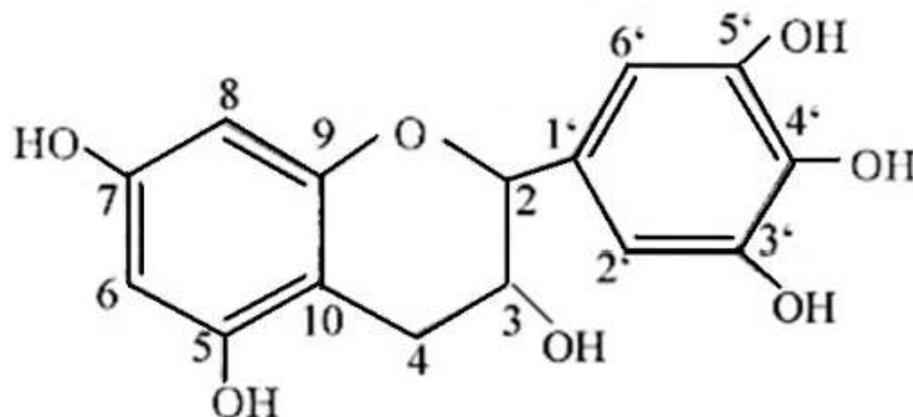
El principal subproducto del proceso industrial del plátano, es la cáscara la cual representa aproximadamente el 30% del peso del fruto; las aplicaciones potenciales para la cáscara de plátano dependen de su composición química. La cáscara de plátano es rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio; entre los esfuerzos para utilizar la cáscara se han obtenido proteínas, metanol, etanol, pectinas y enzimas. Entre otros usos se ha obtenido carbón vegetal, una fuente de combustible alternativa para cocinar. Kudan en 1962 reportó que la cáscara en conjunto con otras sustancias crea un unguento para reducir los dolores causados por la artritis además se considera que la cáscara de plátano puede ser una fuente potencial de sustancias antioxidantes y antimicrobianas, así como compuestos fitoquímicos con actividad contra radicales libres. Varios autores han analizado el efecto de los compuestos antioxidantes presentes en cáscara de plátano, para identificar el efecto sobre los radicales libres los cuales se producen continuamente en nuestro organismo ya sea de manera natural o por el estrés ambiental, así como otros factores

relacionados con muchas enfermedades como el cáncer, aterosclerosis, artritis, enfermedad de Parkinson y Alzheimer. (Blasco y Gómez, 2014)

La cáscara de plátano se considera una fuente natural de compuestos antioxidantes para la elaboración de alimentos funcionales con efecto en contra de enfermedades del corazón, así como el cáncer, actualmente los estudios se han focalizado en el aislamiento, caracterización y utilización de antioxidantes naturales, la mayoría de los compuestos antioxidantes presentes en frutas y verduras provienen de compuestos como la vitamina C, vitamina E y β -caroteno; el plátano es uno de los frutos más consumidos a nivel mundial y se sabe que su pulpa así como su cáscara contienen varios antioxidantes como la galocatequina y la dopamina. El contenido total de compuestos fenólicos en la cáscara de plátano (*Musa acuminata* Colla AAA) varía de 0.9 a 3 g/100 g en base seca. Someya et al en el año 2002 identificaron la galocatequina en concentraciones de 160 mg/100 g en base seca, siendo este compuesto al que se le relaciona la capacidad antioxidante de la cáscara. La cáscara de plátano maduro también contiene otros compuestos tales como las antocianinas (delfinidina y cianidina) y catecolaminas. Así mismo, la cáscara de plátano contiene carotenoides, como el β -caroteno, α -caroteno y diferentes xantofilas, estas han sido cuantificadas en un rango de 300-400 μ g de equivalentes de luteína/100 g, así mismo se han identificado esteroides y triterpenos, como el β -sitoesterol, stigmasterol, campesterol, cicloeucalenol, cicloartenol y cicloartanol 24-metileno. (Blasco y Gómez, 2014)

En la figura 2-2. Se puede observar la estructura química de la galocatequina, que es el principal compuesto antioxidante de la cascara de plátano.

Fig. 2-2. Estructura química de la Galocatequina, principal compuesto antioxidante de la cáscara de Plátano



fuentes: Someya et al, 2002

2.2. Carbón Activado

El carbón activado es un término general que denomina a toda una gama de productos derivados de materiales carbonosos. Es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta. El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. (Sevillano y Torrez, 2013)

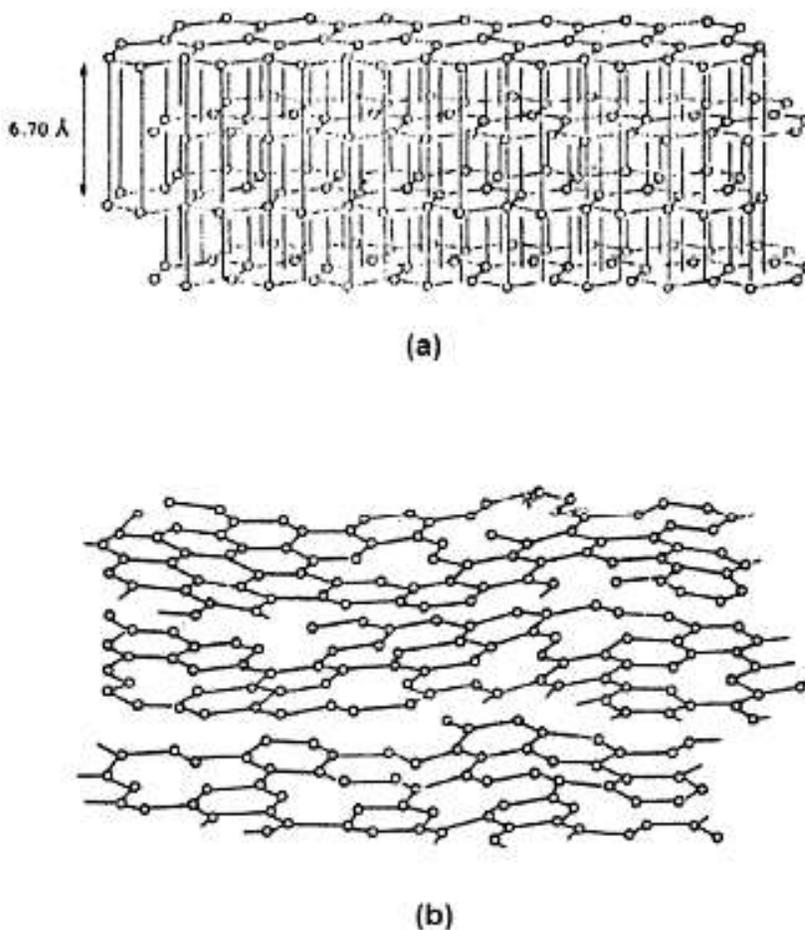
El carbón activado al igual que otros tipos de carbón, forman un grupo de materiales carbonosos en los cuales la estructura y propiedades son más o menos similares a la estructura y propiedades del grafito. El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito solo que el orden en la estructura del carbón activado es menos perfecto; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 500 a 1500 metros cuadrados o más, por gramo de carbón. El área superficial del carbón activado varía dependiendo de la materia prima y del proceso de activación. (Moliner, 2016)

Los átomos de carbón pueden atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseables; la diferencia del carbón con un carbón activado, consiste en la

mayor cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar el proceso de adsorción. (Glibota, 2005).

En la figura 2-3 se observa las capas de la estructura del grafito y la del carbón activado.

Fig. 2-3: (a) arreglo estructural de las capas planas del grafito, (b) estructura propuesta de las capas del carbón activado.



Fuente: (Carbotecnia, 2010)

2.2.1. Composición Física Y Química Del Carbón Activado

2.2.1.1. Composición Química

La composición química del carbón activado es aproximadamente de un 70-80% de C, del 5 al 10% de cenizas, del 20% de oxígeno y 0,5% en hidrógeno. Dicha composición química del carbón activo tiene un elevado contenido de carbono, al igual que el grafito

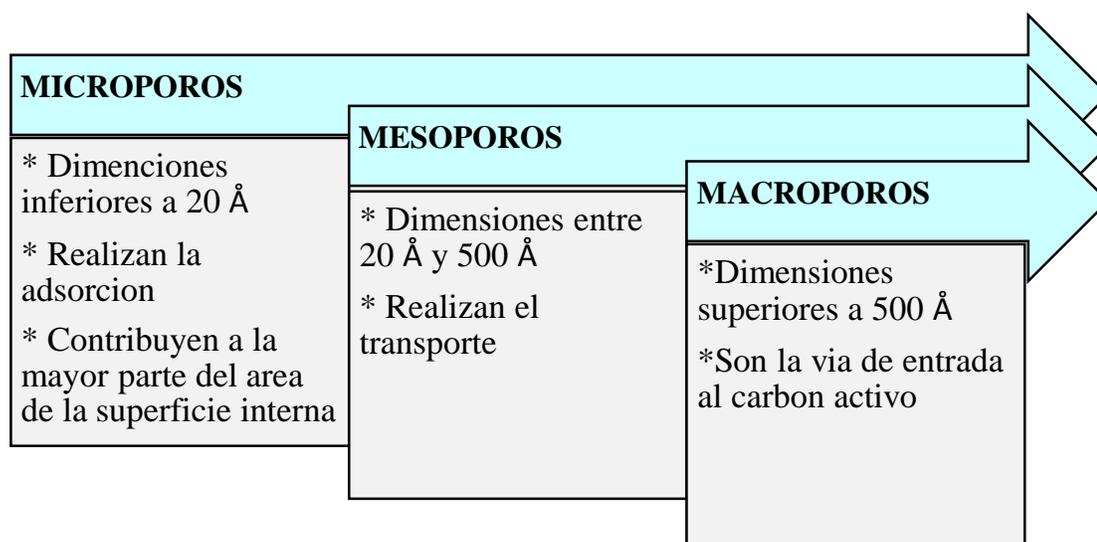
y los diversos carbones minerales o de leña, todos ellos tienen la propiedad de adsorber, la misma que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que se encuentran contenidas en un medio líquido o gaseoso. (Perdomo, 2011)

2.2.1.2. Composición Física

La estructura del carbón activo está constituida por un conjunto irregular de capas de carbono con espacios producidos por los huecos creados por el plegamiento de las capas, es lo que constituye la porosidad. (Serrano, 2019)

Según la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) los poros se clasifican en tres grupos principales, los cuales se indican a continuación en la figura 2-4.

Fig. 2-4. Clasificación de los poros del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.2.2. Propiedades Del Carbón Activado

Las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado son: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, pero la porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel

importante. En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido.

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y la porosidad. En particular, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En estos casos, la fijación con el carbono se da por los “heteroátomos”, principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, etc., elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón (Pilamonta, 2013).

2.3. Métodos de Activación del Carbón

La obtención de carbón activo está basada en dos etapas fundamentales: La carbonización de la materia prima y la activación del producto carbonizado. En general todos los materiales carbonosos pueden ser transformados en carbón activo, siendo las propiedades del producto final dependientes de la naturaleza de materia prima, el agente activante y el proceso de activación.

La activación del material carbonizado consiste en el desarrollo de la estructura porosa antes generada, mediante la adición de agentes oxidantes. La activación puede llevarse a cabo por dos métodos: Físico y Químico. En ambos procesos, el área superficial específica del carbón activo obtenido depende de la pérdida de peso del material durante la etapa de activación, alcanzando, generalmente un valor máximo cuando se produce una pérdida de peso entre el 30 y el 70 %. El grado de activación determina las propiedades estructurales finales del carbón activado producido. Esta estructura porosa es la característica fundamental que determina la calidad de los carbones activados. (Labrada, Sánchez y Salas, 2005)

2.3.1. Activación Física del Carbón Activado

Esta forma de activación es la más utilizada; como materia prima emplea el carbón vegetal granulado, obtenido previamente en métodos de carbonización a temperaturas entre 400 a 600 °C. El carbón vegetal, es sometido a una molienda, luego a una clasificación empleando tamices de diferentes tipos de abertura, con el propósito de uniformizar el tamaño de partículas antes de la activación. El carbón vegetal, molido, se coloca dentro de un lecho de activación (construido en material resistente a altas temperaturas) por donde se hace pasar corrientes de gas a temperaturas entre 800 a 1000 °C. Como activantes se emplea el vapor de agua, dióxido de carbono, cloro, gases provenientes de una combustión u otros gases que actúan sobre los materiales volátiles, provocando su arrastre y separación de la estructura del carbón. Se recomienda el empleo de gases con oxígeno en su composición, para aumentar la reactividad del carbón. Entre los agentes activadores también se puede utilizar el aire, cuya activación ocurre a 600 °C, sin embargo, a pesar de su bajo costo, su uso genera reacciones exotérmicas difíciles de controlar. Por lo general, los gases activadores son gases inertes los que permiten obtener carbones activados de buena calidad. El gas dióxido de carbono se aplica a 900 °C y el vapor de agua, de bajo costo, alrededor de 1000 °C. (Luna, González, Gordon y Martín, 2007)

La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activantes con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produce un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial), aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. (Bansal, 1998).

2.3.2. Activación Química Del Carbón Activado

Este proceso se desarrolla en una sola etapa, calentando en atmósfera inerte una mezcla del agente activante con el material de partida. Las sustancias más usadas son: ácido fosfórico (H₃PO₄), Cloruro de zinc (ZnCl₂), ácido sulfúrico (H₂SO₄), aunque también

se han usado sulfuros y tiocianatos de potasio, cloruros de calcio y magnesio, hidróxidos de metales alcalinos, entre otras sustancias, siempre en dependencia de la materia prima original a utilizar y el mayor o menor volumen de poros de un tipo o de otro que se quiera obtener. (Aguapedia.net, 2016)

Los parámetros fundamentales que controlan el proceso de activación química y el producto a obtener son: la relación de impregnación, la temperatura de activación y el tiempo de residencia.

2.3.2.1. La activación química con $ZnCl_2$

Fue el método más usado hasta 1970, especialmente para la activación de residuos de madera. Su uso, sin embargo, se ha restringido mucho en la actualidad, debido a los problemas medioambientales que conlleva el uso del $ZnCl_2$, no obstante, algunos países como China aún siguen usando este método para producir carbón activado. (Menéndez, 2008)

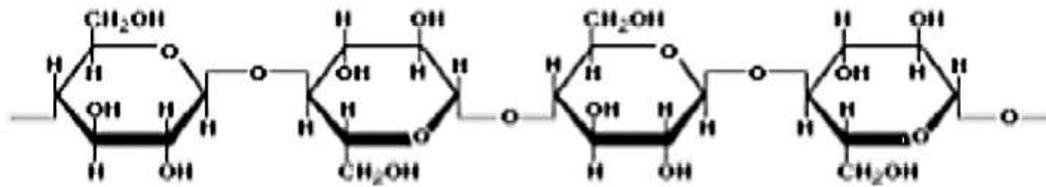
2.3.2.2. La activación química con H_3PO_4

En la activación química con ácido fosfórico el mecanismo está poco desarrollado, pero se ha realizado investigaciones para el análisis de la química superficial de los carbones activados mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), comparando los espectros generados de distintos radicales antes y después de la activación química en el carbón activado. (Carvajal, 2014)

Se tiene que tener presente los grupos funcionales en los biopolímeros para determinar la formación de los grupos funcionales durante la activación química debido a que algunas estructuras no sufren transformaciones y otras se oxidan, es así que las estructuras de los biopolímeros inicialmente son:

✚ Celulosa

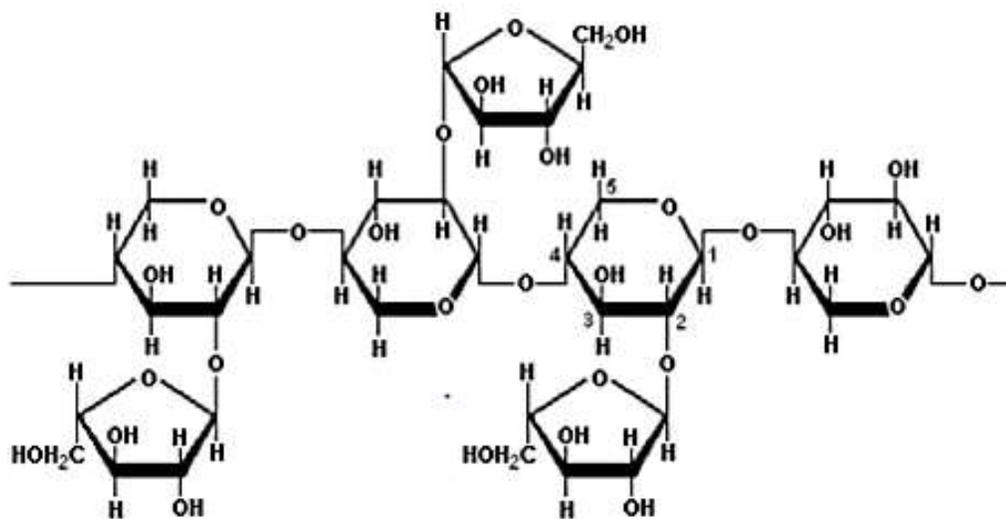
Fig. 2-5. Esquema de la macromolécula de la celulosa



Fuente: Chemical, 1998.

✚ Hemicelulosa

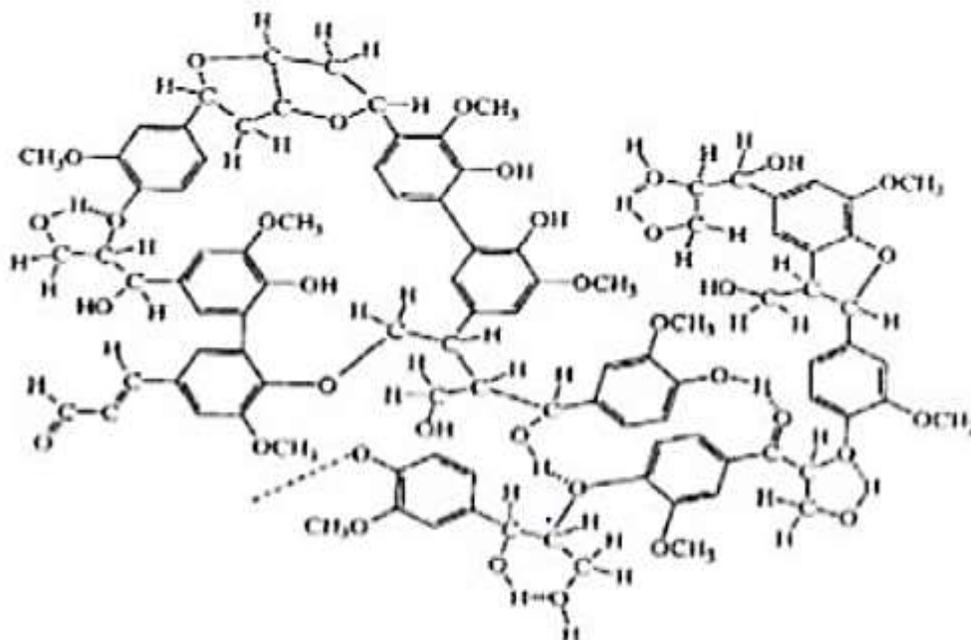
Fig. 2-6. Esquema de la macromolécula de la hemicelulosa



Fuente: Chemical, 1998.

✚ Lignina

Fig. 2-7. Esquema de la macromolécula de la lignina



Fuente: Chemical, 1998.

Según investigación en el ácido fosfórico tiene un efecto deshidratante que se intensifica con el incremento de su concentración. Así, cuando el H_3PO_4 entra en contacto con el precursor, hidroliza los enlaces glicosídicos de los biopolímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina) acelerando la deshidratación y degradación del material impregnado, y favoreciendo las reacciones de condensación aromática entre las moléculas adyacentes, con la consiguiente evolución de productos volátiles gaseosos. (Paredes, 2011)

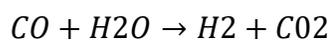
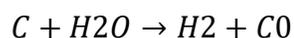
Los carbones comerciales con bajo contenido de cenizas se preparan ya sea por lavado ácido o por una adecuada selección de la materia prima entre las que se encuentran los materiales lignocelulósicos. Estos lavados se realizan con ácido clorhídrico, ácido fosfórico, esperando que los componentes inorgánicos que contiene dicho material se solubilicen y puedan ser removidos eliminando compuestos de Na, K, Ca, Mg y Fe. (Navarrete, Giraldo, Baquero, Moreno, 2005)

2.3.2.3. La activación química con KOH

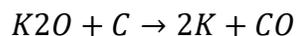
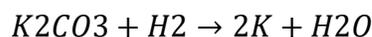
Se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “carbones super activados”, con superficies específicas del orden de los 3000 m²/g. A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles para la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc. (Apaza y Condori, 2018)

En esta activación el KOH se mezcla con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones entre 2:1 y 4:1. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas bajas, pero superiores a los 200°C (que se utiliza sólo para evaporar el agua y dispersar el KOH) y el segundo entre 700 y 900 °C.

Las reacciones que gobiernan el mecanismo son:



Mientras que, en el segundo tratamiento, por encima de 700°C las siguientes reacciones se suman a las anteriores, en las que se forma K metálico. (Pilamonta, 2013)



2.4. Tipos de carbones activados

El carbón activado puede tener forma de gránulos irregulares, polvo, pellets o fibras. Los tres primeros son los más comunes. Aunque los pellets normalmente son cilindros, también se producen con otras formas. En todos los casos, aun cuando la forma física

difiera, el producto básico es el mismo y, por lo tanto, trabaja con el mismo principio. (Sevillano y Torres, 2013)

2.4.1. Carbón activado granular

El carbón activado granular consiste en gránulos de forma irregular que se instalan dentro de un recipiente por el que se hace circular el líquido o gas que va a tratarse. El carbón activado granular se fabrica en diversos rangos de tamaños. Por ejemplo, un 8x30 es un carbón cuyas partículas pasan por la malla 8 pero no por la 30. La especificación de malla que se utiliza con mayor frecuencia es la estándar americana (U.S. Std. Sieve).

Fig. 2-8. Carbón activado granular



Fuente: Clarimex

2.4.2. Carbón activado en polvo

El carbón activado en polvo se define como aquel carbón cuyas partículas pasan a través de la malla 80. Como ejemplo, la norma de la AWWA B600-90 relativa al carbón activado en polvo para el tratamiento de agua señala que 99% debe pasar por la malla 100, 95% debe pasar la 200, y 90% la malla 325. Este rango de tamaños corresponde aproximadamente al del talco. (Sevillano y Torres, 2013)

Fig. 2-9. Carbón activado en polvo



Fuente: Clarimex

2.4.3. Carbón activado pelletizado

El carbón activado puede pulverizarse y posteriormente paletizarse bajo presión o con la ayuda de agentes ligantes, como brea, alquitranes y glucosa, entre otros.

Los pellets suelen ser cilíndricos debido a que normalmente se producen por extrusión. Su principal ventaja consiste en que causan una menor caída de presión que los carbones granulares, cosa que los hace muy útiles en la purificación de aire y otros gases en los que existe una baja presión disponible. Sin embargo, en ocasiones también se aplican en fase líquida. Comercialmente se encuentran en diámetros de 0.8 a 5 mm, siendo el de 4 mm el más común. (Sevillano y Torres, 2013)

Fig. 2-10. Carbón activado pelletizado



Fuente: Clarimex

En el cuadro II-2 se muestra las ventajas y desventajas del carbón activado granular y del carbón activado pulverizado.

Cuadro II-2 Ventajas y Desventajas del carbón activado

CARBÓN ACTIVADO GRANULAR		CARBÓN ACTIVADO PULVERIZADO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Es empleado para la eliminación entre el 80 y 98 % de la contaminación inicial. Quiere decir que puede remover en mayor porcentaje al carbón activado en polvo.</p>	<p>Depende de la variación en la concentración del contaminante para su correcta adsorción. Unos contaminantes pueden fijarse en mayores cantidades que otros y otros contaminantes pueden desplazar a otros ya adsorbidos esto es llamado desorción.</p>	<p>Según el contaminante a remover se puede escoger la dosis a usar para la eliminación de dicho contaminante.</p>	<p>La dosis de carbono depende de la concentración de equilibrio del contaminante residual en el agua. Está involucrada con la pendiente de la isoterma y el porcentaje de remoción del contaminante.</p>
<p>Se puede aprovechar el producto por su propiedad de regeneración.</p>	<p>Puede ser posible la formación de microorganismos en los lechos de carbón activo.</p>	<p>La instalación del carbón activo en polvo es simple, y similar a otros productos que se emplean en el tratamiento del agua.</p>	<p>Puede ser posible la formación de microorganismos en los lechos de carbón activo.</p>
<p>Mayor disponibilidad.</p>	<p>Necesita instalaciones con estructuras más complejas y de mayor costo inicial.</p>	<p>La regeneración es más compleja.</p>	<p>Necesita instalaciones con estructuras más complejas y de mayor costo inicial.</p>

Fuente: (Carrillo, V. Y., & Sanchez Muñoz, N. E., 2013)

2.5. Adsorción

La adsorción es una operación unitaria que consiste en la separación de un componente disuelto en una corriente, gas o líquida, por retención sobre un sólido. Los sólidos adsorbentes requieren de grandes áreas superficiales y una estructura porosa para que el adsorbato ingrese a la superficie. La propiedad de adsorción de los carbones activados está determinada por su estructura porosa y por su naturaleza química, ya que su estructura posee pequeñas cantidades de heteroátomos como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno. Esto permite que el carbón activado retenga las sustancias polares sobre su superficie, ya que los átomos de carbono ubicados en los bordes de los planos presentan una alta actividad disponible, ya que no están saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres. (Parejo, 2015)

Los microporos le proporcionan una gran capacidad y superficie de retención, por el contrario, los mesoporos y macroporos retienen moléculas de gran tamaño, como lo son los colorantes, además de facilitar el ingreso y difusión efectiva de las moléculas al interior del sólido. (Sevilla 2009)

El área superficial del carbón activado está entre 600 y 1200 m²/g, la cual se encuentra en el interior de los poros. Por lo tanto, para que una molécula sea adsorbida, ésta debe migrar a los sitios de adsorción de la partícula. Por lo general, las moléculas polares son adsorbidas con menos rapidez que los compuestos no polares. Por consiguiente, los iones inorgánicos no se adsorben bien si no hay una interacción química específica con un grupo funcional sobre la superficie del carbón o por intercambio de iones. Un factor que determina la velocidad y el grado de adsorción es el tamaño molecular ya que las moléculas grandes no pueden atravesar algunos de los poros pequeños. El efecto del pH sobre la adsorción se atribuye a su efecto en la solubilidad del soluto. Es decir, un compuesto de pH 6 o menos es menos soluble en agua que un compuesto de pH 8 o más, donde presenta influencia aniónica. Las especies cargadas poseen una afinidad mayor por el agua y por ende menor tendencia a almacenarse sobre la superficie del carbón activado. Adicionalmente, la carga negativa de la superficie del carbón

disminuye al disminuir el pH, un factor que incide en la efectividad con que el carbón adsorbe las especies cargadas, en especial los aniones. (Jenkins, 1994)

2.5.1. Tipos de Adsorción

Existen dos tipos de fenómenos de adsorción: Fisisorción y Quimisorción.

2.5.1.1. Adsorción Física o Fisisorción

Es el mecanismo más común, en el cual no hay intercambio de electrones entre el adsorbente y adsorbato, por lo tanto, este procedimiento es reversible ya que se conserva la individualidad del sólido y del adsorbato. Las fuerzas intermoleculares que intervienen en este mecanismo son de tipo dispersas o interacciones de Van Der Waals, las cuales liberan una energía de la magnitud de la entalpía de condensación. Las velocidades de adsorción de esta operación son parcialmente elevadas ya que no se deben romper grandes niveles de energía de activación. Por otro lado, se requiere un consumo energético inferior para regenerar este tipo de adsorbente, puesto que las fuerzas intermoleculares son débiles. (Vilarrasa, 2014)

2.5.1.2. Adsorción Química o Quimisorción

Es un mecanismo irreversible ya que existen modificaciones en la estructura química del adsorbato y del adsorbente, se establecen enlaces químicos sobre los centros activos del sólido, por lo cual se pierde la individualidad del sólido y del adsorbato.

En este caso se producen verdaderos enlaces químicos, entre el adsorbente y el adsorbato, tendiendo el mismo, por lo tanto, a ser un fenómeno irreversible. Al contrario de lo que ocurría con la fisisorción, la quimisorción es específica, teniendo lugar solamente en determinadas zonas que se denominan centros activos. Dado que en la quimisorción se producen verdaderos enlaces químicos, los calores de adsorción son del mismo orden de magnitud que los de las reacciones químicas, entre 83.6 y 418 kJ/mol. Además, es un proceso activado, lo que provoca que se favorezca con el aumento de la temperatura al contrario de la fisisorción que se incrementa a medida que la temperatura disminuye. (Húmpola, 2013)

2.5.2. Ley de Debouguer-Lambert-Beer

Se puede decir que esta ley se trata de un medio o método matemático, el cual es utilizado para expresar de qué modo la materia absorbe la luz. En óptica (Rama de la física que se encarga del estudio de la luz) La ley de Beer afirma que la totalidad de luz que emana de una muestra puede disminuir debido a tres fenómenos de la física, que serían los siguientes:

1. El número de materiales de absorción en su trayectoria, lo cual se denomina concentración.
2. Las distancias que la luz debe atravesar a través de las muestras. Denominamos a este fenómeno, distancia del trayecto óptico.
3. Las probabilidades que hay de que el fotón de esa amplitud particular de onda pueda absorberse por el material. Esto es la absorbencia o también coeficiente de extinción.

En la caracterización del carbón activado es muy importante la ley de la Lambert y Beer, debido a que en la determinación del porcentaje de remoción de azul de metileno se utiliza la espectrofotometría, la cual es una medida cuantitativa de la reflexión o transmisión de una sustancia en función de la longitud de onda, basándose en la absorción de la luz que posee dicha sustancia.

2.6. Características y especificaciones de calidad del carbón activado

Como en el caso de cualquier producto industrial, las distintas propiedades del carbón activado se evalúan a través de métodos analíticos que han sido normalizados por diversas asociaciones. La mayoría de los productores los aplican con el objeto de estandarizar y de permitir al usuario la comparación de las especificaciones de diversos carbones.

La ASTM de Estados Unidos es el organismo cuyos procedimientos de evaluación sigue la mayoría de los fabricantes de carbón activado, Sin embargo, existen otros a los que comúnmente se hace referencia, Entre ellos esta AWWA estadounidense, la DIN de Alemania, entre otras.

En México, la Dirección General de Normas de la secretaria de Comercio y Fomento Industrial ha publicado métodos de análisis oficiales, aunque solo para el caso de carbón activado pelletizado para la industria azucarera. Por su parte, los grandes fabricantes de carbón activado también siguen sus propias técnicas. Aunque aún existen diferencias entre un método y otro, en la mayoría de los casos se parecen entre sí. (Sevillano y Torres, 2013)

2.6.1. Características del Carbón Activado

Las características de un carbón activado pueden ser diversas, para lo cual, el carbón al ser caracterizado debe cumplir ciertas especificaciones que aseguren su calidad.

En el cuadro II-3 se muestran los principales parámetros especificados para carbón activado que se destina al tratamiento de agua. Algunos de estos como el número de yodo, el contenido de cenizas totales, los solubles en agua, la humedad y el pH, se consideran unos de los mas importantes a la hora de caracterizar al carbón activado.

Cuadro II-3. Principales parámetros con los que especifica el carbón activado

Parámetro	Unidades	Rango De Valores Típicos	Ejemplo De Una Norma Que Se Aplica
Numero de yodo	mg/g de carbón	500 a 1200	ASTM D-4607
Área superficial	m ² /g	500 a 1200	Adsorción de N ₂ (método BET) ASTM D-3037
Radio medio de poro y volumen de poro	mm y cm ³	0.7 a 500 y 0.2 a 1	Porosimetría con mercurio y adsorción de N ₂ ASTM C-699
Densidad aparente	g/cm ³	0.26 a 0.65	ASTM D-2854
Dureza	Adimensional	30 a 99	ASTM D-3802
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	Menor a 2.1	ANSI/AWWA B604-90
Contenido de cenizas	% base seca	3 a 15	ASTM D-2866
Solubles en agua	% base seca	0.5 a 7	ASTM D-5029
pH de extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Humedad (al empacar)	%	2 a 15	ASTM D-2867
Longitud de sedimentación	cm	2 a 10	DIN 19603

Fuente: Sevillano y Torres, 2013

2.6.2 Descripción de las especificaciones de calidad del carbón activado

2.6.2.1. Número de yodo y área superficial

El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activado. Esto se debe a que el yodo se adsorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Por lo tanto, la cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área del carbón. Hay que señalar una coincidencia afortunada que consiste en que el número de yodo, que se expresa en mg/g, miligramos de yodo adsorbidos por gramos de carbón, tiene un valor aproximadamente igual al del área superficial obtenida por el método BET de adsorción de N₂. Por otro lado, el número de yodo disminuye en proporción al grado de saturación del carbón activado.

En general, el carbón requiere cambiarse cuando el número de yodo llega al 50% de su valor original; por lo tanto, este parámetro puede utilizarse para estimar el tiempo de vida útil que resta a un carbón en uso. (Sevillano y Torres, 2013)

Según DESOTEC (s.f.), el área superficial se calcula en función al índice de yodo ya que este equivale a más o menos al número de yodo más 100 y el resultado se expresa en m²/g.

2.6.2.2. Área superficial específica BET.

Otro parámetro utilizado para medir la calidad del carbón activado es el área superficial BET, mide la adsorción utilizando la isoterma BET. Esto permite medir la superficie de los poros más finos y la textura interior del grano. La superficie específica se ha utilizado con frecuencia para la caracterización de los diferentes cuerpos sólidos porosos, en el año 1941, un científico llamado Smith, W. R., Thornhill y sus colaboradores presentaron resultados de los fenómenos de adsorción de nitrógeno y yodo en solución acuosa en el carbón activado. (De la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

2.6.2.3. Radio medio de poro

Es función básicamente del tipo de materia prima y se ve poco afectado por las condiciones del proceso. El método analítico para obtener su valor es caro y lento y por

eso no se evalúa con frecuencia, aunque los productores de carbón activado normalmente si reportan su valor. Es una de las variables que más pesan en la selección de un carbón, suele reportarse en nm. (De la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

2.6.2.4. Volumen total de poro

Esta variable se expresa en ml/g y es función tanto del tipo de materia prima, como del grado de activación. Es decir, su valor depende del radio medio de poro y del área superficial del carbón. El método analítico para determinarlo es el mismo que se utiliza en el caso del radio medio de poro y, por las razones ya expuestas, tampoco se evalúa con frecuencia. Al igual que el área superficial y que el número de yodo, es un parámetro indicador de la capacidad de un carbón activado. (Valencia, 1999)

2.6.2.5. Densidad aparente

Es el peso en g/cm^3 de carbón totalmente seco en aire. Es decir, incluye el volumen de los poros y el de los espacios entre las partículas de carbón. Esta variable es la base para determinar el volumen de cama necesaria para contener una determinada masa de carbón activado granular. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesario para lograr un buen retro lavado del carbón. (De la Torre, Iordanov y Muñoz 2004)

2.6.2.6. Dureza

Existen varios métodos para evaluarla, aunque desafortunadamente ninguno de ellos simula las condiciones reales que provocan la erosión y el rompimiento del carbón en las diferentes etapas de su uso, como el transporte y el retrolavado.

La mayoría de los métodos reportan resultados de dureza cuyo valor está entre 0 y 100. El de la ASTM D-3802 consiste en agitar la muestra de carbón junto con balines de acero. Después de 30 min se mide el porcentaje en peso de carbón que queda sobre una malla cuya abertura es lo más cercano posible a la mitad de la abertura de la malla que define el mínimo tamaño de partícula nominal de la muestra original, el resultado se reporta como valor de dureza. (Valencia, 1999)

2.6.2.7. Rango de tamaño de partícula, tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad

El rango de tamaño de partícula es el número de las dos mallas estándar americanas que encuadran todo el rango de partículas que conforman un lote de carbón activado granular. Por ejemplo, 20 x 50 significa que las partículas de carbón pasan por la malla 20 y se retienen en la 50. Normalmente el fabricante especifica que más de 90% de su producto está dentro de dicho rango. Mientras menor es el tamaño de partícula, el carbón activado granular adsorbe con mayor rapidez, aunque ocasiona una mayor caída de presión. La malla 80 suele considerarse como la frontera entre carbón activado granular y carbón activado en polvo. (Pazmiño Ayala, 2007)

Hay que hacer notar que puede haber grandes diferencias entre dos carbones con el mismo rango de tamaño de partícula nominal. Esto se debe a que uno puede tender más hacia los gruesos y el otro hacia los finos, manteniéndose ambos dentro del rango especificado. Para evitar estas diferencias, se especifican otras dos variables que son el tamaño efectivo de partícula y el coeficiente de uniformidad. La primera corresponde a la abertura de la malla por la que pasa 10% del carbón activado granular y se expresa en mm o en pulgadas; la segunda es el resultado de dividir la abertura de la malla por la que pasa 60% del carbón entre la abertura de la malla por la que pasa 10%, y es adimensional. (Carrillo, 2015)

En cuanto al tamaño efectivo de partícula, no se especifica un rango si no que se deja abierto para cada caso, puesto que depende de la presión disponible para el flujo y de la necesidad o no de que el carbón activado granular realice una función de filtración.

2.6.2.8. Contenido de cenizas totales

Son el residuo que queda después de calcinar el carbón a 650 °C, hasta llegar a peso constante, y se expresan en términos de porcentaje en base seca. La cantidad y composición de las mismas puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado. Es posible disminuir su presencia en el carbón mediante lavados con ácido, lo que se hace en el caso de procesos que se ven afectados por ellas. Como

ejemplo está el carbón activado granular que se utiliza en la recuperación de solventes del aire. Al tener un menor contenido de cenizas, aumenta su temperatura de ignición, disminuyendo el riesgo de que ésta suceda, debido a que las cenizas son óxidos de sodio, potasio y de otros metales, que actúan como chispa y provocan la ignición de la cama de carbón saturado. En el caso del tratamiento de agua, la desventaja fundamental de las cenizas consiste simplemente en que mientras mayor es su porcentaje, menor es la cantidad de carbón realmente efectivo. (García, 2013)

2.6.2.9. pH Del extracto acuoso

Los solubles en agua pueden tener carácter ácido o básico. Por ejemplo, en el caso de un carbón que se activa con ácido fosfórico, el producto que sale del proceso de fabricación tiene fosfatos que al disolverse en agua se convierten en ácidos y por lo tanto disminuyen el pH. En otro ejemplo, un carbón activado de concha de coco, aunque se activa con vapor de agua y sin la intervención de reactivos químicos, contiene sodio y potasio en forma de óxidos, que provienen de la misma materia prima; al disolverse en agua, éstos forman hidróxidos que aumentan el pH de la misma. Si el pH del extracto acuoso es igual al del agua que va a tratarse, no ocurre alteración en esta última. Cuando es diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros tratados; sin embargo, en algunas aplicaciones es inaceptable esta variación. Para estos casos, algunos fabricantes ofrecen carbones con valores de pH similares al del líquido que va a tratarse. En su defecto, el usuario puede agregar un ácido o un álcali e inundar al carbón activado granular en agua hasta lograr el pH requerido, o bien, puede lavar el carbón hasta eliminar los solubles que modifican el pH; este último método puede llegar a requerir grandes volúmenes de agua. (Oudenne, 1990)

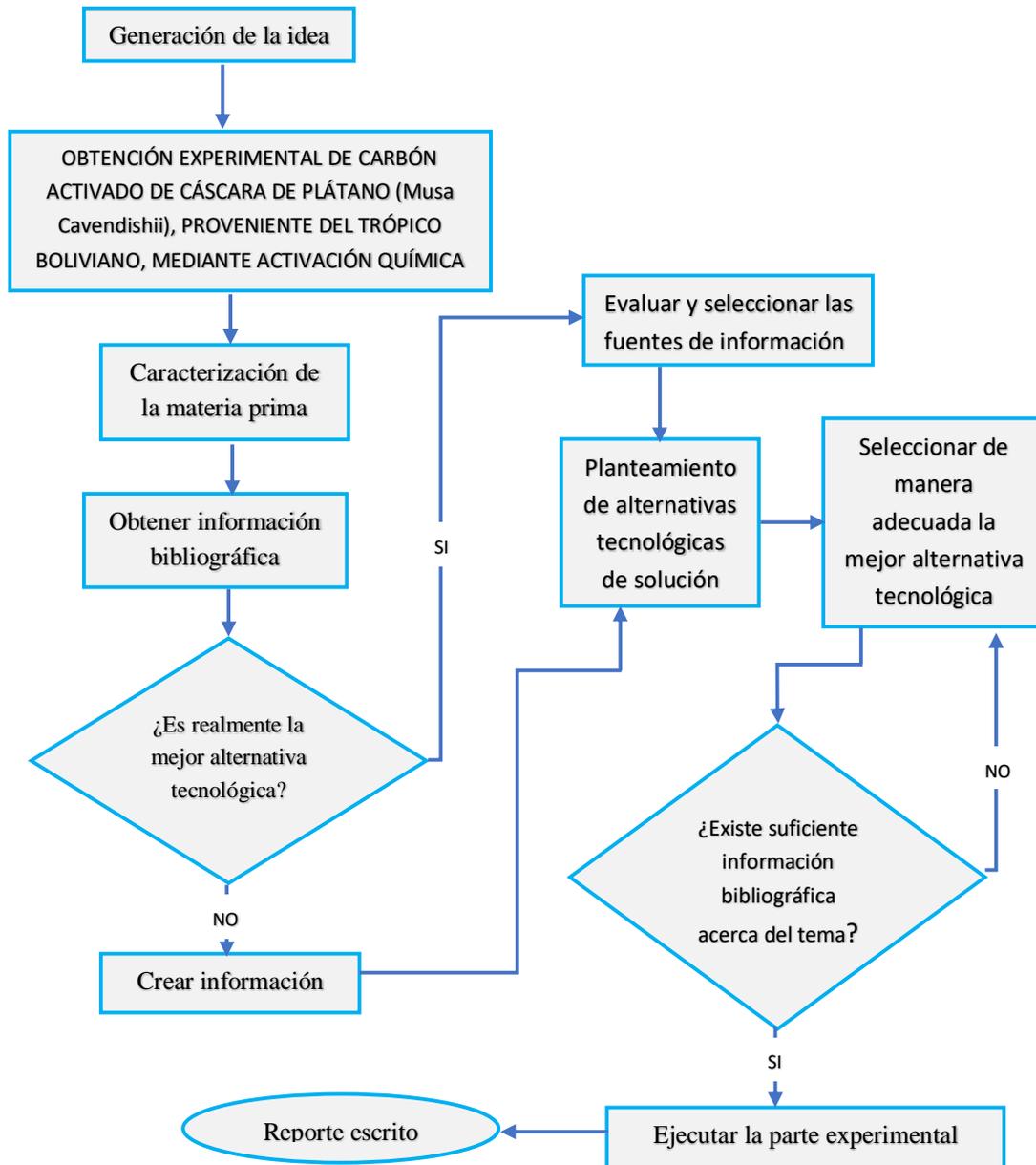
CAPÍTULO III
PARTE EXPERIMENTAL

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.

3.1. Descripción conceptual y esquemática de la metodología del estudio

Los pasos a seguir para la realización del estudio se detallan a continuación en la figura 3-1.

Fig. 3-1. Esquema de la metodología del estudio del proyecto



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.1. Selección del proceso tecnológico industrial

Señalando los métodos de activación del carbón activado en el capítulo II, se procede a realizar tablas con las alternativas para la selección del método de activación que se aplicará, para esto se asigna una calificación de acuerdo a una escala predeterminada del 1 al 5.

En la tabla III-1 se observa las calificaciones ponderadas, siendo el proceso adecuado aquel que acumule el mayor puntaje.

Tabla III-1 Escala de Calificación.

CALIFICACIÓN	
Escala de Puntuación	Puntuación
Deficiente	1
Adecuado	3
Bueno	4
Muy bueno	5

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

En el cuadro III-1 se observa los criterios que serán evaluados y el porcentaje que tendrá cada uno sobre el resultado final

Cuadro III-1 Criterio de evaluación

CRITERIO EVALUADO	%	COMENTARIO DEL EVALUADOR
Aplicabilidad del método	5	Los métodos de obtención de carbón activado son físicos o químicos, en el primer caso es un proceso térmico empleando una corriente gaseosa de dióxido de carbono, aire o vapor de agua como activante y en el segundo caso es también un proceso térmico donde se emplean como activantes reactivos químicos como ácido fosfórico, hidróxido de potasio y cloruro de zinc entre otros.
Generación de Residuos	10	En todos los métodos se generarán residuos.
Confiabilidad del método	5	El método más utilizado con diferentes materias primas a excepción de la madera es el método químico ya que es muy bueno para trabajar con materias primas orgánicas.
Costo	30	Inversión, costos de operación y mantenimiento, costo de energía y agua.
Operación	20	Flexibilidad de operación, confiabilidad del proceso y complejidad de operación del proceso.
Rendimiento	10	El rendimiento por el método de activación química es mucho mejor que el de la activación física, además que es muy efectiva utilizando materias primas orgánicas, como lo es la cáscara de plátano.
Calidad	10	Los carbones activos con más calidad, fueron obtenidos mediante activación química.
Entorno e Impacto al Medio Ambiente	5	La activación física del carbón es contaminante con gases como el CO ₂ , mientras que la activación química puede generar contaminación en el agua, aunque este impacto se puede reducir haciendo la recuperación del agente activante.
Disponibilidad de Equipamiento	5	Se tiene más disponibilidad de equipamiento para realizar el método químico, ya que para el método físico se necesitan equipos que trabajen a temperaturas muy elevadas.
Total	100	

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

A continuación, se tiene la tabla II-2 de la selección del método experimental de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano, donde se califica los

critérios evaluados a cada método y se le asigna un porcentaje, para luego ser sumado y determinar cuál es el mejor método mediante el mayor porcentaje.

Donde:

A = Calificación

B = A / puntuación mas alta

C = PORCENTAJE (%) * B

Tabla III-2 Selección del método experimental para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano

CRITERIO EVALUADO	%	MÉTODOS DE ACTIVACIÓN					
		Método de Activación Química			Método de Activación Física		
		A	B	C	A	B	C
Aplicabilidad del método	5	4	0.8	4	4	0.8	4
Generación de Residuos	10	3	0.6	6	3	0.6	6
Confiabilidad del método	5	5	1	5	3	0.6	3
Costo	30	5	1	30	3	0.6	18
Operación	20	3	0.6	12	5	1	20
Rendimiento	10	4	0.8	8	5	1	10
Calidad	10	5	1	10	4	0.8	8
Entorno e Impacto al Medio Ambiente	5	1	0.2	1	1	0.2	1
Disponibilidad de Equipamiento	5	5	1	5	1	0.2	1
Total	100			81		71	

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Tomando en cuenta los criterios evaluados en la tabla III-2, podemos observar que el método que se va emplear para el presente proyecto es el adecuado.

La puntuación total para cada alternativa se calcula como la suma de los productos de la puntuación por la ponderación o peso relativo. De acuerdo a la tabla presentada anteriormente se observa que la activación química tiene mayor ponderación final respecto a la activación física para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano, además de contar con las condiciones y equipos en laboratorio de operaciones unitaria (LOU) de la UAJMS.

Como en la activación química existen diferentes agentes activantes se debe seleccionar el agente activante más adecuado para el proyecto, esta selección se encuentra realizada en la tabla III-3.

Donde:

A = Calificación

D = (Peso relativo (%) * A) / 100

Tabla III-3. Selección del reactivo activante para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano

Factores	Peso Relativo (%)	Alternativas					
		ZnCl ₂		H ₃ PO ₄		H ₂ SO ₄	
		A	D	A	D	A	D
Eficiencia	40	8	3.20	9	3.60	5	2
Disponibilidad	30	7	2.10	10	2.70	5	1.50
Costo	15	8	1.20	9	1.35	6	0.90
Impacto Ambiental	15	3	0.45	7	1.05	2	0.30
puntuación Final			6.95		8.70		4.70

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De acuerdo a los valores obtenidos de la tabla III-3, se observa que el H₃PO₄ tiene mayor puntuación final con respecto a las otras alternativas.

Es así que se decide usar el H_3PO_4 ya que tiene mayor eficiencia en materias primas que contiene lignocelulosa (materia seca vegetal), como la cáscara de plátano, además tiene un costo económico bajo y de fácil disponibilidad en el mercado, con un impacto ambiental relativamente bajo en comparación de las otras alternativas.

3.1.2. Proceso tecnológico industrial de la obtención de carbón activado mediante activación química

El proceso de obtención de carbón activado mediante activación química a nivel industrial se divide en dos procesos, el proceso de carbonización y el proceso de activación.

3.1.2.1. Proceso de carbonización

Cuando se utiliza como materia prima un material orgánico como madera o cáscara de fruta, el proceso debe comenzar con su carbonización. Las materias primas que se procesarán durante horas se almacenarán en una tolva, que alimentará las materias primas al horno rotatorio a través de un transportador de tornillo. Según las recomendaciones de los expertos, se elegirá la duración de horas porque a mayor tiempo, el tamaño de la tolva será muy grande, lo que aumenta el costo y dificulta la viabilidad técnica de la instalación de la tolva de gran altura. El material de ingreso del a la tolva se pasará a través de una cinta transportadora, el bloque se cargará con trozos de madera, aserrín o cascará de fruta, usando una mesa de acumulación de material, el cual será cargada manualmente desde el camión de transporte que operará en la planta. (Sevillano, 2013)

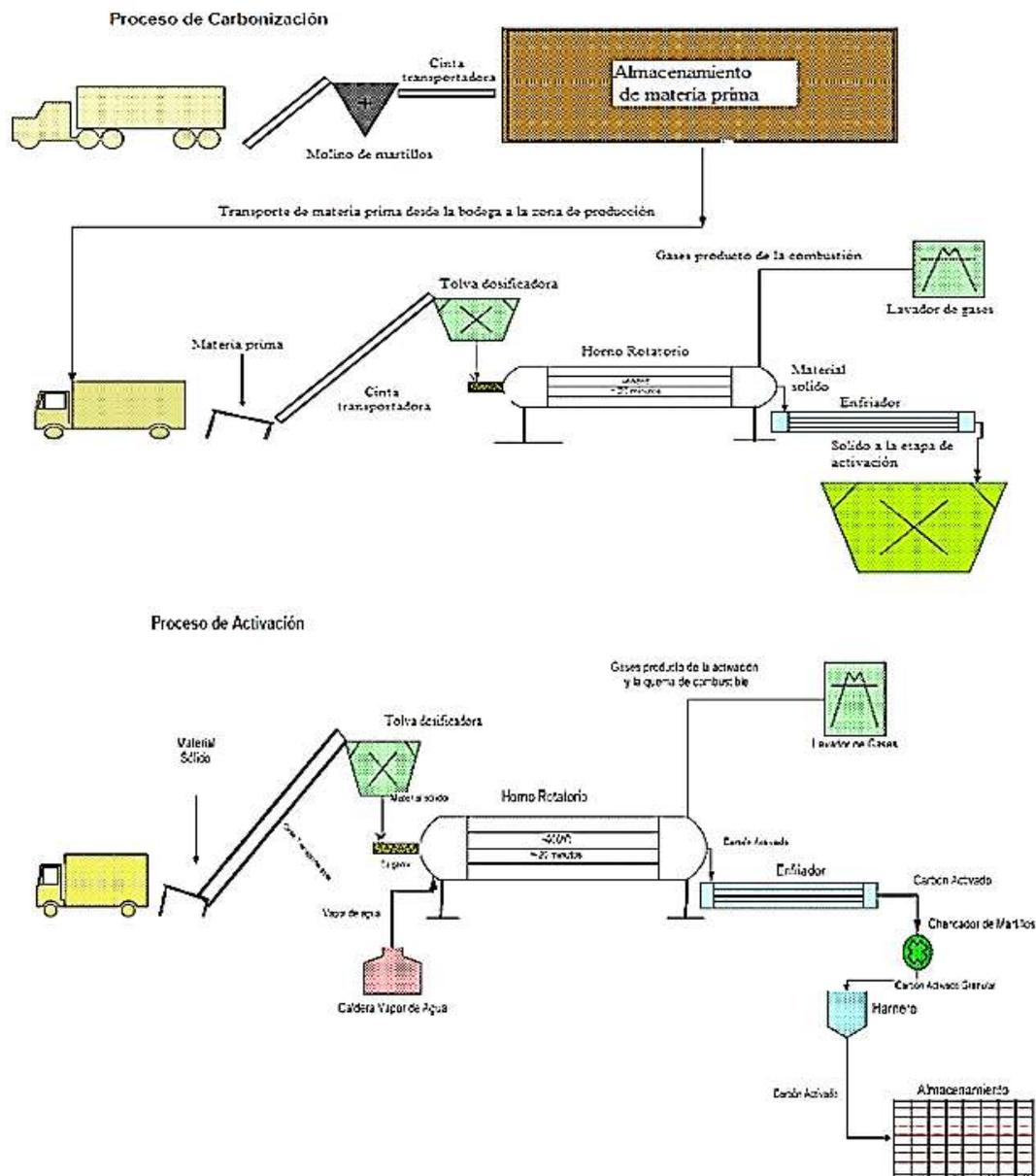
3.1.2.2. Proceso de activación

En una planta productora de carbones activos por el método de activación química utilizando como precursor ácido fosfórico a partir de madera aserrín o cascará de frutas se realiza lo siguiente; la materia prima carbonizada es mezclada con H_3PO_4 (proporción 1,4 g. H_3PO_4 /gramos precursor, como mínimo) y entra a un horno rotatorio, con atmósfera inerte, en el cual existe un gradiente de temperaturas de 100 – 200 °C a 400 – 500 °C de temperatura final, y manteniéndola esta temperatura en torno

a una hora. El carbón activo obtenido es lavado para recuperar el ácido para su reutilización, seguido de una etapa de secado y posterior etapa de separación en distintas granulometrías. El H_3PO_4 sobrante, se separa y recircula. (Sevillano, 2013)

En la figura 3-2 se observa el proceso de obtención de carbón activado a escala industrial.

Fig. 3-2. Proceso de obtención de carbón activado mediante activación química



Fuente: Sevillano, 2013

3.1.3. Diseño factorial

El diseño de experimentos puede definirse como un proceso que consiste en plantear los pasos necesarios que se deben seguir, así como el orden de estos, para una recolección y posterior análisis de la información que requiere estudiar un problema de investigación. Su objetivo es el de obtener el máximo de información requerida por el experimento con el mínimo coste y la máxima eficiencia. Un buen diseño es aquel que es capaz de proporcionar exactamente el tipo de información que se busca, con precisión, y es más eficiente cuando proporciona esta información con un número menor de datos. (Cruz, 2016)

La experimentación juega un papel fundamental en todos los campos de la investigación y el desarrollo, el objetivo de la experimentación es obtener información de calidad y confiable. Información que debe permitir el desarrollo de nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema y tomar decisiones sobre cómo optimizarlo, además de comprobar hipótesis científicas, etc. (Cruz, 2016)

Para el desarrollo de la presente investigación se plantea un diseño factorial 2^3 , es decir de 3 factores, 2 niveles y 2 repeticiones, y sobre esto se evalúa la variable respuesta.

El número de experiencias (N_{exp}) a realizar esta expresado por la siguiente ecuación:

$$N_{exp} = (2^3) \times 2 = 16 \quad (1)$$

Eso quiere decir que, serán 8 experimentos y cada uno con su repetición, lo que suman 16 números de experimentos.

Los valores tomados para los factores, fueron determinados según el rango de valores que se encontró en bibliografía.

Por lo tanto, en la Tabla III-2 podemos apreciar los niveles de los factores que van a intervenir en la variable respuesta.

Cuadro III-2. Niveles y Factores que Intervienen

FACTORES	NIVELES	
	Max	Min
Tiempo de carbonización o activación (Variable 1)	$t_2=2$ h	$t_1=1$ h
Concentración de H_3PO_4 (%v/v) (variable 2)	$C_2=45\%$	$C_1=40\%$
Temperatura de carbonización (Variable 3)	$T_2=500$ °C	$T_1=600$ °C

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

En la Tabla II-9 podemos observar los niveles en notación geometría con los parámetros de estudio de los factores.

Tabla III-4. Matriz de experimentos, plan de experimentos

Prueba	Matriz de experimentos			Plan de experimentación		
	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Tiempo (h)	Concentración (H_3PO_4) (%)	Temperatura (°C)
1	-	-	-	1	40	500
2	+	-	-	2	40	500
3	-	+	-	1	45	500
4	+	+	-	2	45	500
5	-	-	+	1	40	600
6	+	-	+	2	40	600
7	-	+	+	1	45	600
8	+	+	+	2	45	600

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El dominio experimental de una variable continua se expresa con los valores mínimo y máximo que puede tomar, y se le asigna la notación codificada: (-) nivel inferior, (+)

nivel superior. A partir de este punto se les da una codificación a las muestras para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano, de acuerdo a la tabla III-5.

Tabla III-5. Codificación de los experimentos de obtención de carbón activado

Muestra	Plan de Experimentación		
	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)
E 1-1	1	40	500
E 2-1	2	40	500
E 3-1	1	45	500
E 4-1	2	45	500
E 5-1	1	40	600
E 6-1	2	40	600
E 7-1	1	45	600
E 8-1	2	45	600
E 1-2	1	40	500
E 2-2	2	40	500
E 3-2	1	45	500
E 4-2	2	45	500
E 5-2	1	40	600
E 6-2	2	40	600
E 7-2	1	45	600
E 8-2	2	45	600

Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.1.4. Variables dependientes

- Índice de yodo
- Área superficial en función al índice de yodo.
- % de remoción del azul de metileno.
- Densidad aparente

3.1.5. Variables independientes

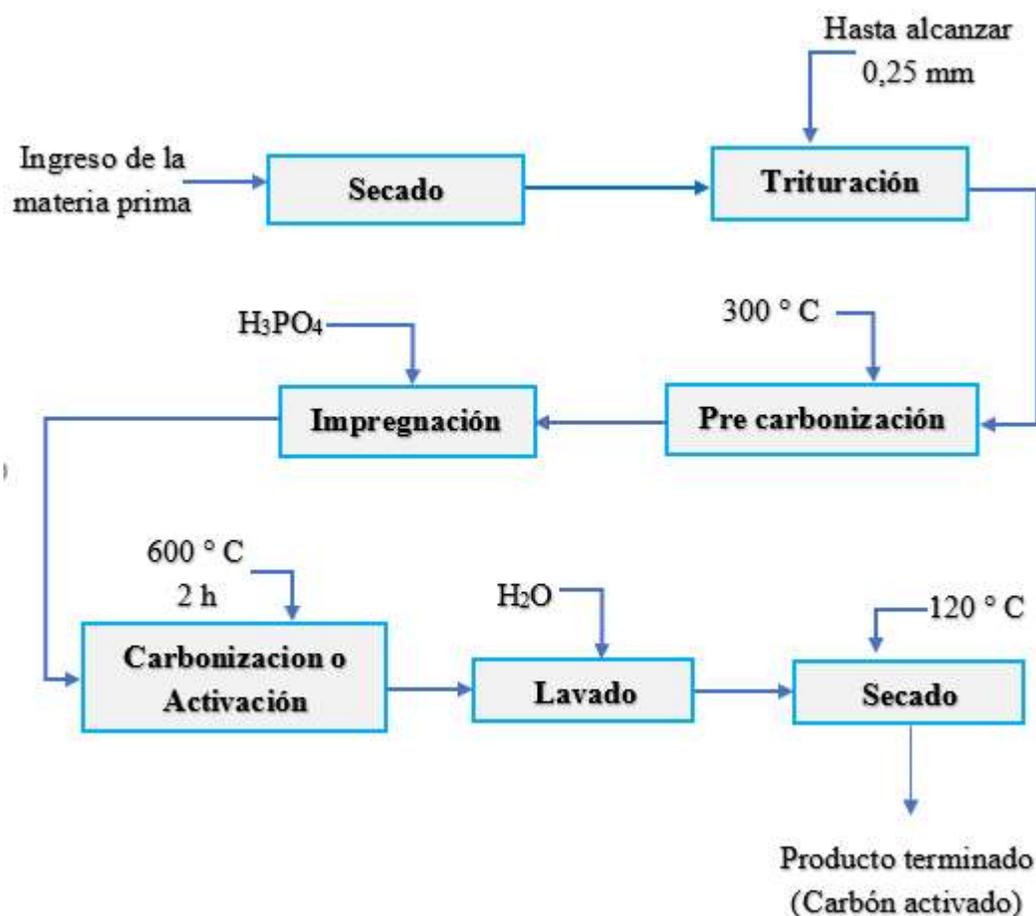
- Tiempo de carbonización o activación.
- Concentración de ácido fosfórico.
- Temperatura de carbonización o activación.

3.2. Diseño del método experimental seleccionado

Para la obtención carbón activado de cáscara de plátano se describirá cada proceso con detalle para la recopilación de datos necesarios y para la comprensión de las medidas que se debe tomar en cuenta en la parte experimental. Siendo una de las partes fundamentales para este presente proyecto.

En la figura 3-3, podemos observar los procesos que se van a realizar durante la parte experimental para obtención de carbón activado a partir de cas cara plátano, mostrando con claridad los parámetros que se tomarán en cuenta en cada proceso.

Fig. 3-3. Diagrama de bloques del proceso de obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia con datos de la bibliografía, 2021.

3.3. Recepción de la materia prima

La materia prima que se utilizó en el estudio, es la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*) procedente del trópico boliviano.

En la figura 3-4 se muestra la cáscara de plátano recolectada de la planta liofilizadora de frutas de Villa Tunari, ubicada en la provincia Chapare del departamento de Cochabamba.

Fig. 3-4. Materia prima, cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.4. Caracterización de la materia prima

3.4.1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano

El análisis de humedad de la cáscara de plátano, se realizó en un secador de infrarrojos de marca Sartorius (ver anexo 1), como se muestra en la figura 3-5.

Fig. 3-5. Secador de infrarrojos



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.4.1.1. Procedimiento para realizar el análisis de humedad

Se realizaron los siguientes pasos:

- ✚ Se encendió el secador, luego se taró el platillo receptor de muestras del equipo.
- ✚ Se colocaron 6 gramos de materia prima a analizar en el platillo receptor.

- ✚ Se programó el análisis a una temperatura de 105 °C y el secado hasta peso constante.
- ✚ Una vez finalizado el análisis se procedió a anotar el dato requerido.

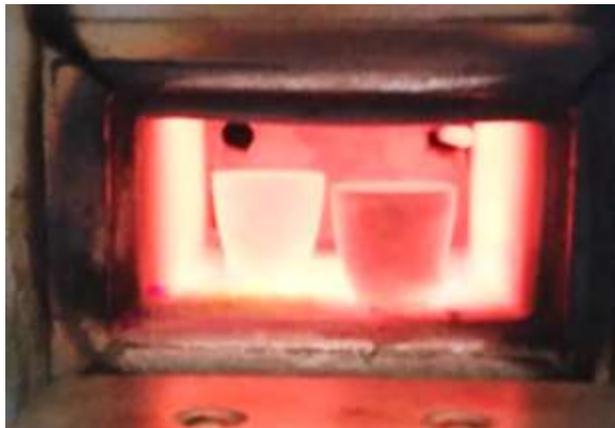
3.4.2. Determinación de cenizas de la cáscara de plátano

3.4.2.1. Procedimiento para realizar el análisis de cenizas

De acuerdo a la norma de la American Society for Testing and Materials (Norma ASTM D 3174 – 04) se realizó el siguiente proceso. Se realizarán los siguientes pasos:

- ✚ Se pesa el crisol en una balanza y se anota el dato.
- ✚ Se lleva el peso del crisol a cero.
- ✚ Se pesa 2 g de la muestra (cáscara de plátano) en crisol.
- ✚ Se introduce el crisol con la muestra a la mufla, a una temperatura de 700 °C durante 60 min, como se observa en la figura 3-6.

Fig. 3-6. Determinación de cenizas



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Finalizado el tiempo, se retira el crisol con la muestra de la mufla.
- ✚ Se coloca el crisol dentro de un desecador hasta que su temperatura descienda a la temperatura ambiente.
- ✚ Posteriormente se pesa el crisol con la muestra y se registra el dato.

El porcentaje de cenizas se calculó de la siguiente manera:

$$\text{cenizas}(\%) = \left[\frac{(A-B)}{C} \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde:

A= Masa del crisol y residuos de ceniza en gramos.

B= Masa del crisol vacío, en gramos.

C= Masa de la muestra utilizada en el análisis, en gramos.

3.4.3. Determinación del material volátil de la cáscara de plátano

3.4.3.1. Procedimiento para realizar el análisis de determinación de material volátil

Para la determinación de materia volátil se emplea la metodología propuesta por Council for Mineral Technology, 1987. (Jerez, 2014). Consiste en obtener el contenido de volátiles relacionando el peso de la muestra, el peso del crisol y el peso de la muestra tratada según el siguiente procedimiento.

- ✚ Calentar un crisol con su tapa como se muestra en la figura 3-7, por 30 minutos en una mufla a 650 °C, transcurrido este tiempo apagar la misma y esperar a que baje la temperatura a 150 °C.

Fig. 3-7. Determinación del material volátil



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Abrir la mufla y con ayuda de las pinzas, retirar los crisoles y colocarlos en el desecador hasta temperatura ambiente.
- ✚ Se pesa el crisol con su tapa en una balanza analítica y se registra el peso denominado “B”.
- ✚ Se procede a pesar 2 gramos de muestra (cáscara de plátano), determinándose “C” y luego se introduce al desecador.
- ✚ Se introduce el crisol con su tapa y la muestra a la mufla a 650 °C por 7 minutos, transcurrido este tiempo se apaga la mufla y se espera a que baje la temperatura a 150 °C.
- ✚ Sacar el crisol con la muestra de la mufla con ayuda de las pinzas. Dejar enfriar en el desecador hasta la temperatura ambiente y pesar transcurrido un tiempo no mayor de 2 minutos.
- ✚ Registrar el peso del crisol con la muestra y su tapa, denominada “A”, para obtener la cantidad de volátiles.

El porcentaje de materia volátil se calculó de la siguiente manera:

$$Materia\ volátil\ (\%) = \left[\frac{(A-B)}{c} \right] \times 100 \quad (3)$$

Dónde:

A= peso de la cápsula y residuo, en gramos.

B= peso de la cápsula vacía, en gramos

C= peso inicial del material precursor usado para el análisis, en gramos

3.4.4. Determinación del carbón fijo en la cáscara de plátano

3.4.4.1. Procedimiento para la determinación de carbón fijo

Para la determinación del carbón fijo se procederá de acuerdo a la norma de la American Society for Testing and Material (Norma ASTM D-3172).

El contenido de carbón fijo en cáscara de plátano, se determinará por diferencia una vez conocidas la humedad, las cenizas y las materias volátiles.

$$\%CF=100\%-(\%MV+\%CC) \quad (4)$$

Dónde:

%CF= Porcentaje de Carbono fijo

%MV= Porcentaje de Materia volátil

%CC= Porcentaje de Contenido de cenizas

3.5. Procedimiento para la obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano (Musa Cavendishii)

3.5.1. Secado de la cáscara de plátano

El secado de la cáscara de plátano, se realizó en una estufa de secado por convección, perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias (LOU), como se observa en la figura 3-8, de acuerdo al siguiente procedimiento.

Fig. 3-8. Secado de la cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.1.1. Procedimiento para el secado de la cáscara de plátano

- ✚ Pesar la cáscara de plátano que se va a secar.
- ✚ Medir la humedad de la cáscara de plátano con el secador de infrarrojo para tomar nota de la humedad inicial.
- ✚ Colocar papel antiadherente sobre las rejillas de la estufa.

- ✚ Colocar la cáscara de plátano sobre las rejillas y realizar el secado a una temperatura de 50 °C.
- ✚ Medir la humedad de la cáscara de plátano en el secador de infrarrojos hasta que la humedad sea aproximadamente cero.

3.5.2. Trituración y tamizado de la cáscara de plátano

La trituración de la cáscara de plátano seca, se realizó en dos molinos, primero en el molino de tornillo para que la cáscara quede en trozos pequeños y posteriormente se trituró en el molino de martillos para tener una trituración más fina. Estos dos molinos pertenecen al laboratorio de operaciones unitarias (LOU) y pueden ser observados en la figura 3-9.

Fig. 3-9. Trituración de la cáscara de plátano con el molino de tornillo y molino de martillos



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.2.1. Procedimiento para la trituración

- ✚ Se tritura la cáscara de plátano seca en el molino de tornillo.
- ✚ Se recolecta el triturado en una bandeja.
- ✚ El recolectado de la trituración se coloca lentamente al molino de martillos.
- ✚ Al finalizar la trituración se recolecta el triturado final en un contenedor con tapa.

3.5.2.2. Procedimiento para el tamizado

En la trituración se obtiene diferentes granulometrías de cáscara de plátano, el tamizado se realiza en un tamiz de marca ORTO-ALRESA con un juego de mallas: 1; 0,5; 0,25; 0,063 mm y bandeja de recepción de muestra, mostrados en la figura 3-10.

Fig. 3-10. Tamizado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para el tamizado se realiza el siguiente procedimiento:

- ✚ Colocar la cáscara de plátano previamente triturada en el primer tamiz.
- ✚ Programar el equipo en una velocidad de 4 rpm y en un tiempo de 15 minutos.
- ✚ Encender el equipo y esperar que finalice el tiempo programado.
- ✚ Recolectar la cáscara de plátano de la malla de 0,25 mm, como se muestra en la figura 3-11, para realizar el siguiente proceso de impregnación.

Fig. 3-11. Malla de 0,25 mm



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.3. Pre-carbonización de la cáscara de plátano

La pre-carbonización se la realizó en la mufla perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias (LOU).

3.5.3.1. Procedimiento para la pre-carbonización de la cáscara de plátano

- ✚ Se coloca la cáscara de plátano dentro de crisoles con tapa.
- ✚ Prender la mufla a razón de 10 °C/min.
- ✚ Introducir con ayuda de unas pinzas los crisoles tapados dentro la mufla cuando este alcance los 100 °C.
- ✚ Se pre-carboniza a una temperatura de 300 °C por 20 minutos.
- ✚ Una vez que la cáscara pre-carbonizada es sacada de la mufla, es colocada en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.
- ✚ Recolectar la cáscara pre-carbonizada en una bolsa plástica con cerrado hermético, para que no absorba la humedad del ambiente, como se muestra en la figura 3-12.

Fig. 3-12. Cáscara de plátano pre-carbonizada



Fuente: Elaboración propia, 2022

3.5.4. Impregnación

Para la etapa de impregnación de la cáscara de plátano previamente carbonizada se utilizó como agente activante el ácido fosfórico con una concentración del 80%, posteriormente por bibliografía se vio por conveniente diluir el agente activante, obteniendo dos concentraciones diferentes, al 40% y 45% para realizar la impregnación.

La impregnación se realizó aplicando una relación 1:3 p/v, ya que según datos bibliográficos esta relación es la más adecuada para la obtención de carbón activado a partir de desechos orgánicos como la cáscara de plátano. En la figura 3-13, se observa la cascara pre-carbonizada junto con el agente activante.

Fig. 3-13. Impregnación



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.4.1. Procedimiento para la impregnación

- ✚ Pesar 10 g de cáscara de plátano previamente pre-carbonizada.
- ✚ En un vaso de precipitado de 100 ml se colocan los 10 g de cáscara de plátano pre-carbonizada, adicionar el ácido fosfórico al 40% y 45% dependiendo del número de experimento a realizar, en una relación 1:3 p/v respectivamente.
- ✚ Dejar la mezcla en reposo durante 24 horas con agitación de manera ocasional.
- ✚ Pasado el tiempo de impregnación separar el exceso del agente activante de la cáscara de plátano pre-carbonizada, para posteriormente introducir la muestra en los crisoles

Nota: El exceso del agente activante es separado de la cáscara de plátano pre-carbonizada mediante una filtración al vacío, como se observa en la figura 3-14, ya que según pruebas preliminares se observó que es la mejor manera de separar el agente activante de la cáscara de plátano pre-carbonizada.

Fig. 3-14. Separación del agente activante



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.5. Carbonización y activación

La carbonización y activación se realizó en la mufla (ver anexo 1) perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la universidad.

Fig. 3-15. Carbonización

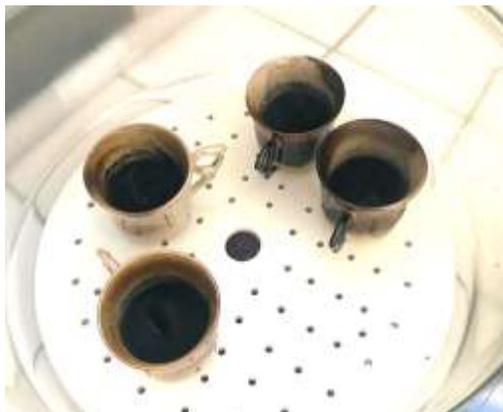


Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.5.1. Procedimiento para la impregnación

- ✚ Colocar el crisol limpio y seco por media hora a 500 °C para eliminar toda humedad.
- ✚ Sacar de la mufla utilizando unas pinzas y llevar a enfriar en un desecador a temperatura ambiente.
- ✚ Pesar el crisol en una balanza analítica y registrar el dato.
- ✚ Adicionar la cáscara de plátano previamente impregnada con ácido fosfórico
- ✚ Posteriormente pesar el crisol con la cáscara de plátano previamente impregnada con ácido fosfórico y registrar el dato.
- ✚ Introducir el crisol a la mufla para su activación, siendo el valor de la temperatura y el tiempo de activación, según el plan de experimentos.
- ✚ Pre enfriar en la mufla apagada hasta que alcance una temperatura de 100 °C.
- ✚ Utilizando unas pinzas se transfirió el crisol a un desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente, como se observa en la figura 3-16.
- ✚ Pesar el crisol en una balanza analítica y registrar el dato.

Fig. 3-16. Carbón activado obtenido



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.6. Lavado

El lavado se realizó en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias (LOU).

3.5.6.1. Procedimiento para el lavado

- ✚ Introducir el carbón activado en los vasos de precipitado y agitar con una varilla de vidrio constantemente
- ✚ Cortar papel filtro Whatman 42 según el tamaño del embudo a utilizar y pasar el carbón al embudo y comenzar a lavar y filtrar al vacío con agua destilada, como se aprecia en la figura 3-17.

Fig. 3-17. Lavado de carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2022

- ✚ Se procede a medir el pH del agua de lavado después de la tercera lavada, éste debe alcanzar el pH 7.
- ✚ Si después de la tercera lavada no se alcanza el pH 7 se neutraliza con hidróxido de sodio 0,15 N.
- ✚ Lavar finalmente con agua destilada y medir el pH obtenido, como se muestra en la figura 3-18.

Fig. 3-18. pH del lavado del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.5.7. Secado

3.5.7.1. Procedimiento para el secado

- ✚ Colocar el carbón activado obtenido del paso anterior en cápsulas de aluminio.
- ✚ Precalear la estufa a una temperatura de 80 °C
- ✚ Colocar las cápsulas en la estufa, como se muestra en la figura 3-19, durante un tiempo de 24 horas.

Fig. 3-19. Secado de carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

✚ Pasado este tiempo sacar de la estufa y enfriar.

3.6. Caracterización del producto obtenido

3.6.1. Determinación del índice de azul de metileno

Para la preparación de las soluciones de calibración y la de análisis, se compró azul de metileno al 1% del CEVITA (centro vitivinícola Tarija), tomando en cuenta los procedimientos de Zenteno, 2009; García y Granillo, 2017; Mamani, 2021 y Test methods for activated carbon, 1986. (Anexo 5)

3.6.1.1. Procedimiento para la determinación de la curva de calibración de la solución de azul de metileno

Se prepara un blanco de agua destilada de 50 ml y una serie de estándares de A.M. de en concentraciones variables de (0.5-4) mg/l, como se observa en la figura 3-20.

Fig. 3-20. Escala de color para la curva de calibración



Fuente: Elaboración propia, 2022

- ✚ Se enciende el espectrofotómetro 15 min antes de ser usado, posteriormente se selecciona el modo, la longitud de onda de 665 nm y se lee el blanco.
- ✚ Se transfiere la muestra a la celda y se lee la absorbancia a 665 nm según datos de bibliografía y se repite este paso hasta terminar las muestras.
- ✚ Hacer una gráfica con los valores de la curva de calibración.

Fig. 3-21. Espectrofotómetro



Fuente: Elaboración propia, 2022

3.6.1.2. Procedimiento para la decoloración de la solución de azul de metileno para determinar el porcentaje de remoción

Para la realización de la decoloración de azul de metileno se utilizó la solución que se preparó en la curva de calibración de 3 mg/l la cual se puede observar en la Fig. III-20 de acuerdo al siguiente procedimiento:

- ✚ Pesar 2 gramos de carbón activo en una balanza analítica.
- ✚ Secar la muestra de carbón activo a 105 ° C.
- ✚ Enfriar en un desecador por 1 h.
- ✚ Sumergir 0.1 g de carbón activado en 25 ml de solución, como se muestra en la figura 33-22.

Fig. 3-22. Adición de la solución de A.M. al carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Agitar constantemente por 15 minutos.
- ✚ Utilizando un papel filtro Whatman 42 y un embudo filtrar la muestra, como se muestra en la figura 3-23.

Fig. 3-23. Filtrado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Medir la absorbancia a 665 nm en un espectrofotómetro.

Fig. 3-24. Medición de la absorbancia



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.6.2. Determinación del índice de Yodo

Para la determinación del índice de yodo de los carbones activados obtenidos de cáscara de plátano se tomó como referencia la normativa (ASTM D4607-14) (Anexo 2) y la norma (AWWA B 600-78) (Anexo 3).

3.6.2.1. Procedimiento de la determinación del índice de yodo

- ✚ Secar 2 gramos de carbón activado a 145 ° C por 1 hora.
- ✚ Pesar 1,5 gr de carbón activado aproximadamente en un Erlenmeyer de 250 ml.
- ✚ Añadir 10 ml de ácido clorhídrico HCl al 5% y realizar movimientos giratorios al Erlenmeyer hasta que todo el carbón activado se haya humedecido uniformemente.
- ✚ Colocar el Erlenmeyer en un calentador, como se aprecia en la , esperar que llegue a ebullición y mantenerlo así durante 30 segundos exactamente.

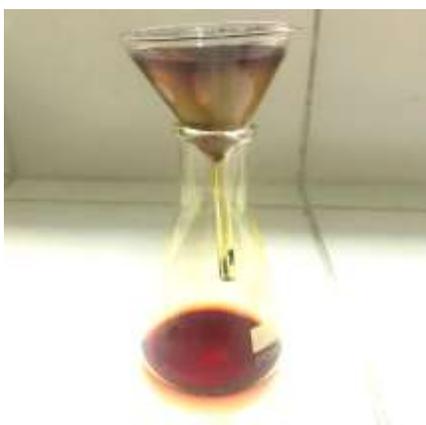
Fig. 3-25. Ebullición del HCl



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- + Dejar enfriar el Erlenmeyer hasta llegar a temperatura ambiente y añadir mediante pipeta volumétrica 100 ml de la solución estándar de yodo 0,1 N.
- + Tapar inmediatamente el Erlenmeyer y comenzar a agitar vigorosamente durante 30 segundos.
- + Colocar un papel filtro Whatman 42 en el embudo y filtrar la solución, como lo muestra la figura 3-26.

Fig. 3-26. Filtrado de la solución

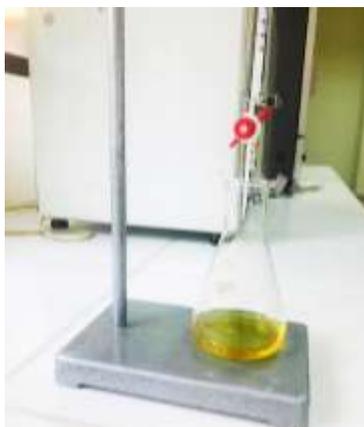


Fuente: Elaboración propia, 2022.

- + Descartar los primeros 20 ml a 30 ml del filtrado y recoger el resto del filtrado en un Erlenmeyer.

- ✚ Pipetear 50 ml del filtrado final y colocarlo en un Erlenmeyer.
- ✚ Llenar las buretas con tiosulfato de sodio 0,1 N.
- ✚ Empezar con la titulación del filtrado hasta que el color amarillo rojizo intenso desaparezca.

Fig. 3-27. Decoloración del amarillo rojizo intenso



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Colocar 1 ml de la solución de almidón a la muestra, la misma que se torna de coloración azul.
- ✚ Seguir titulando hasta que el color azul desaparezca, como se observa en figura 3-28 y anotar el volumen de titulación.

Fig. 3-28. Titulación



Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.6.3. Determinación de la densidad aparente del carbón activado

Para la determinación de la densidad aparente de los carbones activados obtenidos de cáscara de plátano se tomó como referencia la normativa (ASTM D-2854) Anexo 6.

3.6.3.1. Procedimiento para la determinación de la densidad aparente

- ✚ Pesar una probeta de 100 ml y anotar el dato.
- ✚ Con un embudo depositar con cuidado el carbón activado la probeta de 100 ml.
- ✚ Depositar el carbón activado hasta alcanzar un volumen de 50 ml, pesar y anotar el dato.

Fig. 3-29. Pesado del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

- ✚ Colocar los 50 ml de carbón activado en el platillo de aluminio y colocarlo en un secador de infrarrojos para obtener la humedad y registrar el dato.
- ✚ Posteriormente se debe calcular la densidad aparente restando la humedad de la muestra para expresar su valor en base seca.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la caracterización de la cáscara de plátano

4.1.1. Resultados de la determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano

La determinación del porcentaje de humedad se realizó con cáscara de plátano fresco.

Los valores que se muestran en la tabla IV-1 fueron tomados del secador de infrarrojos.

Tabla IV-1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano

Muestra	% Humedad		
Cáscara de plátano	89,10	89,54	88,90
Promedio	89,18		

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.1.2. Caracterización de la materia prima en base seca

Los análisis realizados a la materia prima en base seca son; el porcentaje de contenido de cenizas, el porcentaje de material volátil y el carbón fijo de la cáscara de plátano seca, los resultados de estos análisis pueden ser observados en la tabla IV-2.

Tabla IV-2. Características de la cáscara de plátano en base seca

Muestra	Cáscara de plátano			Promedio
% Cenizas	1,24	1,34	1,30	1,29
% Material Volátil	2,00	2,24	2,44	2,23
% Carbón Fijo	96,76	96,42	96,26	96,48

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.2. Resultados de la determinación del índice de azul de metileno

4.2.1. Curva de calibración de la solución de azul de metileno

Para realizar los cálculos del índice de azul de metileno es necesario realizar previamente la curva de calibración de la solución de azul de metileno para evaluar el comportamiento de la remoción de este colorante.

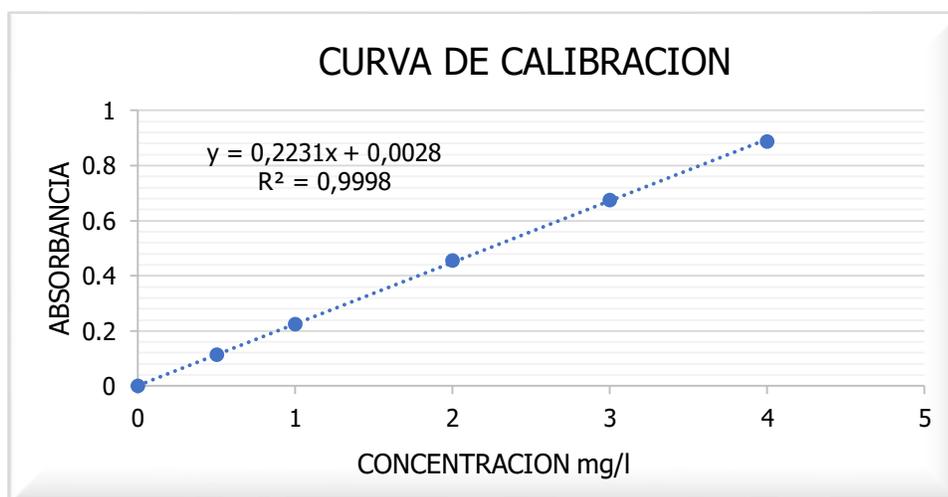
Para obtener la curva de calibración, mostrada en la figura 4-1, se utilizó las concentraciones observadas en la tabla IV-3:

Tabla IV-3. Lecturas de absorbancia para la curva patrón

Concentración (mg/l)	Absorbancia (nm)
0	0
0,5	0,114
1	0,224
2	0,456
3	0,676
4	0,889

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Fig. 4-1. Curva de Calibración



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Con la ayuda del software Excel se obtiene la ecuación mostrada en la figura 4-1, la cual es utilizada para realizar los cálculos de la concentración del azul de metileno, porcentaje de remoción y masa adsorbida de la solución de azul de metileno por el carbón activado de cáscara de plátano, además se obtiene el coeficiente de aproximación lineal “**R²**” para la curva es de 0,9998, lo que demuestra que el modelo lineal se ajusta perfectamente a los datos experimentales y que la curva de calibración cumple con la ley de Lambert-Beer, en el intervalo de concentraciones analizadas.

La ecuación de la concentración es:

$$y = 0,2231x + 0,0028 \quad (5)$$

$$x = \frac{y-0,0028}{0,2231} \quad (6)$$

Donde:

x = Concentración de azul de metileno expresada en mg/l, de la ecuación 6.

y = absorbancia expresada en nm

4.2.2. Fórmulas utilizadas para el cálculo del índice de azul de metileno

Para la determinación de la masa adsorbida del azul de metileno por el carbón activado se utilizó la solución de 3 mg/l utilizada anteriormente para la determinación de la curva de calibración.

La fórmula con la que se calcula la masa adsorbida del azul de metileno es:

$$qe = \frac{(Co-Cf) \times V}{m} \quad (7)$$

Donde:

qe= Masa adsorbida (mg/g).

C₀= Concentración inicial de la solución azul de metileno (mg/l).

C_f= Concentración final de la solución azul de metileno después del filtrado (mg/l), de la ecuación 7.

V = Volumen en (l) de la solución “A” preparada.

m = Masa del carbón activado en (g).

Para determinar la concentración inicial de la solución de azul de metileno que se utiliza para obtener el % de remoción de cada muestra de carbón activado de cáscara de plátano se usa la ecuación (6) donde la variable “ x ” que se obtiene de la curva de calibración es la concentración inicial del azul de metileno.

Para determinar el porcentaje de remoción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100\% \quad (8)$$

Donde:

C_o = Concentración inicial de la solución de azul de metileno (mg/l)

C_f = Concentración final de la solución azul de metileno después del filtrado (mg/l)

4.2.3. Resultados del análisis del índice de azul de metileno de la cáscara de plátano pre-carbonizada

En la tabla IV-4, se muestran los resultados del análisis del índice de azul de metileno realizado a la cáscara de plátano pre-carbonizada, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla IV-4. % remoción del azul de metileno de la materia prima pre-carbonizada

Abs 1	Abs 2	Abs 3	Promedio Abs	qe (mg/g)	% Remoción
0,2230	0,2210	0,2250	0,2230	0,5032	67,1000
Donde:					
$C_o = 3 \text{ mg/l}$		$C_f = 0,9870 \text{ mg/l}$		$m = 0,1 \text{ g}$	$V = 0,025 \text{ L}$

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.2.4. Resultado del índice de azul de metileno del producto obtenido

A continuación, se ejemplifica el procedimiento de cálculo para la obtención de resultados de las tablas IV-5 y IV-6.

Ejemplo con la muestra E₁₋₁

Primero se determina la concentración inicial de la solución de azul de metileno para lo cual se utiliza la ecuación (6), después de haber obtenido las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro por triplicado para tener un resultado más exacto, se saca el promedio de la absorbancia.

La absorbancia del azul de metileno al inicio es:

$$y = 0,676$$

Entonces se calcula la concentración inicial del azul de metileno.

$$x = \frac{y - 0,0028}{0,2231}$$

$$x = \frac{0,676 - 0,0028}{0,2231}$$

$$C_o = x = 3,0175 \frac{mg}{l}$$

Una vez obtenida la concentración inicial de la solución de azul de metileno se calcula la concentración final de la solución de azul de metileno filtrado de la muestra E₁₋₁ nuevamente con la ecuación (5).

La absorbancia promedio de la muestra E₁₋₁ es de 0,031

$$y = 0,031$$

$$x = \frac{y - 0,0028}{0,2231}$$

$$x = \frac{0,031 - 0,0028}{0,2231}$$

$$Cf = x = 0,1264 \frac{mg}{l}$$

Posteriormente se calcula la masa adsorbida (q_e) de la muestra E₁₋₁ con la ecuación (7) expresado en mg/g.

$$q_e = \frac{(C_o - C_f)V}{m}$$

$$q_e = \frac{(3,0175 \text{ mg/l} - 0,1264 \text{ mg/l}) \times 0,025 \text{ l}}{0,1 \text{ g}}$$

$$q_e = 0,7228 \frac{mg}{g}$$

Para determinar el porcentaje de remoción de azul de metileno de la muestra E₁₋₁ se utiliza la ecuación (8).

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o \text{ de A. M.} - C_f \text{ de A. M. filtrado})}{C_o \text{ de A. M.}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(3,0175 \text{ mg/l} - 0,1264 \text{ mg/l})}{3,0175 \text{ mg/l}} * 100\%$$

$$\% \text{ Remoción} = 95,8111 \%$$

A continuación, en las tablas IV-5 y IV-6, se muestran los resultados de los experimentos de la réplica número 1 y número 2, calculados con las fórmulas mencionadas en el apartado 4.2.2.

Tabla IV-5. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción réplica 1

Muestra	Abs. 1	Abs. 2	Abs. 3	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	qe (mg/g)	% Remoción
Blanco	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-
A.M.	0,6690	0,6770	0,6820	0,6760	3,0175	-	-
E 1-1	0,0310	0,0330	0,0290	0,0310	0,1264	0,7228	95,8111
E 2-1	0,0360	0,0340	0,0350	0,0350	0,1443	0,7183	95,2169
E 3-1	0,0290	0,0280	0,0310	0,0293	0,1189	0,7246	96,0586
E 4-1	0,0270	0,0290	0,0280	0,0280	0,1130	0,7261	96,2567
E 5-1	0,0340	0,0330	0,0360	0,0343	0,1413	0,7190	95,3159
E 6-1	0,0390	0,0370	0,0350	0,0370	0,1533	0,7160	94,9198
E 7-1	0,0190	0,0200	0,0170	0,0187	0,0711	0,7366	97,6431
E 8-1	0,0300	0,0270	0,0310	0,0293	0,1189	0,7246	96,0586

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla IV-5 se determinó que la mejor muestra de carbón activado obtenido es la muestra “E₇₋₁” con un porcentaje de remoción superior al 97% con respecto a las demás muestras. Además, puede observar en la tabla que al aumentar la temperatura y concentración se va aumentando el porcentaje de remoción de los carbones activados de cáscara de plátano de la variedad “*Musa Cavendishii*”.

Tabla IV-6. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción réplica 2

Muestra	Abs. 1	Abs. 2	Abs. 3	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	qe (mg/g)	% Remoción
Blanco	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	-
A.M.	0,6690	0,6770	0,6820	0,6760	3,0175	-	-
E 1-2	0,0330	0,0300	0,0350	0,0327	0,1339	0,7209	95,5635
E 2-2	0,0340	0,0310	0,0350	0,0333	0,1369	0,7202	95,4644
E 3-2	0,0300	0,0290	0,0320	0,0303	0,1234	0,7235	95,9101
E 4-2	0,0290	0,0250	0,0270	0,0270	0,1085	0,7273	96,4052
E 5-2	0,0350	0,0360	0,0340	0,0350	0,1443	0,7183	95,2169
E 6-2	0,0380	0,0350	0,0370	0,0367	0,1518	0,7164	94,9693
E 7-2	0,0170	0,0200	0,0180	0,0183	0,0696	0,7370	97,6926
E 8-2	0,0290	0,0270	0,0310	0,0290	0,1174	0,7250	96,1081

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla IV-6 se puede observar que la mejor muestra es la “E₇₋₂” con un valor de % de remoción del 97,6926 %, dicha muestra es la réplica de la muestra “E₇₋₁”, lo cual, demuestra que las repeticiones realizadas, se llevaron a cabo de la mejor manera posible.

A continuación, en la tabla IV-7 se muestran los promedios de la masa adsorbida del azul de metileno por los carbones activados de cáscara de plátano.

Tabla IV-7. Promedio de la masa adsorbida

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (%)	Temperatura (°C)	q _e replica 1 (mg/g)	q _e replica 2 (mg/g)	Promedio de q _e (mg/g)
E ₁	1	40	500	0,7228	0,7209	0,7218
E ₂	2	40	500	0,7183	0,7202	0,7192
E ₃	1	45	500	0,7246	0,7235	0,7241
E ₄	2	45	500	0,7261	0,7273	0,7267
E ₅	1	40	600	0,7190	0,7183	0,7187
E ₆	2	40	600	0,7160	0,7164	0,7162
E ₇	1	45	600	0,7366	0,7370	0,7368
E ₈	2	45	600	0,7246	0,7250	0,7248

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La tabla IV-7 indica que la muestra “E₇” tiene el mayor promedio de masa adsorbida del azul de metileno con un valor de 0,7368 miligramos de masa adsorbida de azul de metileno por cada gramo de carbón activado (adsorbente), esta muestra se obtuvo a una temperatura de 600 °C, a una concentración del activante de 45% y en un tiempo de 1 hora.

Seguidamente en la tabla IV-8, se muestra el porcentaje de remoción del azul de metileno, de las soluciones filtradas con los carbones activados obtenidos a partir de cáscara de plátano.

Tabla IV-8. Promedio del % de remoción del azul de metileno

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (%)	Temperatura (°C)	% Remoción replica 1	% Remoción replica 2	Promedio del % de remoción
E₁	1	40	500	95,8111	95,5635	95,6873
E₂	2	40	500	95,2169	95,4644	95,3407
E₃	1	45	500	96,0586	95,9101	95,9844
E₄	2	45	500	96,2567	96,4052	96,3310
E₅	1	40	600	95,3159	95,2169	95,2664
E₆	2	40	600	94,9198	94,9693	94,9445
E₇	1	45	600	97,6431	97,6926	97,6679
E₈	2	45	600	96,0586	96,1081	96,0834

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De tabla IV-8 se puede observar que la muestra “E₇” tiene el mayor promedio de % de remoción del azul de metileno, con un valor de 97,6679 %, lo cual indica que ese es el porcentaje de masa de azul de metileno es la adsorbida por el carbón activado obtenido a partir de cascara de plátano.

4.3. Resultados de la determinación del índice yodo

4.3.1. Fórmulas utilizadas para el cálculo del índice de yodo

Para la determinación del índice de yodo se utilizó las siguientes fórmulas:

✚ Cálculo del Índice de Yodo

$$\text{Índice de yodo} = \frac{V}{m} * f \quad (9)$$

✚ Cálculo de V/m

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2,2 * B * V_1)}{mc} \quad (10)$$

✚ Cálculo de las constantes del Índice de Yodo A y B

$$A = N_1 * 12693 \quad (11)$$

$$B = N_2 * 126,93 \quad (12)$$

✚ Cálculo del valor C para determinar factor “ f ” del Índice de Yodo

$$C = \frac{N_2 * V_1}{50} \quad (13)$$

Donde:

V/m : mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado.

C : Normalidad del filtrado residual (para calcular factor f).

f : Factor de corrección (ver Anexo 4).

V_I : Volumen utilizado de tiosulfato de sodio 0,1 N en ml.

N_I : Normalidad de la solución estándar de yodo 0,1 N.

N_2 : Normalidad de la solución estándar del tiosulfato de sodio 0,1 N.

mc : Masa del carbón activado.

4.3.2. Resultados del análisis del índice de yodo de la cáscara de plátano pre-carbonizada

A continuación, en la tabla IV-9, se muestran los resultados del análisis del índice de yodo realizado a la cáscara de plátano pre-carbonizada, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla IV-9. Índice de yodo y área superficial de la materia prima pre-carbonizada

Masa de carbón activado (g)	Volumen de Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	C	<i>f</i>	v/m	Índice de yodo (mg/g)	Área Superficial (m ² /g)
1,5050	24,7000	0,0494	0,7596	385,0913	292,5153	392,5153

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los cálculos realizados para determinar el índice de yodo y área superficial de la materia prima pre carbonizada, son los mismos que se utilizó para determinar el índice de yodo de los experimentos.

En los cálculos realizados no se encontró el valor de “*f*”, ya que el valor de la normalidad residual del filtrado (C) estaba fuera del rango de los valores de la tabla del factor de corrección (anexo 4), por lo cual se tuvo que extrapolar utilizando los valores de dicha tabla, el valor del factor de corrección que se obtuvo es 0,7596.

4.3.3. Resultados del índice de yodo del producto obtenido

A continuación, se ejemplifica el procedimiento de cálculo para la obtención de resultados de las tablas IV-10 y IV-11.

Ejemplo con la muestra E_{1.1}

Primero se calculan los valores de las constantes *A* y *B* con las ecuaciones (11) y (12).

 Cálculo de *A*:

$$A = 0,1N \times 12693$$

$$A = 1269,3$$

🌈 Cálculo de B:

$$B = 0,1 \times 126,93$$

$$B = 12,693$$

Posteriormente se calcula V/m con los valores de las constantes A y B utilizando la ecuación (10).

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2,2 \times B \times V_1)}{mc}$$

$$\frac{V}{m} = \frac{1269,3 - (2,2 \times 12,693 \times 13,3)}{1,502}$$

$$\frac{V}{m} = 597,8048$$

Luego se calcula el valor C con la ecuación (13).

$$C = \frac{0,1 \times 13,3}{50}$$

$$C = 0,0266$$

Para obtener el valor de “ f ” se utilizó el valor obtenido de la constante $C = 0,0266$ N de la muestra E_1 , por lo cual se busca en la tabla del (Anexo 4) el valor del factor de corrección del índice de yodo, como no se encontró el valor de “ C ” en la tabla, se tuvo que interpolar, teniendo así $f = 0,9529$.

Una vez obtenido el factor de corrección “ f ”, se calculó el índice de yodo del carbón activado de cáscara de plátano con la ecuación (9).

$$\text{Índice de yodo} = \frac{V}{m} \times f$$

$$\text{Índice de yodo} = 597,8048 \times 0,9529$$

$$\text{Índice de yodo} = 576,2819 \text{ mg/g}$$

A continuación, en las tablas IV-10 y IV-11 se muestran los resultados del análisis del índice de yodo realizados a los carbones activados obtenidos en la réplica 1 y la réplica 2, calculados con las fórmulas del apartado 4.3.2.

Tabla IV-10. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1

Muestra	Masa de Carbón activado (g)	Volumen HCL % 5 (ml)	N (Na ₂ S ₂ O ₃)	N (Yodo)	Volumen (Na ₂ S ₂ O ₃) (ml)	C	<i>f</i>	v/m	Índice de yodo (mg/g)
E 1-1	1,5020	10	0,1000	0,1000	13,3000	0,0266	0,9529	597,8048	569,6482
E 2-1	1,5050	10	0,1000	0,1000	12,8000	0,0256	0,9583	605,8904	580,6248
E 3-1	1,5120	10	0,1000	0,1000	12,5000	0,025	0,9650	608,6260	587,3241
E 4-1	1,5070	10	0,1000	0,1000	12,2000	0,0244	0,9725	616,2043	599,2587
E 5-1	1,5010	10	0,1000	0,1000	13,1000	0,0262	0,9575	601,9239	576,3421
E 6-1	1,5090	10	0,1000	0,1000	12,9000	0,0258	0,9561	602,4338	575,9870
E 7-1	1,5010	10	0,1000	0,1000	11,8000	0,0236	0,9705	626,1091	607,6389
E 8-1	1,5030	10	0,1000	0,1000	12,4000	0,0248	0,9617	614,1284	590,6073

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla. IV-10 se puede observar que el mejor carbón activado obtenido es la muestra “E₇₋₁”, con un valor de índice de yodo de 607,6389 mg/g, dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración del 45% y con una temperatura de activación de 600 ° C por un tiempo de una hora, además se pudo observar en la tabla que al aumentar la temperatura y la concentración también aumenta el índice de yodo de los carbones activados de cáscara de plátano.

Tabla IV-11. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2

Muestra	Masa de Carbón activado (g)	Volumen HCL % 5 (ml)	N (Na ₂ S ₂ O ₃)	N (Yodo)	Volumen (Na ₂ S ₂ O ₃) (ml)	C	<i>f</i>	v/m	Índice de yodo (mg/g)
E ₁₋₂	1,501	10	0,100	0,100	13,100	0,0262	0,9574	601,9239	576,2819
E ₂₋₂	1,503	10	0,100	0,100	13,000	0,0260	0,9600	602,9808	578,8616
E ₃₋₂	1,505	10	0,100	0,100	12,400	0,0248	0,9617	613,3123	589,8224
E ₄₋₂	1,511	10	0,100	0,100	12,600	0,0252	0,9628	607,1807	584,5936
E ₅₋₂	1,506	10	0,100	0,100	12,900	0,0258	0,9561	603,6339	577,1344
E ₆₋₂	1,502	10	0,100	0,100	12,700	0,0254	0,9618	608,9598	585,6975
E ₇₋₂	1,509	10	0,100	0,100	12,000	0,0240	0,9725	619,0887	602,0637
E ₈₋₂	1,501	10	0,100	0,100	12,500	0,0250	0,9650	613,0863	591,6283

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla. IV-11 se observó que el mejor carbón activado de cáscara de plátano obtenido es la muestra “E₇₋₂” con un resultado de 602,0637 mg/g.

Seguidamente, en la tabla IV-12 se muestran los promedios de los resultados del análisis del índice de yodo.

Tabla IV-12. Promedio índice de yodo

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (%)	Temperatura (°C)	Índice de yodo (mg/g)	Índice de yodo (mg/g)	Promedio del índice de yodo (mg/g)
E ₁	1	40	500	569,6482	576,2819	572,9651
E ₂	2	40	500	580,6248	578,8616	579,7432
E ₃	1	45	500	587,3241	589,8224	588,5732
E ₄	2	45	500	599,2587	584,5936	591,9261
E ₅	1	40	600	576,3421	577,1344	576,7382
E ₆	2	40	600	575,9870	585,6975	580,8423
E ₇	1	45	600	607,6389	602,0637	604,8513
E ₈	2	45	600	590,6073	591,6283	591,1178

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla IV-12, se observa que a una temperatura de 600 °C, concentración de activante 45% y un tiempo de carbonización de 1 h, dan como resultado un elevado índice de yodo para los carbones activados de cáscara de plátano.

4.4. Resultados del área superficial

Ejemplo con la muestra E₁₋₁

$$\text{Área superficial} = \text{Índice de Yodo} + 100 \quad (14)$$

$$\text{Área superficial} = 569,6482 + 100$$

$$\text{Área superficial} = 669,6482 \frac{m^2}{g}$$

A continuación, en las tablas IV-13 y 14, se observa el resultado del área superficial en función al índice de yodo de los carbones activados obtenidos, tanto en la réplica 1 como en la réplica 2.

Tabla IV-13. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 1

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
E ₁₋₁	569,6482	669,6482
E ₂₋₁	580,6248	680,6248
E ₃₋₁	587,3241	687,3241
E ₄₋₁	599,2587	699,2587
E ₅₋₁	576,3421	676,3421
E ₆₋₁	575,9870	675,9870
E ₇₋₁	607,6389	707,6389
E ₈₋₁	590,6073	690,6073

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-14. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 2

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
E ₁₋₂	576,2819	676,2819
E ₂₋₂	578,8616	678,8616
E ₃₋₂	589,8224	689,8224
E ₄₋₂	584,5936	684,5936
E ₅₋₂	577,1344	677,1344
E ₆₋₂	585,6975	685,6975
E ₇₋₂	602,0637	702,0637
E ₈₋₂	591,6283	691,6283

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Seguidamente en la tabla IV-15 se muestran los promedios del área superficial de los carbones activados obtenidos a partir de cascara de plátano.

Tabla IV-15. Promedio área superficial

Muestra	Área superficial Réplica 1 (m ² /g)	Área superficial Réplica 2 (m ² /g)	Promedio del área superficial (m ² /g)
E ₁	669,6482	676,2819	672,9651
E ₂	680,6248	678,8616	679,7432
E ₃	687,3241	689,8224	688,5732
E ₄	699,2587	684,5936	691,9261
E ₅	676,3421	677,1344	676,7382
E ₆	675,9870	685,6975	680,8423
E ₇	707,6389	702,0637	704,8513
E ₈	690,6073	691,6283	691,1178

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La tabla IV-15 indica que las muestras “E₇” tienen el mayor promedio de área superficial, las cuales se obtuvieron a una temperatura de 600 ° C, concentración de activante 45% y un tiempo de carbonización de 1 h.

4.5. Resultados de la determinación de la densidad aparente en base seca.

4.5.1 Formula para el cálculo de la densidad aparente

La fórmula que se utiliza para calcular la densidad aparente en base seca de un carbón activado es la siguiente:

$$Dap = \frac{(Mm \times 100) - \%H}{Vm \times 100} \quad (15)$$

Donde:

Dap= Densidad aparente (g/cm³)

Mm= Masa de la muestra (g)

Vm= Volumen de la muestra (cm³)

%H= Porcentaje de humedad de la muestra

4.5.2. Resultado de la determinación de la densidad aparente de la cascara de plátano pre-carbonizada

A continuación, en la tabla IV-16, se muestran los resultados que se obtuvieron en la determinación de la densidad aparente, realizada a la cáscara de plátano pre-carbonizada, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla IV-16. Densidad aparente en base seca de la materia prima pre-carbonizada

Masa de la muestra (g)	Volumen de la muestra (cm ³)	% Humedad	Densidad aparente (g/cm ³)
20,4773	50	6,2300	0,4083

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.5.3. Resultados de la determinación de la densidad aparente del producto obtenido

A continuación, se ejemplifica el procedimiento de cálculo para la obtención de resultados de las tablas IV-17 y IV-18.

Ejemplo con la muestra E₁₋₁

Para determinar la densidad aparente de los carbones activados se utilizó la ecuación (15), además el porcentaje de humedad de la muestra es determinado en un secador de infrarrojos, por lo tanto, se prosigue de la siguiente manera.

$$Dap = \frac{(Mm \times 100) - \%H}{Vm \times 100}$$

$$Dap = \frac{(22,36 \times 100) - 7,79}{50 \times 100}$$

$$Dap = 0,47 \frac{g}{cm^3}$$

Seguidamente en las tablas IV-17 y IV-18 se observan los resultados de la determinación de la densidad aparente de los carbones obtenidos.

Tabla IV-17. Cálculo de la densidad aparente réplica 1

Muestra	Masa de la muestra (g)	Volumen de la muestra (cm ³)	% Humedad	Densidad aparente (g/cm ³)
E 1-1	22,8640	50	7,7900	0,4217
E 2-1	23,2560	50	6,9000	0,4330
E 3-1	25,3560	50	7,2200	0,4705
E 4-1	25,6350	50	6,8700	0,4775
E 5-1	21,2050	50	6,5600	0,3963
E 6-1	22,7550	50	7,0100	0,4232
E 7-1	27,5720	50	6,0100	0,5183
E 8-1	26,3690	50	7,2100	0,4894

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la tabla IV-17 se puede observar que la muestra “E₇₋₁” es la que tiene la densidad aparente más alta con un valor de 0,5183 gramos de carbón activado por cada cm³ de volumen de este absorbente.

Tabla IV-18. Cálculo de la densidad aparente réplica 2

Muestra	Masa de la muestra (g)	Volumen de la muestra (cm ³)	% Humedad	Densidad aparente (g/cm ³)
E ₁₋₂	22,2550	50	5,4900	0,4207
E ₂₋₂	23,6850	50	6,7200	0,4419
E ₃₋₂	24,9840	50	5,9900	0,4697
E ₄₋₂	24,8380	50	6,1800	0,4661
E ₅₋₂	20,5250	50	6,0200	0,3858
E ₆₋₂	23,3550	50	7,6500	0,4314
E ₇₋₂	27,9500	50	6,4800	0,5228
E ₈₋₂	26,1530	50	7,2100	0,4853

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla IV-18 se puede observar que la muestra “E_{7.1}” es la que tiene mayor densidad aparente con un valor de 0,5228 gramos de carbón activado por m³ de volumen de este adsorbente.

Tabla IV-19. Cálculo del promedio de la densidad aparente

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (%)	Temperatura (°C)	Promedio de la densidad aparente (g/cm ³)
E ₁	1	40	500	0,4212
E ₂	2	40	500	0,4374
E ₃	1	45	500	0,4701
E ₄	2	45	500	0,4718
E ₅	1	40	600	0,3910
E ₆	2	40	600	0,4273
E ₇	1	45	600	0,5205
E ₈	2	45	600	0,4874

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la tabla IV-18 se observa que el promedio de la muestra “E₇” tiene la densidad aparente más elevada, con un valor de 0,521 g/m³, que fue obtenido a una temperatura

de 600 °C, una concentración de activante de 45% y en un tiempo de 1 hora, por lo tanto, la muestra “E7” será la muestra que tienen mejor capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de un adsorbente.

4.6. Determinación de los rendimientos y eficiencias de adsorción de los carbones activados obtenidos

Las eficiencias y rendimientos obtenidos de cada uno de los métodos de activación química deben ser analizados para poder determinar cuál de los diferentes métodos es el mejor. (Arduz, 2016)

El rendimiento en masa no es el único parámetro comparativo y éste en sí no es importante y determinante a la hora de seleccionar el método más eficiente, para ello se determina la eficiencia de adsorción del azul de metileno y el índice de yodo, los cuales indican cuanto mejoraron la calidad en estos parámetros los diferentes métodos de activación química estudiados, tomando como parámetro inicial los valores de adsorción de azul de metileno e índice de yodo de la materia prima. (Arduz, 2016)

El rendimiento en masa de los diferentes carbones activados obtenidos se define como la relación entre la masa del producto obtenido y la masa de la materia prima pre carbonizada utilizada, por lo tanto, el porcentaje del rendimiento en masa (η_{masa}) es igual a:

$$\eta_{masa} = \frac{m_{\text{Carbón Activado}}}{m_{\text{Materia Prima}}} \times 100\% \quad (16)$$

La eficiencia del índice de yodo ($\eta_{\text{Índice de yodo}}$), se define como la relación entre el índice de yodo del carbón activado obtenido ($I_{y_{\text{Carbón Activado}}}$) y el índice de yodo de la materia prima ($I_{y_{\text{Materia Prima}}}$), el porcentaje de la eficiencia del índice de yodo es igual a:

$$\eta_{\text{Índice de yodo}} = \frac{I_{y_{\text{Carbón Activado}}}}{I_{y_{\text{Materia Prima}}}} \times 100\% \quad (17)$$

La eficiencia del área superficial ($\eta_{\text{área sup.}}$), se define como la relación entre el área superficial del carbón activado obtenido ($A_{S_{\text{Carbón Activado}}}$) y el área superficial de la

materia prima ($A_{S_{Materia\ Prima}}$), el porcentaje de la eficiencia del área superficial es igual a:

$$\eta_{\text{área sup.}} = \frac{A_{S_{\text{Carbón Activado}}}}{A_{S_{\text{Materia Prima}}}} \times 100\% \quad (18)$$

La eficiencia del % de remoción del carbón activado es definida como la relación del % de remoción de azul de metileno del carbón activado entre el % de remoción del de la materia prima. El porcentaje de la eficiencia del % de remoción del azul de metileno es igual a:

$$\eta_{\%remocion} = \frac{\%R_{A.M_{\text{Carbón Activado}}}}{\%R_{A.M_{\text{Materia Prima}}}} \times 100 \quad (19)$$

La eficiencia de la masa adsorbida del azul de metileno ($\eta_{Masa.ad}$), es definida como la relación de la masa adsorbida del azul de metileno ($M_{ad_{\text{Carbón Activado}}}$), entre la masa adsorbida del de la materia prima ($M_{ad_{\text{Materia Prima}}}$). El porcentaje de la eficiencia de la masa adsorbida del azul de metileno es igual a:

$$\eta_{Masa.ad} = \frac{M_{ad_{\text{Carbón Activado}}}}{M_{ad_{\text{Materia Prima}}}} \times 100\% \quad (20)$$

La eficiencia de la densidad aparente (η_{Dap}), es definida como la relación de la densidad aparente del carbón activado ($D_{ap_{\text{Carbón Activado}}}$), entre la densidad aparente de la materia prima ($D_{ap_{\text{Materia Prima}}}$). El porcentaje de la eficiencia de la densidad aparente es igual a:

$$\eta_{Dap} = \frac{D_{ap_{\text{Carbón Activado}}}}{D_{ap_{\text{Materia Prima}}}} \times 100 \quad (21)$$

En la tabla IV-20, se aprecia los valores promedios de las eficiencias del índice de yodo, área superficial, % de remoción del azul de metileno, masa adsorbida del azul de metileno densidad aparente, además, del valor del rendimiento en peso de todos los tratamientos de activación química que se realizaron.

Tabla IV-20. Promedio rendimiento y eficiencias del carbón activado

Muestra	% η_{masa}	% $\eta_{Indice\ de\ yodo}$	% $\eta_{area\ sup}$	% $\eta_{\%remocion}$	% $\eta_{Masa.ad}$	% $\eta_{Dens.ap}$
E₁	67,5552	195,8754	202,4095	142,2013	146,9315	103,1499
E₂	67,5219	198,1926	204,4482	141,6862	146,8166	107,1386
E₃	66,5128	201,2113	207,1040	142,6428	147,0299	115,1427
E₄	66,0701	202,3575	208,1125	143,1579	147,1447	115,5447
E₅	74,2717	197,1654	203,5444	141,5758	146,7920	95,7711
E₆	76,4280	198,5684	204,7788	141,0976	146,6854	104,6491
E₇	67,7075	206,7762	212,0000	145,1447	147,5876	127,4890
E₈	67,3505	202,0812	207,8693	142,7900	147,0627	119,3612

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la tabla IV-20, se puede observar que la muestra “E₇” es la que tiene mayor índice de yodo, mayor área superficial, mayor % de remoción, mayor masa adsorbida y mayor densidad aparente, no es la muestra que tiene el mejor rendimiento en masa, ya que tiene un rendimiento del 67, 7075 %. Sin embargo, la muestra “E₆” es la que presenta el rendimiento en masa más elevado, con

un porcentaje del 76,4280 %. Lo que significa que la muestra “E₇” es un carbón activado de mejor calidad, pero la muestra “E₆” será de mayor cantidad.

4.7. Selección del mejor método estudiado de obtención de carbón activado.

Un buen carbón activado es aquel que tiene un gran volumen y una gran superficie interna en su estructura porosa. Como datos referenciales y características principales de los carbones activados se tiene el índice de yodo y el índice de azul de metileno los cuales indican la calidad y actividad de la adsorción química de los carbones. El número o índice de yodo es un indicador relativo de la porosidad del carbón activo y de su superficie interna. (Arduz, 2016)

Los criterios que se deben tomar en cuenta para seleccionar el mejor método de obtención de carbón activado son los resultados a los análisis del índice de yodo, % de remoción de azul de metileno y área superficial en función al índice de yodo, densidad aparente, además como un quinto parámetro se toma en cuenta el rendimiento en masa del proceso.

De acuerdo a los criterios citados y los resultados obtenidos en la tabla IV-20 se puede verificar que el carbón activado obtenido de mejor calidad es la muestra “E7” siendo este obtenido con las mostradas en la tabla IV-21.

Tabla IV-21. Variables óptimas para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano

Tiempo de Carbonización (h)	Concentración H ₃ PO ₄ (%)	Temperatura de Activación (° C)
-	+	+
1	45	600

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.8. Comparación del mejor carbón activado obtenido con uno comercial

A continuación, en la tabla IV-22, se puede diferenciar las propiedades y características del carbón activado comercial de la marca CLARIMEX y el mejor carbón activado obtenido el cual es la muestra “E7”.

Tabla IV-22. Comparación del carbón activado comercial con el mejor carbón obtenido

Análisis	Carbón activado CLARIMEX	Muestra (E₇)
Índice de yodo (mg/g)	708,8870	604,8513
Masa adsorbida (mg/g)	0,7780	0,7368
% de remoción de Azul de Metileno	99,0000	97,6679
Área superficial (m²/g)	808,8870	704,8513
Densidad aparente (g/cm³)	0,6000	0,5205

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los valores de la muestra “E₇” de la tabla IV-22 son los promedios de la réplica 1 y réplica 2 de los experimentos realizados.

El carbón activado obtenido de cáscara de plátano tuvo resultados aceptables, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos este carbón se encuentra dentro de los parámetros permitidos por las normas mostradas en el cuadro II-2.

4.9. Prueba de aplicación

Las Pruebas de Aplicación son pruebas que se realizan, en este caso, a los carbones activados que muestran la capacidad de adsorción que tienen en condiciones y aplicaciones comunes de uso cotidiano en las que se puede usar el carbón activado.

Para el presente proyecto se realizó una prueba de aplicación con agua residual de la Curtiembre San Juan, la cual sale con diferentes colorantes y con un pH muy básico, ya que en el proceso que se realiza en esa industria se utilizan diferentes pinturas y reactivos, en especial la soda caustica.

4.9.1. Decoloración y regulación del pH del agua residual

El carbón activado puede alterar el pH del agua, dependiendo de su método de activación y de la composición química del agua a tratarse. Finalmente, el carbón activado permite la remoción de gran cantidad de productos químicos orgánicos e

inorgánicos en el agua, como subproductos de desinfección, pesticidas, y algunos metales pesados, mejorando así su olor y sabor.

En la prueba se filtró por gravedad 250 ml de agua residual, con 3 gramos del mejor carbón activado obtenido (E₇), siendo esta cantidad el valor mínimo con el cual se decolora casi por totalidad el agua residual, luego a la solución filtrada se midió la absorbancia a una longitud de onda de 655 nm, también se midió el pH del agua residual y de la solución filtrada.

En la figura 4-2 se puede apreciar el filtrado y el pH del agua residual de la curtiembre San Juan.

Figura 4-2. Filtrado y medición del pH del agua residual



Fuente: Elaboración propia, 2022.

De la tabla IV-23, se puede observar que al filtrar la muestra de agua residual de la Curtiembre San Juan con el mejor carbón activado de cáscara de plátano obtenido (E₇), mejora notablemente tanto en su color como en su pH.

Tabla IV-23. Resultados de la prueba de aplicación

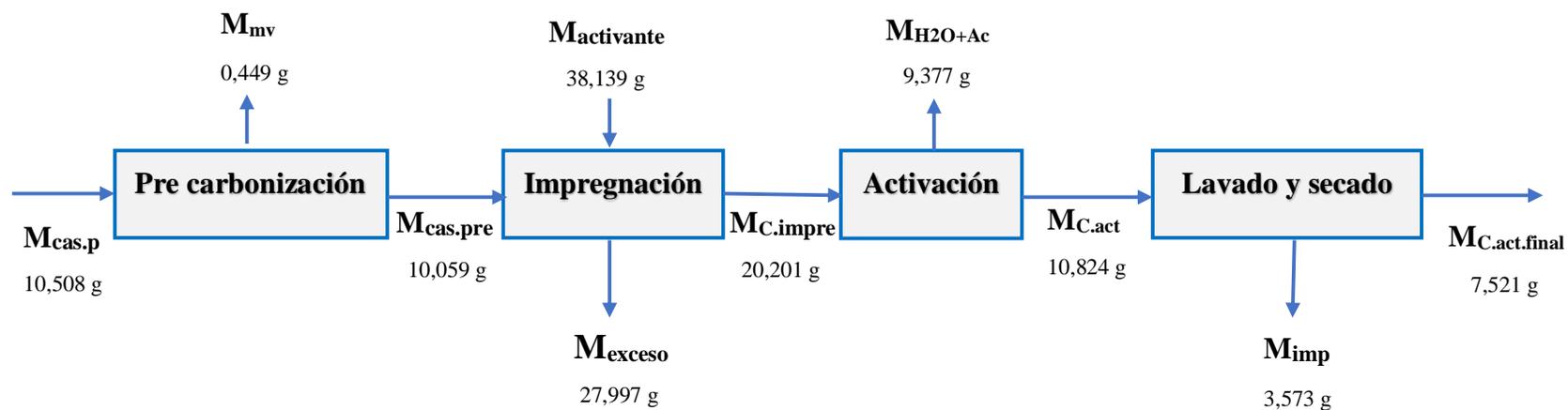
Parámetro	Agua residual sin tratar	Agua residual filtrada con el carbón activado E ₇
Absorbancia (nm)	0,5480	0,0210
pH	8.5	6,6

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10. Balance de materia y energía

El diagrama de flujo general de la investigación con todos los procesos realizados para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano se muestra en la figura 4-3, donde además se ejemplifica el proceso con los flujos que se tuvieron para la obtención del experimento “E₁₋₁”.

Fig. 4-3. Diagrama de flujo general de la obtención de carbón activado de cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Dónde:

$M_{cas,p}$: Masa de cáscara de plátano seca

M_{mv} : Masa de material volátil de la cáscara de plátano

$M_{cas,pre}$: Masa de cáscara de plátano pre carbonizada

$M_{activante}$: Masa de agente activante

M_{exceso} : Masa en exceso de agente activante

$M_{C.impre}$: Masa de cáscara de plátano impregnada

M_{H2O+Ac} : Masa de material volátil del agente activante

$M_{C.act.}$: Masa de carbón activado

M_{Imp} : Masa de impurezas y pérdidas

$M_{C.act.final}$: Masa de carbón activado limpio

En las tablas IV-24 y IV-25, se puede observar todas las corrientes de todos los procesos llevados a cabo en la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano.

Tabla IV-24. Corrientes del balance de materia para cada experimento réplica 1

Muestra	$M_{cas.p}$ (g)	M_{mv} (g)	$M_{cas.pre}$ (g)	$M_{activante}$ (g)	M_{exceso} (g)	$M_{C.impre}$ (g)	M_{H2O+Ac} (g)	$M_{C.act.}$ (g)	M_{Imp} (g)	$M_{C.act.final}$ (g)
E ₁₋₁	10,5080	0,4490	10,0590	38,1390	27,9970	20,2010	9,3770	10,8240	3,5730	7,2510
E ₂₋₁	10,5020	0,4460	10,0560	38,1360	27,7720	20,4200	10,2690	10,1510	2,9640	7,1870
E ₃₋₁	10,5060	0,4480	10,0580	41,6480	30,5790	21,1270	10,7750	10,3520	3,4180	6,9340
E ₄₋₁	10,5000	0,4430	10,0570	41,6470	30,2430	21,4610	11,1080	10,3530	3,5010	6,8520
E ₅₋₁	10,5050	0,4440	10,0610	38,1410	27,5710	20,6310	10,1880	10,4430	2,6060	7,8370
E ₆₋₁	10,5000	0,4480	10,0520	38,1320	27,2080	20,9760	10,1680	10,8080	2,7700	8,0380
E ₇₋₁	10,5040	0,4410	10,0630	41,6530	30,3210	21,3950	10,8020	10,5930	3,5060	7,0870
E ₈₋₁	10,5070	0,4470	10,0600	41,6500	30,4400	21,2700	10,3450	10,9250	4,0050	6,9200

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-25. Corrientes del balance de materia para cada experimento réplica 2

Muestra	$M_{cas.p}$ (g)	M_{mv} (g)	$M_{cas.pre}$ (g)	$M_{activante}$ (g)	M_{exceso} (g)	$M_{C.impre}$ (g)	M_{H2O+Ac} (g)	$M_{C.act.}$ (g)	M_{Imp} (g)	$M_{C.act.final}$ (g)
E ₁₋₂	10,5000	0,4480	10,0520	38,1320	27,0710	21,1130	10,3520	10,7610	3,8200	6,9410
E ₂₋₂	10,5050	0,4410	10,0640	38,1440	27,2640	20,9440	10,2170	10,7270	3,7290	6,9980
E ₃₋₂	10,5060	0,4330	10,0730	41,6630	29,8800	21,8560	10,5380	11,3180	4,2790	7,0390
E ₄₋₂	10,5000	0,4750	10,0250	41,6150	30,3200	21,3200	10,5150	10,8050	3,7770	7,0280
E ₅₋₂	10,5090	0,4370	10,0720	38,1520	28,1610	20,0630	10,2020	9,8610	2,0950	7,7660
E ₆₋₂	10,5020	0,4380	10,0640	38,1440	27,2190	20,9890	10,1190	10,8700	2,8520	8,0180
E ₇₋₂	10,5080	0,4420	10,0660	41,6560	30,8050	20,9170	10,2740	10,6430	3,5060	7,1370
E ₈₋₂	10,5030	0,4320	10,0710	41,6610	30,1240	21,6080	10,4600	11,1480	3,9190	7,2290

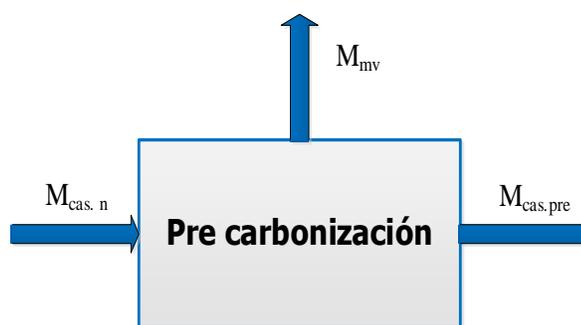
Fuente: Elaboración propia, 2022

4.10.1. Balance de materia por proceso

4.10.1.1. Balance de materia en el proceso de pre carbonización

El proceso de pre carbonización se realiza en una mufla a una temperatura de 300 °C por el lapso de 20 min. A continuación, en la figura 4-4, se muestran los flujos del proceso de pre-carbonización.

Fig. 4-4. Diagrama de flujo del proceso de pre carbonización de la cáscara de plátano



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El balance de materia del proceso de pre carbonización es:

$$M_{cas.p} - M_{mv} = M_{cas.pre} \quad (22)$$

Dónde:

$M_{cas.p}$: Masa de cáscara de plátano seca

M_{mv} : Masa de material volátil de la cáscara de plátano

$M_{cas.pre}$: Masa de cáscara de plátano pre carbonizada

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes del proceso se detallan en las tablas IV-26 y IV-27.

Tabla IV-26. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 1

Muestra	$M_{cas.p}$ (g)	M_{mv} (g)	$M_{cas.pre}$ (g)
E ₁₋₁	10,5080	0,4490	10,0590
E ₂₋₁	10,5020	0,4460	10,0560
E ₃₋₁	10,5060	0,4480	10,0580
E ₄₋₁	10,5000	0,4430	10,0570
E ₅₋₁	10,5050	0,4440	10,0610
E ₆₋₁	10,5000	0,4480	10,0520
E ₇₋₁	10,5040	0,4410	10,0630
E ₈₋₁	10,5070	0,4470	10,0600

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-27. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 2

Muestra	$M_{cas.n}$ (g)	M_{mv} (g)	$M_{cas.pre}$ (g)
E ₁₋₂	10,5000	0,4480	10,0520
E ₂₋₂	10,5050	0,4410	10,0640
E ₃₋₂	10,5060	0,4330	10,0730
E ₄₋₂	10,5000	0,4750	10,0250
E ₅₋₂	10,5090	0,4370	10,0720
E ₆₋₂	10,5020	0,4380	10,0640
E ₇₋₂	10,5080	0,4420	10,0660
E ₈₋₂	10,5030	0,4320	10,0710

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10.1.2. Balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico

En el proceso de impregnación de la cáscara de plátano pre carbonizada se utilizó como agente activante el ácido fosfórico en dos diferentes concentraciones al 40% y 45%, la

impregnación se realizó en vasos precipitados, a temperatura ambiente con una relación de impregnación de 3:1.

La impregnación se realizó por 24 horas con agitación de manera ocasional, posteriormente se quitó el exceso de ácido fosfórico para colocar la masa de cáscara de plátano pre carbonizada e impregnada en los crisoles, para quitar el exceso se realizó una filtración al vacío para poder extraer la mayor cantidad posible de ácido fosfórico.

A continuación, en la figura 4-5, se muestran los flujos del proceso de impregnación.

Fig. 4-5. Diagrama de flujo del proceso de impregnación con ácido fosfórico



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico es:

$$M_{cas.pre} + M_{activante} - M_{exceso} = M_{C.impre}. \quad (23)$$

Dónde:

$M_{cas.pre}$: Masa de la cáscara de plátano pre carbonizada

$M_{activante}$: Masa de agente activante

M_{exceso} : Masa en exceso de agente activante

$M_{C.impre}$: Masa de cáscara de plátano impregnada

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes del proceso se detallan en las tablas IV-28 y IV-29.

Tabla IV-28. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 1

Muestra	$M_{cas.pre}$ (g)	$M_{activante}$ (g)	M_{exceso} (g)	$M_{C.impre}$ (g)
E ₁₋₁	10,0590	38,1390	27,9970	20,2010
E ₂₋₁	10,0560	38,1360	27,7720	20,4200
E ₃₋₁	10,0580	41,6480	30,5790	21,1270
E ₄₋₁	10,0570	41,6470	30,2430	21,4610
E ₅₋₁	10,0610	38,1410	27,5710	20,6310
E ₆₋₁	10,0520	38,1320	27,2080	20,9760
E ₇₋₁	10,0630	41,6530	30,3210	21,3950
E ₈₋₁	10,0600	41,6500	30,4400	21,2700

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-29. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 2

Muestra	$M_{cas.pre}$ (g)	$M_{activante}$ (g)	M_{exceso} (g)	$M_{C.impre}$ (g)
E ₁₋₂	10,0520	38,1320	27,0710	21,1130
E ₂₋₂	10,0640	38,1440	27,2640	20,9440
E ₃₋₂	10,0730	41,6630	29,8800	21,8560
E ₄₋₂	10,0250	41,6150	30,3200	21,3200
E ₅₋₂	10,0720	38,1520	28,1610	20,0630
E ₆₋₂	10,0640	38,1440	27,2190	20,9890
E ₇₋₂	10,0660	41,6560	30,8050	20,9170
E ₈₋₂	10,0710	41,6610	30,1240	21,6080

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10.1.3. Balance de materia del proceso de activación

El proceso de activación química es el más importante, ya que en esta etapa la materia prima se convierte en carbón activado.

La activación química se realizó en una mufla a las temperaturas seleccionadas (500 °C y 600 °C) durante 1 y 2 horas.

A continuación, en la figura 4-6, se muestran los flujos del proceso de activación.

Fig. 4-6. Diagrama de flujo del proceso de activación



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico es:

$$M_{C.impre.} - M_{H2O+Ac} = M_{C.act.} \quad (24)$$

Dónde:

$M_{C.impre.}$: Masa de cáscara de plátano impregnada

M_{H2O+Ac} : Masa de material volátil del agente activante

$M_{C.act.}$: Masa de carbón activado

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes del proceso se detallan en las tablas IV-30 y IV-31.

Tabla IV-30. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 1

Muestra	$M_{C.impre}$ (g)	M_{H2O+Ac} (g)	$M_{C.act.}$ (g)
E ₁₋₁	20,2010	9,3770	10,8240
E ₂₋₁	20,4200	10,2690	10,1510
E ₃₋₁	21,1270	10,7750	10,3520
E ₄₋₁	21,4610	11,1080	10,3530
E ₅₋₁	20,6310	10,1880	10,4430
E ₆₋₁	20,9760	10,1680	10,8080
E ₇₋₁	21,3950	10,8020	10,5930
E ₈₋₁	21,2700	10,3450	10,9250

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-31. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 2

Muestra	$M_{C.impre}$ (g)	M_{H2O+Ac} (g)	$M_{C.act.}$ (g)
E ₁₋₂	21,1130	10,3520	10,7610
E ₂₋₂	20,9440	10,2170	10,7270
E ₃₋₂	21,8560	10,5380	11,3180
E ₄₋₂	21,3200	10,5150	10,8050
E ₅₋₂	20,0630	10,2020	9,8610
E ₆₋₂	20,9890	10,1190	10,8700
E ₇₋₂	20,9170	10,2740	10,6430
E ₈₋₂	21,6080	10,4600	11,1480

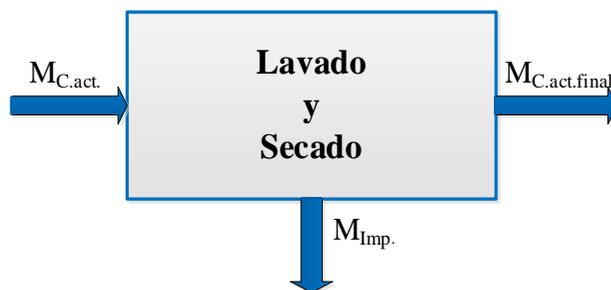
Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10.1.4. Balance de materia del proceso de lavado y secado

En el proceso de lavado se eliminan todas las impurezas, rastros del precursor y sales inorgánicas y orgánicas que se hubiesen podido formar.

A continuación, en la figura 4-7, se muestran los flujos del proceso de lavado y secado.

Fig. 4-7. Diagrama de flujo del proceso de lavado y secado



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico es:

$$M_{C.act.} - M_{Imp} = M_{C.act.final.} \quad (25)$$

Dónde:

$M_{C.act.}$ = Masa de carbón activado

M_{Imp} = Masa de impurezas y pérdidas

$M_{C.act.final.}$ = Masa de carbón activado limpio

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes del proceso se detallan en las tablas IV-32 y IV-33.

Tabla IV-22. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 1

Muestra	$M_{C.act.}$ (g)	M_{Imp} (g)	$M_{C.act.final}$ (g)
E ₁₋₁	10,8240	3,5730	7,2510
E ₂₋₁	10,1510	2,9640	7,1870
E ₃₋₁	10,3520	3,4180	6,9340
E ₄₋₁	10,3530	3,5010	6,8520
E ₅₋₁	10,4430	2,6060	7,8370
E ₆₋₁	10,8080	2,7700	8,0380
E ₇₋₁	10,5930	3,5060	7,0870
E ₈₋₁	10,9250	4,0050	6,9200

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla IV-33. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 2

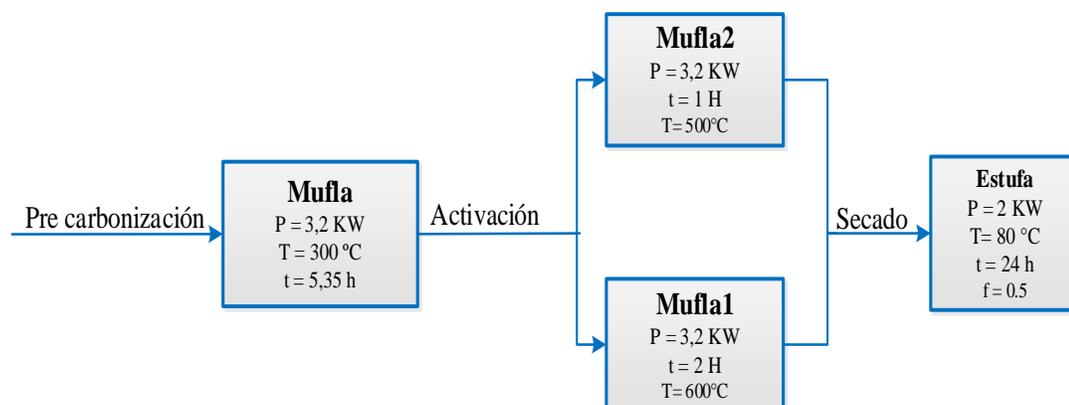
Muestra	$M_{C.act.}$ (g)	M_{Imp} (g)	$M_{C.act.final}$ (g)
E ₁₋₂	10,7610	3,8200	6,9410
E ₂₋₂	10,7270	3,7290	6,9980
E ₃₋₂	11,3180	4,2790	7,0390
E ₄₋₂	10,8050	3,7770	7,0280
E ₅₋₂	9,8610	2,0950	7,7660
E ₆₋₂	10,8700	2,8520	8,0180
E ₇₋₂	10,6430	3,5060	7,1370
E ₈₋₂	11,1480	3,9190	7,2290

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10.2. Balance de energía

En la figura 4-8, se muestra el diagrama de flujo general del balance de energía de la investigación con todos los procesos realizados para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano, donde hubo consumo de energía eléctrica.

Fig. 4-8. Diagrama de flujo general del balance de energía



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la tabla IV-34 se muestran, los valores del consumo energético en cada uno de los procesos realizados en la obtención de carbón activado de cáscara de plátano.

Tabla IV-34. Valores de consumo energético del balance de energía

Procesos	Equipo utilizado	Consumo energético por equipo (Kwh)	Número de veces utilizado	Total, energía (Kwh)
Pre carbonización	Mufla	17,1200	1	17,1200
Activación	Mufla ₁	3,2000	4	12,8000
	Mufla ₂	6,4000	4	25,6000
Secado	Estufa	48	2	96
Total, energía consumida				151,5200

Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.10.2.1. Balance de energía por proceso

Los balances de energía son realizados a cada uno de los procesos en los que hubo un consumo de energía.

4.10.2.2. Balance de energía en el proceso de pre carbonización

En el proceso de pre carbonización se realiza en una mufla a una temperatura de 300 °C por el lapso de 20 min, con un peso de materia prima de aproximadamente 10,5 gr de cáscara de plátano seco, este procedimiento se repitió hasta alcanzar un peso aproximado de 1,7 kg por lo cual se utilizó la mufla por un tiempo de 5,35 h.

Datos

Tiempo = $t = 5,35$ h

Potencia de la mufla = $P_{Mufla} = 3,2$ Kw

Temperatura de mufla = 300 ° C

$$E_{Mufla} = P_{Mufla} \times t \quad (26)$$

$$E_{Mufla} = 3,2 \text{ KW} \times 5,35 \text{ h}$$

$$E_{Mufla} = 17,2 \text{ KWh}$$

$$E_{Mufla} = 17,2 \text{ KWh} \times 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KWh}} = 61632 \text{ KJ}$$

La energía consumida para el proceso de pre carbonización en la mufla es de 61632 KJ.

4.10.2.3. Balance de energía en el proceso de activación química

Para la activación del carbón activado se introdujeron 4 muestras en la mufla por 1 h y las otras 4 muestras por 2 h, las temperaturas utilizadas para la activación fueron; 500 °C y 600 °C respectivamente.

Datos

Tiempo 1 = $t_1 = 1$ h

Tiempo 2 = $t_2 = 2$ h

Temperatura 1 = 500 °C

Temperatura 2 = 600 °C

Potencia de la mufla = $P_{Mufla} = 3,2 \text{ KW}$

Para calcular la energía al t_1 el cual es de 1 h, se utiliza la siguiente ecuación.

$$E_{Mufla1} = P_{Mufla} \times t_1 \quad (27)$$

$$E_{Mufla1} = 3,2 \text{ KW} \times 1$$

$$E_{Mufla1} = 3,2 \text{ KW h}$$

$$E_{Mufla1} = 3,2 \text{ KW h} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{KW h}} = 11520 \text{ KJ}$$

Al resultado se le multiplica por los cuatros experimentos que se realizó a 1 h para tener el total de la energía para la activación.

$$E_{Mufla1 \text{ total}} = 3,2 \text{ KW h} \times 4 = 12,8 \text{ KW h} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 46080 \text{ KJ}$$

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular la energía al t_2 el cual es de 2 h.

$$E_{Mufla2} = P_{Mufla} \times t_2 \quad (28)$$

$$E_{Mufla2} = 3,2 \text{ KW} \times 2$$

$$E_{Mufla2} = 6,4 \text{ KW h}$$

$$E_{Mufla2} = 6,4 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KW h}} = 23040 \text{ kJ}$$

Al resultado se le multiplica por los cuatros experimentos que se realizó a 2 h para tener el total de la energía para la activación.

$$E_{Mufla2 \text{ total}} = 6,4 \text{ KW h} \times 4 = 25,6 \text{ KW h} \times 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KW h}} = 92160 \text{ KJ}$$

Para obtener el total de la energía utilizada por la mufla en el proceso de activación, se suma el total de las energías utilizadas a 1 h y 2 h.

$$\begin{aligned} E_{Mufla1 \text{ total}} + E_{Mufla2 \text{ total}} &= 12,8 \text{ KW h} + 25,6 \text{ KW h} \\ &= 38,4 \text{ KW h} \times 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{KW h}} = 138240 \text{ KJ} \end{aligned}$$

La energía consumida en el proceso de activación en la mufla es de 138240 KJ.

4.10.2.4. Balance de energía en el proceso de secado

Se secó el carbón activado previamente lavado a una temperatura de 80 ° C por el lapso de 24 horas, se introdujeron cuatro muestras a la estufa y posteriormente otras cuatro muestras, entonces se utilizó la estufa por un tiempo de 48 h.

Datos

Tiempo = $t = 48$ h

Temperatura = 80 ° C

Factor = $f = 0,5$

Potencia de la estufa = $P_{estufa} = 2$ KW

$$E_{estufa} = P_{horno} \times t \times f \quad (29)$$

$$E_{estufa} = 2 \text{ KW} \times 48 \text{ h} \times 0,5$$

$$E_{estufa} = 48 \text{ KW h}$$

$$E_{estufa} = 48 \text{ KW h} \times 3600 \frac{\text{KJ}}{\text{kWh}} = 172800 \text{ KJ}$$

La energía consumida para el proceso de secado en la estufa es de 172800 KJ.

4.11. Análisis estadístico del diseño factorial

La varianza se realiza con la finalidad de analizar las diferencias o semejanzas significativas tanto de las medias como de las varianzas, donde una alta o baja razón implicarían la aceptación o rechazo de la hipótesis, y por otro lado se revela el efecto que tiene una variable independiente sobre otra dependiente.

Para el análisis estadístico del diseño experimental, se utilizó el programa **SPSS 25.0** (*Statistical Package for the Social Sciencies*) para Windows, el cual permite un

tratamiento integrado de todas las fases que conlleva el análisis de datos, obteniéndose resultados más representativos y confiables.

4.11.1. Análisis estadístico del % de remoción

Para el análisis estadístico del % de remoción se utilizaron datos de la tabla III-4, tabla IV-5 y tabla IV-6.

En la Tabla IV-35, se muestra los datos que son introducidos al programa para un Diseño Factorial 2^3 .

Tabla IV-35. Datos para el cálculo del análisis de varianza del % de remoción

°N Corridas	Tiempo	Concentración	Temperatura	% Rem
1	-1	-1	-1	95,8111
2	1	-1	-1	95,2169
3	-1	1	-1	96,0586
4	1	1	-1	96,2567
5	-1	-1	1	95,3159
6	1	-1	1	94,9198
7	-1	1	1	97,6431
8	1	1	1	96,0586
9	-1	-1	-1	95,5635
10	1	-1	-1	95,4644
11	-1	1	-1	95,9101
12	1	1	-1	96,4052
13	-1	-1	1	95,2169
14	1	-1	1	94,9693
15	-1	1	1	97,6926
16	1	1	1	96,1081

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Tabla IV-36, se muestra los factores y el número de ensayos que se realizó para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).

Tabla IV-36. Factores Inter sujetos para el % de remoción

Factores Inter sujetos		
		N
Tiempo	-1	8
	1	8
Temperatura	-1	8
	1	8
Concentración	-1	8
	1	8

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

La Tabla IV-37 permite apreciar las variables significativas para la variable dependiente “% de Remoción” en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano con un nivel de confianza del 95%, es decir, variables que poseen un nivel de significancia menor al 5%, las cuales son: tiempo, concentración y las interacciones tiempo-temperatura y temperatura-concentración.

Mientras que por otro lado las variables no significativas como la temperatura y la interacción tiempo-concentración, son eliminadas para proceder a realizar el análisis de regresión lineal, el cual permite obtener una fórmula, la cual usando las variables del proceso da como resultado el % de remoción del modelo.

Tabla IV-37. Pruebas de efectos Inter sujetos para el % de remoción

Pruebas de efectos Inter sujetos					
Variable dependiente: % de Remoción					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	9,091 ^a	6	1,515	13,014	0,001
Intersección	147189,43	1	147189,43	1264205,6	0,000
Tiempo	0,909	1	0,909	7,805	0,021
Temperatura concentración	0,096	1	0,096	0,824	0,388
t*T	5,829	1	5,829	50,062	0,000
t* C	0,909	1	0,909	7,805	0,021
T* C	0,081	1	0,081	0,696	0,426
T* C	1,268	1	1,268	10,895	0,009
Error	1,048	9	0,116		
Total	147199,57	16			
Total, corregido	10,139	15			

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la Tabla IV-38, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 95,4 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla IV-38. Ajustes de datos para el modelo lineal general

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,977 ^a	0,954	0,947	1,2450569
a. Predictores: (Constante), T*C, t*T, Concentración, Tiempo.				
b. Variable dependiente: % Remoción				

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-39 se muestran los cálculos realizados por el paquete IBM SPSS Statistics 25 para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales del % de Remoción.

Tabla IV-39. ANOVA para el % de Remoción

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	8,914	4	2,229	20,014	,000 ^b
	Residuo	1,225	11	,111		
	Total	10,139	15			
a. Variable dependiente: % Remoción						
b. Predictores: (Constante), T*C, t*T, Concentración, Tiempo						

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-40, se muestran las variables e interacciones significativas junto con los valores numéricos de B, con los cuales se obtiene la ecuación de la regresión lineal.

Tabla IV-40. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el % de Remoción.

Coeficientes ^a								
Modelo		Coef. no estandarizados		Coef. estandarizados	t-student	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inf.	Límite sup.
1	(Constante)	95,913	0,083		1149,707	0,000	95,730	96,097
	Tiempo	-0,238	0,083	-0,299	-2,857	0,016	-0,422	-0,055
	Concentración	0,604	0,083	0,758	7,235	0,000	0,420	0,787
	t*T	-0,238	0,083	-0,299	-2,857	0,016	-0,422	-0,055
	T*C	0,282	0,083	0,354	3,375	0,006	0,098	0,465
a. Variable dependiente: % Remoción								

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

Por lo tanto, la ecuación de la regresión lineal para el % de remoción es:

$$\% \text{ Remoción} = 95,913 - 0,238 \times t + 0,604 \times C - 0,238(t \times T) + 0,282(T \times C) \quad (30)$$

Donde:

% Remoción: Porcentaje de remoción

T: Temperatura

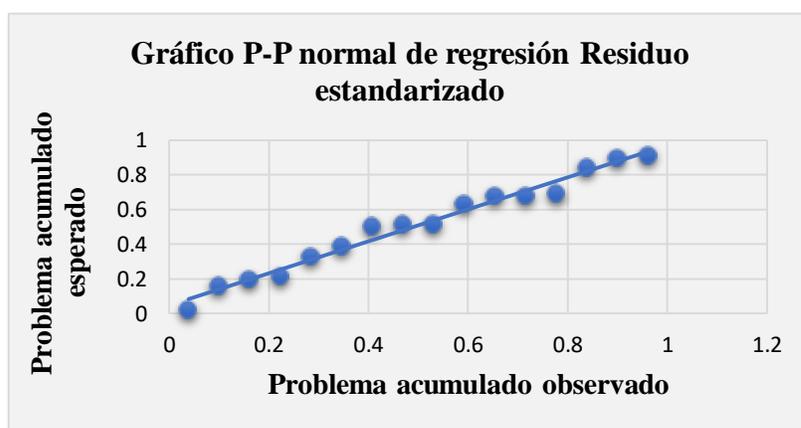
C: Concentración

t: Tiempo

De la ecuación (30) se analizó que, si el tiempo aumenta, el % de remoción disminuye y si la concentración y la temperatura aumenta, el % de remoción se eleva.

En la figura 4-9 se observa que existen puntos que están fuera de la línea, sin embargo, el desajuste no muestra gran significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Fig. 4-9. Probabilidad normal del % de Remoción



Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

De la tabla IV-41 se puede apreciar que no existe gran variación del % de remoción observado con el % de remoción del modelo, además se observa que los porcentajes de remoción más altos del modelo coinciden con las muestras **E7-1** y **E7-2**, mostrados en la tabla IV-5 y la tabla IV-6.

Tabla IV-41. Comparación del % de remoción observado y el % de remoción del modelo

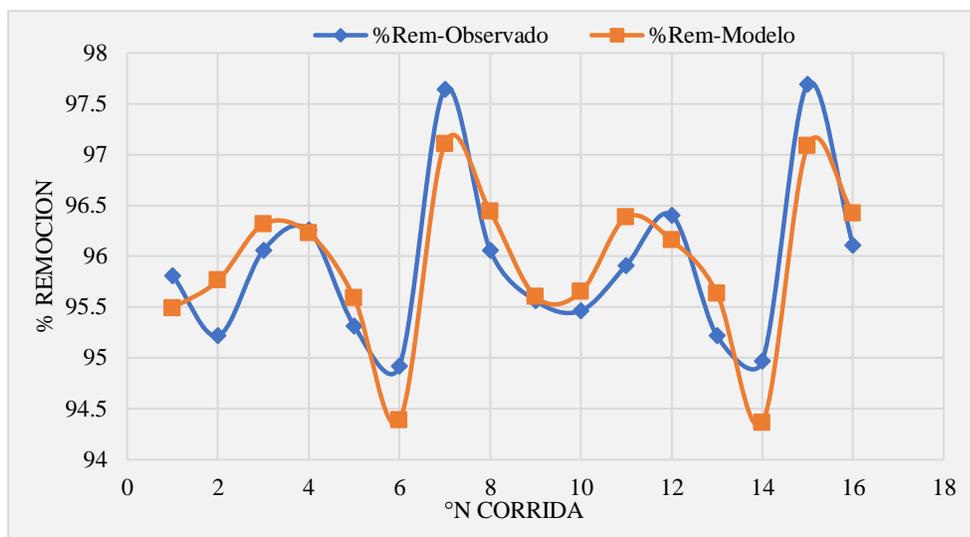
°N Corrida	% Remoción observado	% Remoción modelo	Error
1	95,8111	95,4913	0,3197
2	95,2169	95,7613	-0,5443

3	96,0586	96,3153	-0,2563
4	96,2567	96,2253	0,0317
5	95,3159	95,5905	-0,2745
6	94,9198	94,3839	0,5361
7	97,6431	97,1076	0,5354
8	96,0586	96,4411	-0,3821
9	95,5635	95,6040	-0,0410
10	95,4644	95,6490	-0,1850
11	95,9101	96,3830	-0,4730
12	96,4052	96,1580	0,2470
13	95,2169	95,6355	-0,4185
14	94,9693	94,3616	0,6074
15	97,6926	97,0849	0,6081
16	96,1081	96,4188	-0,3108

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Figura 4-10, se muestra gráficamente el % de remoción de azul de metileno observado y el % de remoción de azul de metileno del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no muy significativo.

Fig. 4-10. Comparación gráfica del % de remoción observado y el % de remoción del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.11.2. Análisis estadístico del área superficial

Para el análisis estadístico del % de remoción se utilizaron datos de la tabla III-4, tabla IV-13 y tabla IV-14.

En la Tabla IV-42, se muestra los datos que son introducidos al programa para un Diseño Factorial 2^3 .

Tabla IV-42. Datos para el cálculo del área superficial

°N Corridas	Tiempo	Concentración	Temperatura	Área superficial
1	-1	-1	-1	669,6482
2	1	-1	-1	680,6248
3	-1	1	-1	687,3241
4	1	1	-1	699,2587
5	-1	-1	1	676,3421
6	1	-1	1	675,9870
7	-1	1	1	707,6389
8	1	1	1	690,6073
9	-1	-1	-1	676,2819
10	1	-1	-1	678,8616
11	-1	1	-1	689,8224
12	1	1	-1	684,5936
13	-1	-1	1	677,1344
14	1	-1	1	685,6975
15	-1	1	1	702,0637
16	1	1	1	691,6283

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Tabla IV-43, se muestra los factores y el número de ensayos que se realizó para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).

Tabla IV-43. Factores Inter sujetos para el área superficial

Factores Inter sujetos		
		N
Tiempo	-1	8
	1	8
Temperatura	-1	8
	1	8
Concentración	-1	8
	1	8

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

La Tabla IV-44, permite apreciar las variables significativas para la variable dependiente “área superficial” en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano con un nivel de confianza del 95%, es decir, variables que poseen

un nivel de significancia menor al 5%, las cuales son: temperatura, tiempo, concentración y las interacciones tiempo-temperatura y tiempo-concentración.

Mientras que por otro lado la variable no significativa como lo es la interacción temperatura-concentración, es eliminada para proceder a realizar el análisis de regresión lineal, el cual permite obtener una fórmula, la cual usando las variables del proceso da como resultado el área superficial.

Tabla IV-44. Pruebas de efectos Inter sujetos para el área superficial

Pruebas de efectos Inter sujetos					
Variable dependiente: Área Superficial					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	130,3907 ^a	6	273,171	41,555	0,000
Intersección	6023,005	1	6023,005	167,593	0,000
Temperatura	6435,048	1	6435,048	123,051	0,000
Tiempo	310,086	1	310,086	5,929	0,038
Concentración	4343,832	1	4343,832	83,063	0,000
T * t	1099,834	1	1099,834	21,031	0,001
T* C	102,328	1	102,328	1,957	0,195
t * C	747,899	1	747,899	14,301	0,004
Error	470,662	9	52,296		
Total	6653,695	16			
Total, corregido	1359,690	15			

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la Tabla IV-45, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 95,8 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla IV-45. Ajustes de datos para el modelo lineal general para el área superficial

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,979 ^a	0,958	0,936	1,56962
a. Predictores: (Constante), t*C, T*t, Temperatura, Concentración, Tiempo.				
b. Variable dependiente: área superficial				

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-46 se muestran los cálculos realizados por el paquete IBM SPSS Statistics 25 para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales del área superficial.

Tabla IV-46. ANOVA para el área superficial

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	136,699	5	258,340	55,155	0,000 ^b
	Residuo	72,991	10	57,299		
	Total	139,690	15			
a. Variable dependiente: área superficial						
b. Predictores: (Constante), t*C, T*t, Temperatura, Concentración, Tiempo						

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-47, se muestran las variables e interacciones significativas junto con los valores numéricos de B, con los cuales se obtiene la ecuación de la regresión lineal.

Tabla IV-47. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el área superficial

Coeficientes ^a								
Modelo	Coef. no estandarizados		Coef. Estandarizados	t-student	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inf.	Límite sup.	
1	(Constante)	645,466	1,892		341,083	0,000	641,250	649,683
	Tiempo	-4,402	1,892	-0,152	-2,236	0,042	-8,619	-0,186
	Concentración	16,477	1,892	0,567	8,707	0,000	12,260	20,693
	Temperatura	20,055	1,892	0,690	10,597	0,000	15,838	24,271
	T*t	-8,291	1,892	-0,285	-4,381	0,001	-12,507	-4,074
	t*C	-6,837	1,892	-0,235	-3,613	0,005	-11,053	-2,620

a. Variable dependiente: área superficial

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

Por lo tanto, la ecuación de la regresión lineal para el % de remoción es:

$$A_{sup} = 645,466 - 4,402 \times t + 16,477 \times C + 20,055 \times T - 8,291(T \times t) - 6,837 (t \times C) \quad (31)$$

Donde:

A_{sup} : Porcentaje de remoción

T: Temperatura

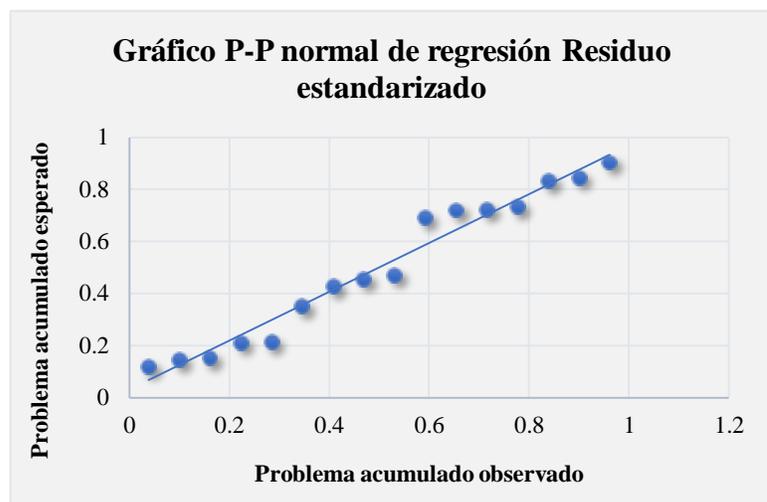
C: Concentración

t: Tiempo

De la ecuación (31) se analizó que, si el tiempo aumenta, el área superficial disminuye y si la concentración y la temperatura aumentan, el área superficial se incrementa.

En la figura 4-11 se observa que existen puntos que están fuera de la línea, sin embargo, el desajuste no muestra gran significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Fig. 4-11. Probabilidad normal del área superficial



Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

De la tabla IV-48 se puede apreciar que no existe gran variación del área superficial observada con el área superficial del modelo, además se observa que los valores del área superficial más altos del modelo coinciden con las muestras **E7-1** y **E7-2**, mostrados en las tablas IV-13 y la tabla IV-14.

Tabla IV-48. Comparación del área superficial observada y el área superficial del modelo

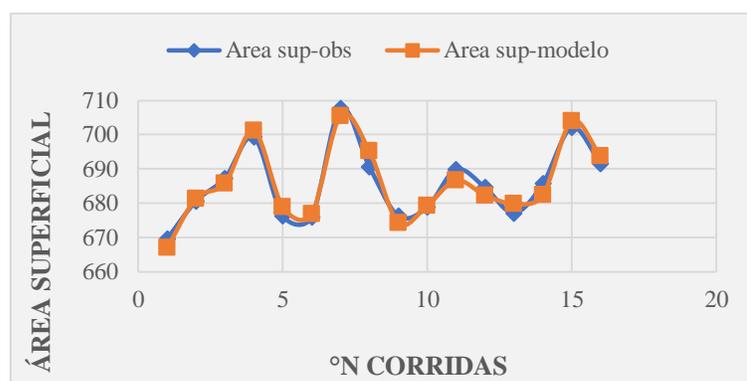
°N Corrida	Asup observada	Asup modelo	Error
------------	----------------	-------------	-------

1	669,6482	667,0360	2,6120
2	680,6248	681,3940	-0,7690
3	687,3241	685,7940	1,5300
4	699,2587	701,1250	-1,8660
5	676,3421	678,9411	-2,5991
6	675,9870	676,9092	-0,9222
7	707,6389	705,5170	2,1220
8	690,6073	695,1840	-4,5770
9	676,2819	674,2564	2,0256
10	678,8616	679,3546	-0,4926
11	689,8224	686,6615	3,1605
12	684,5936	682,3180	2,2760
13	677,1344	679,8700	-2,7360
14	685,6975	682,3560	3,3420
15	702,0637	703,9648	-1,9008
16	691,6283	693,6840	-2,0560

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Figura 4-12, se muestra gráficamente el área superficial observada y el área superficial del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no muy significativo.

Fig. 4-12. Comparación grafica del área superficial observada y el área superficial del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.11.3. Análisis estadístico de la densidad aparente

Para el análisis estadístico de la densidad aparente se utilizaron datos de la tabla III-4, tabla IV-17 y tabla IV-18.

En la Tabla IV-49, se muestra los datos que son introducidos al programa para un Diseño Factorial 2^3 .

Tabla IV-49. Datos para el cálculo del análisis de varianza de la densidad aparente

$^{\circ}\text{N}$ Corridas	Tiempo	Concentración	Temperatura	Densidad Aparente
1	-1	-1	-1	0,4217
2	1	-1	-1	0,4330
3	-1	1	-1	0,4705
4	1	1	-1	0,4775
5	-1	-1	1	0,3963
6	1	-1	1	0,4232
7	-1	1	1	0,5183
8	1	1	1	0,4894
9	-1	-1	-1	0,4207
10	1	-1	-1	0,4419
11	-1	1	-1	0,4697
12	1	1	-1	0,4661
13	-1	-1	1	0,3858
14	1	-1	1	0,4314
15	-1	1	1	0,5228
16	1	1	1	0,4853

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Tabla IV-50, se muestra los factores y el número de ensayos que se realizó para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).

Tabla IV-50. Factores Inter sujetos para la densidad aparente

Factores Inter sujetos		
		N
Tiempo	-1	8
	1	8
Temperatura	-1	8
	1	8
Concentración	-1	8
	1	8

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

La Tabla IV-51, permite apreciar las variables significativas para la variable dependiente “**densidad aparente**” en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano con un nivel de confianza del 95%, es decir, variables que poseen un nivel de significancia menor al 5%, las cuales son: concentración y las interacciones temperatura-concentración y tiempo-concentración.

Mientras que por otro lado las variables no significativas como el tiempo, temperatura y la interacción tiempo-temperatura, son eliminadas para proceder a realizar el análisis de regresión lineal, el cual permite obtener una fórmula, la cual usando las variables del proceso da como resultado la densidad aparente.

Tabla IV-51. Pruebas de efectos Inter sujetos para la densidad aparente

Pruebas de efectos Inter sujetos

Variable dependiente: Densidad aparente					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	0,024 ^a	6	0,004	43,182	0,000
Intersección	3,294	1	3,294	35937,000	0,000
Tiempo	1,000E-4	1	1,000E-4	1,091	0,324
Temperatura	0,000	1	0,000	2,455	0,152
Concentración	0,020	1	0,020	213,818	0,000
t * T	0,000	1	0,000	1,091	0,324
t * C	0,001	1	0,001	13,364	0,005
T * C	0,003	1	0,003	27,273	0,001
Error	0,001	9	9,167E-5		
Total	3,319	16			
Total, corregido	0,025	15			

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la Tabla IV-52, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 96,8 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla IV-52. Ajustes de datos para el modelo lineal general de la densidad aparente

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,983 ^a	0,968	0,949	1,3695435
a. Predictores: (Constante), T*C, t*C, Concentración.				
b. Variable dependiente: densidad aparente				

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-53 se muestran los cálculos realizados por el paquete IBM SPSS Statistics 25, para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales de la densidad aparente

Tabla IV-53. ANOVA para la densidad aparente

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	0,023	3	0,008	74,640	0,000 ^b
	Residuo	0,000	12	0,000		
	Total	0,025	15			
a Variable dependiente: Densidad aparente						
b Predictores: (Constante), T*C, t*C, Concentración						

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-54, se muestran las variables e interacciones significativas junto con los valores numéricos de B, con los cuales se obtiene la ecuación de la regresión lineal.

Tabla IV-54. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para la densidad aparente

Coeficientes ^a								
Modelo		Coef. no estandarizados		Coef. Estandarizados	t-student	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inf.	Límite sup.
1	(Constante)	0,454	0,003		177,833	0,000	0,448	0,459
	Concentración	0,035	0,003	0,893	13,717	0,000	0,029	0,041
	t*C	-0,009	0,003	-0,223	-3,429	0,005	-0,014	-0,003
	T*C	0,013	0,003	0,319	4,899	0,000	0,007	0,018
a. Variable dependiente: densidad aparente								

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

Por lo tanto, la ecuación de la regresión lineal para la densidad aparente es:

$$Dap = 0,454 + 0,035 \times C - 0,009(t \times C) + 0,013(T \times C) \quad (32)$$

Donde:

Dap: Densidad aparente

T: Temperatura

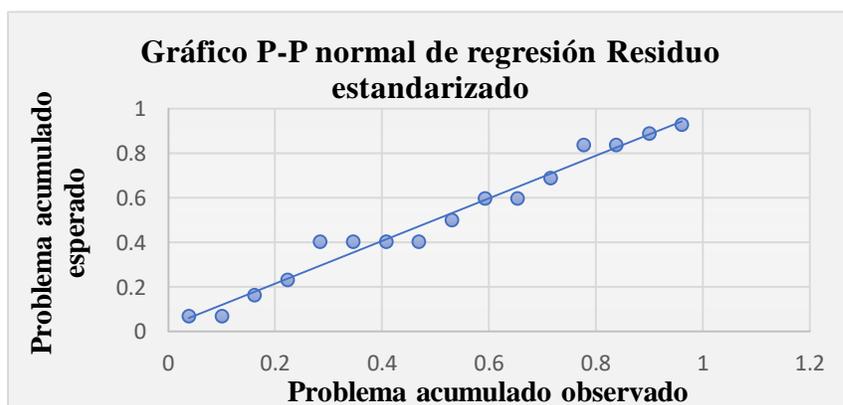
C: Concentración

t: Tiempo

De la ecuación (32) se analizó que, si el tiempo aumenta, la densidad aparente disminuye y si la concentración y la temperatura aumentan, la densidad aparente incrementa.

En la figura 4-14 se observa que existen puntos que están fuera de la línea, sin embargo, el desajuste no muestra gran significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Fig. 4-14. Probabilidad normal de la densidad aparente



Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

De la tabla IV-55 se puede apreciar que no existe gran variación de la densidad aparente observada con la densidad aparente del modelo, además se observa que las densidades aparentes más altas del modelo coinciden con las muestras “E7-1 y E7-2”, mostrados en la tabla IV-17 y la tabla IV-18.

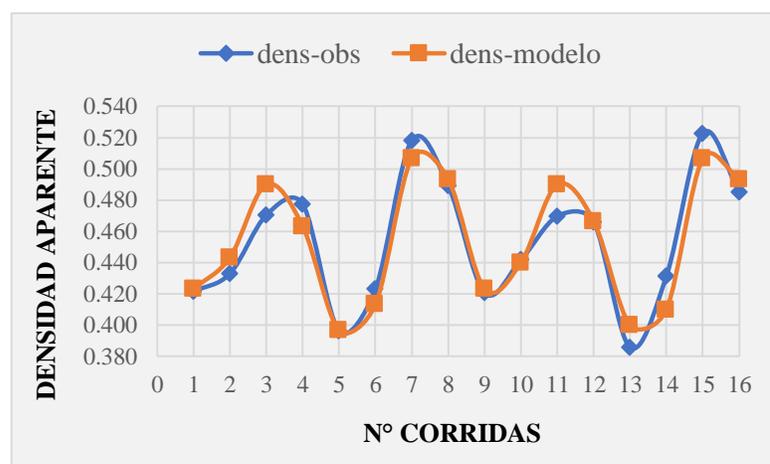
Tabla IV-55. Comparación de la densidad aparente observada y la densidad aparente del modelo

°N Corrida	Dap observada	Dap modelo	Error
1	0,4217	0,4233	-0,0017
2	0,4330	0,4433	-0,0103
3	0,4705	0,4900	-0,0195
4	0,4775	0,4633	0,0141
5	0,3963	0,3967	-0,0004
6	0,4232	0,4133	0,0099
7	0,5183	0,5067	0,0116
8	0,4894	0,4933	-0,0040
9	0,4207	0,4233	-0,0027
10	0,4419	0,4400	0,0019
11	0,4697	0,4900	-0,0203
12	0,4661	0,4667	-0,0006
13	0,3858	0,4000	-0,0142
14	0,4314	0,4100	0,0214
15	0,5228	0,5067	0,0161
16	0,4853	0,4933	-0,0080

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Figura 4-14, se muestra gráficamente la densidad aparente observada y la densidad aparente del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no muy significativo.

Fig. 4-14. Comparación gráfica de la densidad aparente observada y la densidad aparente del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2022.

4.11.4. Análisis estadístico del rendimiento del proceso

Para el análisis estadístico del rendimiento del proceso se utilizaron datos de la tabla III-4 y tabla IV-20.

En la Tabla IV-56, se muestra los datos que son introducidos al programa para un Diseño Factorial 2^3 .

Tabla IV-56. Datos para el cálculo del análisis de varianza del rendimiento del proceso

$^{\circ}\text{N}$ Corridas	Tiempo	Concentración	Temperatura	$\%n_{\text{proceso}}$
1	-1	-1	-1	69,0046
2	1	-1	-1	68,4346
3	-1	1	-1	66,0004
4	1	1	-1	65,2571
5	-1	-1	1	74,6026
6	1	-1	1	76,5524
7	-1	1	1	67,4695
8	1	1	1	65,8609
9	-1	-1	-1	66,1048
10	1	-1	-1	66,6159
11	-1	1	-1	66,9998
12	1	1	-1	66,9333
13	-1	-1	1	73,8986
14	1	-1	1	76,3474
15	-1	1	1	67,9197
16	1	1	1	68,8280

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Tabla IV-57, se muestra los factores y el número de ensayos que se realizó para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).

Tabla IV-57. Factores Inter sujetos para el rendimiento del proceso

Factores Inter sujetos		
		N
Tiempo	-1	8
	1	8
Temperatura	-1	8
	1	8
Concentración	-1	8
	1	8

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

La Tabla IV-58 permite apreciar las variables significativas para el “rendimiento” en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano con un nivel de confianza del 95%, es decir, variables que poseen un nivel de significancia menor al 5%, las cuales son: concentración, temperatura y la interacción concentración-temperatura.

Mientras que por otro lado las variables no significativas como el tiempo y las interacciones tiempo-concentración y tiempo-temperatura, son eliminadas para proceder a realizar el análisis de regresión lineal, el cual permite obtener una fórmula, la cual usando las variables del proceso da como resultado el rendimiento del proceso del modelo.

Tabla IV-58. Pruebas de efectos Inter sujetos para el rendimiento del proceso

Pruebas de efectos Inter sujetos					
Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	178,150 ^a	6	29,692	29,958	0,000
Intersección	76,658	1	76,658	77,346	0,000
Tiempo	1,722	1	1,722	1,738	0,220
Concentración	84,590	1	84,590	85,350	0,000
Temperatura	72,091	1	72,091	72,738	0,000
t * C	1,300	1	1,300	1,312	0,282
t * T	1,079	1	1,079	1,089	0,324
C * T	17,367	1	17,367	17,523	0,002
Error	8,920	9	0,991		
Total	76,845	16			
Total, corregido	18,070	15			

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la Tabla IV-52, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 96,4 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla IV-59. Ajustes de datos para el modelo lineal general

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,975 ^a	0,964	0,951	1,041169
a. Predictores: (Constante), C*T, Temperatura, Concentración.				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-60 se muestran los cálculos realizados por el paquete IBM SPSS Statistics 25, para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales del rendimiento del proceso.

Tabla IV-60. ANOVA para el rendimiento del proceso

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	174,048	3	58,016	53,466	0,000 ^b
	Residuo	13,021	12	1,085		
	Total	18,707	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), C*T, Temperatura, Concentración						

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

En la tabla IV-61, se muestran las variables e interacciones significativas junto con los valores numéricos de B, con los cuales se obtiene la ecuación de la regresión lineal.

Tabla IV-61. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el rendimiento del proceso

Coeficientes ^a								
Modelo	Coef. no estandarizados		Coef. estandarizados	t-student	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inf.	Límite sup.	
1	(Constante)	69,218	0,260		265,792	0,000	68,651	69,785
	Concentración	-2,299	0,260	-0,672	-8,829	0,000	-2,867	-1,732
	Temperatura	2,123	0,260	0,621	8,151	0,000	1,155	2,690
	C*T	-1,042	0,260	-0,305	-4,001	0,002	-1,609	-0,474
a. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

Por lo tanto, la ecuación de la regresión lineal para el rendimiento del proceso es:

$$\%n_{proceso} = 69,218 - 2,299 \times C + 2,123 \times T - 1,042(C \times T) \quad (33)$$

Donde:

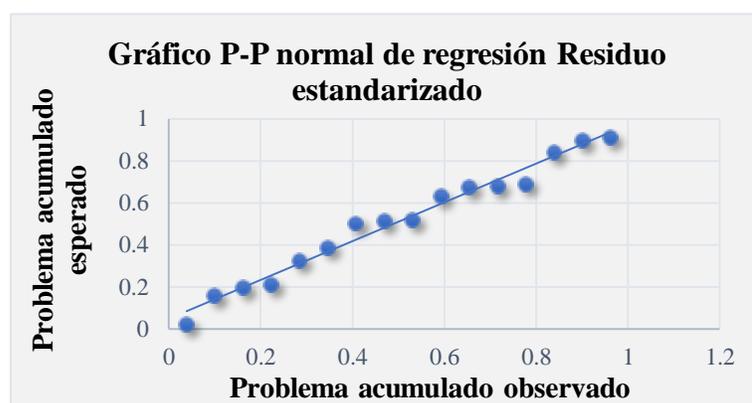
$\%n_{proceso}$: Rendimiento del proceso

T: Temperatura

C: Concentración

De la ecuación (33) se analizó que, si la concentración aumenta, el rendimiento del proceso disminuye y si la temperatura aumenta, el rendimiento del proceso se eleva. En la figura 4-15 se observa que existen puntos que están fuera de la línea, sin embargo, el desajuste no muestra gran significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Fig. 4-15. Probabilidad normal del rendimiento del proceso



Fuente: IBM SPSS statistics 25, 2022.

De la tabla IV-62 se puede apreciar que no existe una variación significativa del rendimiento observado con el rendimiento del modelo, además se observa que el porcentaje de los rendimientos más altos no coincide con las muestras de mejor calidad (E_{7-1} y E_{7-2}), esto quiere decir, que con los parámetros utilizados para obtener las muestras " E_{6-1} y E_{6-2} ", se obtendría mayor cantidad de carbón activado de cáscara de plátano.

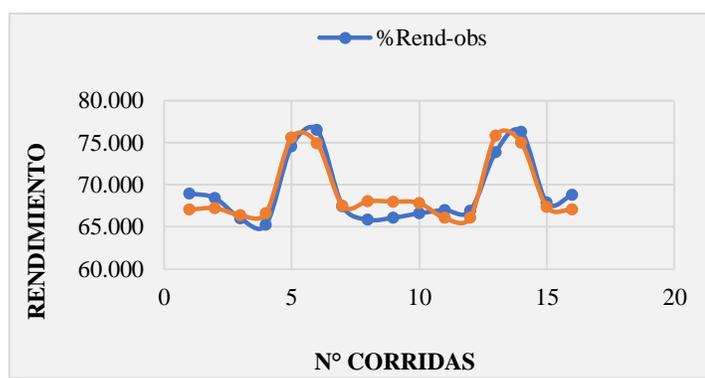
Tabla IV-62. Comparación del rendimiento del proceso observado y el rendimiento del proceso del modelo

°N Corrida	% $n_{proceso}$ observado	% $n_{proceso}$ modelo	Error
1	69,0046	67,0518	1,9528
2	68,4346	67,2417	1,1928
3	66,0004	66,3968	-0,3964
4	65,2571	66,6445	-1,3874
5	74,6026	75,5994	-0,9969
6	76,5524	74,9495	1,6029
7	67,4695	67,5362	-0,0666
8	65,8609	68,0724	-2,2115
9	66,1048	68,0184	-1,9136
10	66,6159	67,8480	-1,2321
11	66,9998	66,0636	0,9362
12	66,9333	66,0858	0,8476
13	73,8986	75,8341	-1,9355
14	76,3474	75,0178	1,3295
15	67,9197	67,3861	0,5336
16	68,8280	67,0834	1,7446

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la Figura 4-16, se muestra gráficamente el rendimiento del proceso observado y el rendimiento del proceso del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no muy significativo

Fig. 4-16. Comparación gráfica del rendimiento observado y el rendimiento del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2022.

CAPÍTULO V
COSTOS DEL PROYECTO

5. COSTOS DEL PROYECTO

5.1. Evaluación de costos

Para determinar el presupuesto de investigación se realiza la evaluación de costos de los gastos que se realizan durante la elaboración de todo el proyecto. Las tablas V-1, V-2 y V-3, muestran los detalles de los costos directos e indirectos.

Tabla V-1. Detalle costo de reactivos a utilizados en la parte experimental y análisis

Nº	Reactivo	Procedencia	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Ácido fosfórico al 85%		300	Litro	1	300
3	Agua destilada	Distribuidora Montellano	6,35	Litro	10	63,50
4	Ácido clorhídrico al 5%		300	Litro	0,5	150
5	Azul de metileno al 1%	CEVITA	230	Litro	0,3	69
6	Tiosulfato de sodio 0,1 N	CEVITA	200	Litro	0,5	100
7	Yodo 0,1 N	CEVITA	120,50	Litro	2	241
8	Almidón	CEVITA	79,50	Litro	0,5	39,80
Total						963,30

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla V-2. Detalle de costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental

Nº	Descripción	Procedencia	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Papel filtro Whatman 42	Distribuidora Montellano	5	Pza.	10	50
2	Pipeta de 10 ml	Distribuidora Montellano	21	Pza.	1	21
3	Piseta de 500 ml	Distribuidora Montellano	54	Pza.	1	54
4	Botellas ámbar de 500 ml	Distribuidora Montellano	7	Pza.	22	154
5	Frascos de 20 ml	Distribuidora Montellano	3	Pza.	16	48
6	Crisol de 100 ml	Distribuidora Montellano	20	Pza.	1	20
8	pH-metro	Distribuidora Montellano	90	Pza.	1	90
9	Bolsas	Librería	6	Pza.	4	24
10	Papel cebolla	Librería	6	Pza.	3	18
11	Probeta de 50 ml	Distribuidora Montellano	45	Pza.	1	45
Total						524

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Se puede observar que en la tabla V-2 no se colocó el costo de la materia prima, ya que esta fue adquirida de manera gratuita de la planta liofilizadora de frutas de Villa Tunari, debido a que la cáscara de plátano para ellos es un desecho.

Tabla V-3. Detalle de costos de Servicios y Materiales Directos e Indirectos

N°	Actividad	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Investigación en internet	190	Mes	4	760
2	Impresión	0,20	Hoja	2 000	400
3	Anillados	6	Anillado	6	36
4	Empastados	100	Empastado	4	400
5	Transporte Diario	10	Pasaje	15	150
6	Transporte materia prima	50	Pasaje	1	50
Total					1 796

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La tabla V-4, nos muestra los costos energéticos realizados en el proceso de obtención de carbón activado de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*), los valores de energía consumida se obtuvieron del balance de energía, estos datos pueden ser corroborados en la tabla IV-34.

Tabla V-4. Detalle de costos energéticos

N°	Etapas	Energía consumida (KW h)	Costo de KWh (Bs)	Costo (Bs)
1	Pre carbonización	17,120	0,90	15,408
2	Carbonización y activación	9,600	0,90	8,640
3	Secado	48	0,90	43,200
Total				67,248

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En la tabla V-5, se muestra el total de los costos realizados en el presente proyecto de investigación.

Tabla V-5. Costos totales

N°	Descripción	Costo (Bs)
1	Costo Reactivos utilizados en la parte experimental y análisis	963,30
2	Costos de Materiales adquiridos para realizar la parte experimental	524
3	Servicios y Materiales Directos e Indirectos	1 796
4	Costos energéticos	67,248
Total		3 350,55

Fuente: elaboración propia, 2022.

5.2. Costos de la elaboración del carbón activado de cáscara de plátano

A partir de los balances de materia y energía realizados, se puede estimar el costo de producción de 1 kg de carbón activado de cáscara de plátano.

Para determinar el costo de 1 kg de carbón activado se tomará como referencia el mejor carbón activado obtenido, el cual es la muestra “E₇” impregnada con ácido fosfórico al 45%, a una temperatura de activación de 600 °C por el lapso de tiempo de 1 hora y con una relación p/v 1:3.

Tabla V-6. Costo de elaboración de 1 kg de carbón activado

Nº	Descripción	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo (Bs)
1	Cáscara de plátano pre carbonizada (Kg)	1,415	0	0
2	Ácido fosfórico (l)	0,950	150	142,5
3	Energía eléctrica (KW h)	40,170	0,90	36,162
Total				178,662

Fuente: elaboración propia, 2022.

El costo de 1 kg de carbón activado usando energía eléctrica como fuente de energía y calor para la estufa y la mufla es de 178,662 Bs.

No se tomó en cuenta la mano de obra, ya que se trabajó de manera discontinua, además que este es un proyecto de investigación y si fuera incluida la mano de obra, elevaría el precio del carbón activado de manera significativa.

El precio del carbón activado obtenido de cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*), en comparación con el precio del carbón activado comercial es casi el triple, esto se debe al elevado costo del ácido fosfórico, ya en el momento que se realizó la parte experimental del proyecto, este reactivo no estaba siendo importado en nuestro país.

El precio del carbón activado obtenido y el precio del carbón activado comercial se encuentran en la tabla V-7.

Tabla V-7. Precios del carbón activado

Cantidad	Precio del carbón activado comercial (CLARIMEX)	Precio del carbón activado de cascara de plátano obtenido
1 kg	60 Bs	178,662 Bs

Fuente: Elaboración propia, 2022.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Respondiendo a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación, basados en los resultados, las conclusiones son las siguientes:

- Las propiedades fisicoquímicas y adsorptivas en base seca y base húmeda de la cáscara de plátano de la variedad “*Musa Cavendishii*” para la obtención de carbón activado son mostradas a continuación en la tabla VI-3.

Tabla VI-1. Características de la cáscara de plátano

Base húmeda	
% Humedad	89,1800
% Cenizas	1,2900
Base seca	
% Materia Volátil	2,2300
% Carbón Fijo	96,480
% Remoción	67,1000
Área Superficial	392,5153
Densidad aparente	0,4083

Fuente: Elaboración propia, 2022.

- Se seleccionó las características y parámetros de calidad del carbón activado de cascara de plátano (*Musa Cavendishii*), siguiendo las referencias bibliográficas, como también así las normas con las cuales son caracterizados los carbones activados comerciales.
- Para la selección del proceso tecnológico más adecuado en la obtención de carbón activado se analizó la activación física y la activación química, concluyendo que la activación química es la mejor opción. Dentro de la activación química se analizaron los diferentes agentes activantes, donde se concluye que el mejor agente activante es el ácido fosfórico.
- La fase experimental fue formulada y ejecutada siguiendo los procedimientos sugeridos por bibliografía y por las normas observadas en el cuadro II-3, todo

el procedimiento experimental puede ser observado en el capítulo III del presente proyecto.

- ✚ Se caracterizaron los carbones activados obtenidos, estudiando los parámetros de adsorción, como el % de remoción, área superficial y densidad aparente, el resultado de los mismos puede ser observado en las tablas IV-8, IV-15 y IV-19.
- ✚ Se determinó el rendimiento en masa y el rendimiento de eficiencia de los parámetros de adsorción estudiados de cada uno de los experimentos realizados, donde se llegó a la conclusión que, con los valores de las variables trabajadas, el carbón activado de cáscara de plátano de mejor calidad no coincide con el carbón activado de mayor cantidad, los resultados numéricos pueden ser verificados en la tabla IV-20.
- ✚ Una vez concluida la parte experimental, según las variables respuestas y corroborando por el análisis estadístico se determinó las condiciones más óptimas para la obtención experimental de carbón activado de cáscara plátano de la variedad "*Musa Cavendishii*" las cuales son: temperatura de activación de 600 ° C por el tiempo de 1 hora con una impregnación de H₃PO₄ al 45 % y con una relación p/v de 1:3.

El incremento de la concentración y de la temperatura conlleva a que las características de adsorción del carbón activado de la cáscara de plátano aumenten, ya que la concentración y en especial la temperatura está muy ligada a la química superficial del carbón activado.

En la tabla VI-2 se muestran las características del carbón activado obtenido de mejor calidad.

Tabla VI-2. Características del carbón activado obtenido de mejor calidad

Muestra	E₇
Índice de Yodo Promedio (mg/g)	604,8513
Área Superficial Promedio (m²/g)	704,8513
Masa Adsorbida Promedio (m²/g)	0,7368
Remoción de Azul de Metileno (%)	97,6679
Densidad aparente (g/cm³)	0,5205

Fuente: Elaboración propia, 2022.

6.2. Recomendaciones

- ✚ Para aumentar el valor de las características de % de remoción, área superficial y densidad aparente se recomienda trabajar con intervalos de temperaturas más altas a las del presente proyecto.
- ✚ Debido a que no existen los equipos necesarios en el departamento, se recomienda realizar un análisis superficial del carbón por microscopía electrónica para determinar el tipo de poro predominante en el carbón activado obtenido a partir de cáscara de plátano.
- ✚ Realizar ensayos con otros tipos de agentes activantes y con vapores de gases, a fin de comparar los resultados con los obtenidos en este proyecto.
- ✚ Realizar un análisis detallado acerca del proceso de secado de la cáscara de plátano, ya que esto es muy importante a la hora de determinar el rendimiento del proceso.
- ✚ Realizar un análisis y evaluación con respecto a la comercialización del adsorbente de la cáscara de plátano, ya que en Bolivia no se cuenta con empresas fabricantes de carbón activado, y este tipo de producto pudiera generar mayor rentabilidad en el país, por lo que se recomienda su implementación.