

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MATERIA PRIMA

1.1.1. Definición de las borras de café

Durante el proceso de elaboración de café, el grano del mismo es sometido a diversas operaciones desde su recolección hasta el producto final. Este procedimiento denominado “Beneficio del café” produce algunos desechos, que corresponden el 92,5% del peso del grano, empleándose el 7,5% restante como bebida. Generalmente, el grano de café representa la parte productiva para el procesamiento del extracto de café, este constituye el 20% del volumen total del fruto, siendo el 80% desechos (Segovia & Garces, 2017).

Las propiedades adsorbentes que posee el residuo de la borra de café o cuncho, subproducto del proceso de producción de café soluble, se deben al proceso al cual ha sido sometido el grano de café: tostión, molienda y extracción de solubles, este proceso es tratado con agua a temperaturas entre 175 y 180 °C y presiones entre 14 a los 16 bares para extraer el material soluble conformado por sustancias que transforman la estructura del grano de café ocasionando la formación de grupos funcionales en la superficie y agrietando la estructura (Barrera, 2019).

Por las características fisicoquímicas presentes en la borra de café (porosidad y grupos funcionales superficiales con capacidad de intercambio iónico) y su origen como subproducto de proceso, que lo hacen un material de bajo costo, han hecho de este, un material bastante atractivo para la adsorción de moléculas contaminantes presentes en cuerpos de agua, entre otros (Barrera, 2019).

Las primeras investigaciones para darle un uso a la borra de café como adsorbente tenían la tendencia a carbonizar este residuo y estudiar las propiedades fisicoquímicas de un carbón activado de borra de café.

A continuación, en la siguiente tabla se muestra los residuos obtenidos en el proceso industrial del café, base 1000 gr.

Tabla I-1. Residuos obtenidos en el proceso industrial del café, base 1000 gr.

Proceso	Residuo obtenido	Perdida en gr
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	140
Secado	Agua	161
Trilla	Pergamino película plateada	42
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación de bebida	Borra	104
Pérdida total	Residuos	905

Fuente: (Agudelo, 2012)

Se conoce como borra, cascarilla, cuncho, poso o ripio del café al residuo que queda, después de la torrefacción del grano de café y también de la preparación de la bebida proveniente del uso cotidiano de las cafeteras independiente de su tipo.

Ilustración I-1. Borrás de café

Fuente: (Diaz, 2016)

1.1.2. Composición fisicoquímica de las borras de café

La estructura química de los granos de café tostado y la borra de café, esta principalmente compuesta de: celulosa, hemicelulosa, proteínas y grasas. Así mismo, estudios en la superficie de la borra por medio de titulación Boehm confirman la presencia grupos carboxílicos, grupos fenólicos y grupos lactónicos (Barrera, 2019).

Tabla I-2. Composición y propiedades fisicoquímicas de las borras del café

Propiedad	Unidad	Propiedad	Unidad
Densidad aparente	0,28 g/cc	Grasas	18-26%
Humedad	60,01%	Proteínas	10-15%
Cenizas	0,6-0,8%	Fibra	40,47%
Carbohidratos	64-65%	pH	4,10

Fuente: (Segovia & Garces, 2017)

1.1.3. Usos de la borra de café

- ✓ Abono para la tierra: Se lo puede utilizar como abono orgánico, puesto que tiene una relación C/N de 20:1, lo cual es típico de un compost referencial.
- ✓ Producción de papel: Se lo puede usar como materia prima para la fabricación de papel por su alto contenido de celulosa.
- ✓ Combustible directo: Se puede utilizar la borra en forma de pellets con bajo contenido de humedad, como combustible para las calderas generadoras de vapor por su PCS (19 MJ/kg - 29 MJ/kg).
- ✓ Producción de Biogás: En la producción de Biogás a partir de la biodegradación de los residuos del café por medio de microorganismos acidófilos, se puede obtener un contenido de metano entre el 52% y 62%, lo que es equivalente a un potencial calorífico de 5.90 MJ/kg de borra seca.

- ✓ Producción de Bioetanol: Mediante la fermentación de la borra de café, se puede obtener un bioetanol con un poder calorífico de 4,38 MJ/kg de borra seca.

1.1.4. Producción de café en Bolivia

La calidad y la especie vegetal permiten diferenciar las variedades de café entre los cuales predominan: **Arábica (Coffea arábica)** considerado como de mejor calidad y menor contenido en cafeína; Robusta (Coffea canéphora) señalada como de menor calidad, pero con más contenido en cafeína y acidez. El 99% del café de origen boliviano es de la variedad arábica. Bolivia está clasificada como país productor del tipo de café “Otros suaves” (DGACI & VCEI, 2019).

El 95% de la producción de café en Bolivia se concentra en las provincias de Caranavi, Nor y Sud Yungas del departamento de La Paz, la especie que se produce es la Arábica, seguido por Santa Cruz con un 3% y Cochabamba con un 1% (DGACI & VCEI, 2019).

A continuación, se detalla la producción del café en Bolivia el cual se distribuye en los siguientes departamentos:

Tabla I-3. Producción del café en Bolivia

La Paz 95%	Prov. Caranavi:	Caranavi
	Prov. Nor yungas:	Coroico, Coripata
	Prov. Sud Yungas:	Asunta, Chulumani, Irupana
	Prov. Franz Tamayo:	Apolo
	Prov. Inquisivi:	Circuata, Licoma, Cajuata
	Prov. Larecaja:	Larecaja
Santa Cruz 3%	Prov. Ichilo:	Buena Vista

	Prov. San Ignacio de Velasco:	San Ignacio de Velasco
	Prov. Sara	
Cochabamba 1%	Provincia Chapare:	Chapare
Tarija 0,5%	Provincia Arce:	Bermejo
Beni 0,5%	Provincia Vaca Diez:	Vaca Diez

Fuente: (ACEB, 2006)

La superficie de café cultivada en estos departamentos asciende a 23.000 hectáreas, donde trabajan alrededor de 20.00 familias de manera directa y alrededor de 12.000 familias de manera indirecta, con una producción aproximada de 100.000 sacos de 60 kg. de los cuales casi un 30% se destina al mercado nacional y un 70% a mercados extranjeros (ACEB, 2006).

En la producción de café soluble se generan toneladas de residuos sólidos, por cada tonelada de café procesado se generan 650 Kg de borra, o por cada Kg de café soluble producido se generan 2 Kg de borra húmeda, que a su vez representa un problema para su disposición debido a la cantidad de material sólido a tratar y las aplicaciones convencionales actuales representan una fuente de contaminación (Barrera, 2019).

En Tarija se podría obtener un aproximado de 300 kg de borras de café mensual de las grandes y pequeñas cafeterías ubicados en distintos puntos de la ciudad de Tarija.

1.2. CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material que se obtiene mediante el proceso de calcinación y activación de diferentes materias primas carbonáceas, exhibe un alto grado de porosidad y una alta superficie interna, que lo convierte en un adsorbente muy versátil por el tamaño y la distribución de sus poros. A esta propiedad se le llama adsorción; al sólido se le denomina “adsorbente” y a la molécula atrapada, “adsorbato”. La unión

entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de London, que son una de las clases de fuerzas de Van der Waals. Estas son relativamente débiles y, por lo tanto, reversibles.

El carbón activado, es un compuesto covalente y, por lo tanto, muestra preferencia por moléculas covalentes; es decir, por moléculas que tienden a ser no iónicas y poco polares. Por lo tanto, el carbón activado se considera un adsorbente casi universal de moléculas orgánicas (Arias & Ramirez, 2008).

Martínez de Yuzo Ariza (2012) define al carbón activado como un producto extremadamente poroso que puede desarrollar áreas superficiales altas desde 500 a 1500 metros cuadrados por cada gramo de carbón, cabe recalcar que el área superficial depende mucho del tipo de activación y de la materia prima utilizada, el momento que se da la activación ya sea química o física se genera o se brinda porosidad al material el que le concede la propiedad de adsorción ya sea de gases, líquidos, vapores y sólidos coloidales, lo que lo hace de suma importancia en la industria de transformación química y petroquímica.

El carbono puede estar presente en un 85 a 95% en los carbones activados, además de contener hidrógeno, nitrógeno, sulfuro y oxígeno. El origen del carbón activado puede ser vegetal o mineral, y sus diversas aplicaciones dependen del origen y las distintas formas de obtener el carbón activado (Doing, 2011).

Durante el siglo XIX, muchos estudios fueron hechos para desarrollar carbones decolorantes de otras materias primas: Se descubrió el poder de decoloración de los huesos carbonizados, y se utilizó en la industria del azúcar en Inglaterra. Estos huesos estaban disponibles como un material granulado que permitía el uso de la tecnología de percolación. La composición del hueso calcinado es básicamente fosfato de calcio y un pequeño porcentaje de carbono, por lo tanto, este material sólo se utilizó para la purificación de azúcar (Historia del Carbón Activado, s.f.).

Bussy, en 1822, calentó sangre con potasa y produjo un carbón con un poder decolorante 20 a 50 veces mayor que el obtenido con carbón de hueso. Lee en 1853,

obtuvo carbón decolorante por la acción del vapor del agua y el aire sobrecalentado. Hunter en 1865, reportó el poder adsorbente del carbón granular de la cáscara de coco con gas (Gonzales & RenzoTeruya, 2004).

Desde los años 30 se usó para eliminar el sabor y olor del agua, y desde entonces hasta nuestros días el carbón activo se ha utilizado de manera extensiva en muchas industrias, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes o disolventes de las aguas o purificar el aire, así como en las plantas potabilizadoras, donde se usan los lechos de carbón activo para la depuración del agua de suministro urbano (Garcia Lopez & Oporta, 2017).

Ilustración 1-2. Carbón activado a partir de borra de café



Fuente: (Mallama, Acosta, & Urrego, 2019)

1.2.1. Características fisicoquímicas del carbón activado

1.2.1.1. Composición química

La composición química del carbón activado aproximadamente es de:

Tabla I-4. Composición del carbón activado

Componente	Cantidad
Carbono	75-80%
Cenizas	5-10%
Oxígeno	60%
Hidrógeno	0.5%

Fuente: (Veletanga, 2018)

1.2.1.2. Composición física

Tabla I-5. Propiedades físicas del carbón activado

Estado físico a 20°C	Sólido
Color	Negro
Olor	Inodoro
Densidad aparente	150 y 440 kg/m ³
Solubilidad en agua	Insoluble

Fuente: (Segovia & Garces, 2017)

Estos valores pueden variar, de acuerdo con las características de la variedad de café, tipo de activador, temperatura de calcinación, etc.

1.2.2. Estructura porosa del carbón activado

El carbón activado posee una estructura microcristalina que es similar a la del grafito. Esta estructura que presenta el carbono activado da razón a una distribución de poros de tamaños bien determinados (Ramos & Rojas, 2018).

Según Martínez (1990), los carbones activos (o activados) pueden considerarse como el contrapunto de las dos estructuras perfectamente ordenadas de las dos formas alotrópicas del carbono (diamante y grafito). Tanto es así, que durante mucho tiempo han sido considerados como carbones amorfos, a diferencia del carbono cristalino, que incluía al diamante y al grafito. Hoy día se sabe que esto no es totalmente cierto porque el carbón activo (como otros carbones considerados amorfos) posee una estructura microcristalina que, dependiendo de las condiciones de preparación, se parece en mayor o menor grado a la del grafito y que recibe el nombre general de estructura “turbostrática”. En general, un carbón activo está constituido por microcristales elementales en los que los planos hexagonales no están bien orientados, sino desplazados unos respecto a otros y solapando entre sí, por lo que presentan un elevado porcentaje de la estructura altamente desordenada. De hecho, se produce el plegamiento de láminas hexagonales dejando huecos de muy diferente tamaño (generalmente menores de 2nm).

Ilustración I-3. Representación esquemática de la estructura de un carbón activado



Fuente: (Martínez, 1990)

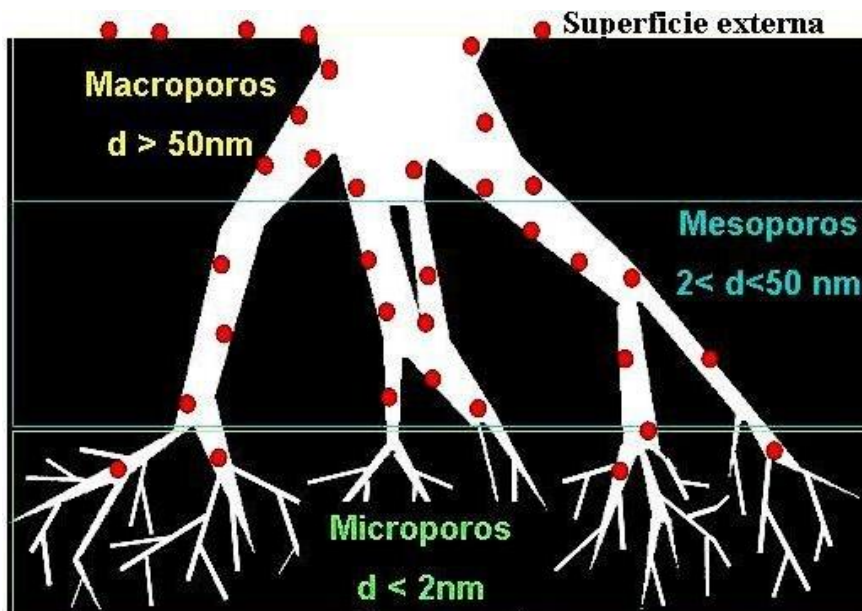
Así, se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: De acuerdo a la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) la estructura porosa puede clasificarse en:

- Mesoporos: presenta una amplitud de 2-50nm

- Microporos: presenta una amplitud menor a 2nm
- Macroporos: presentan una amplitud mayor a 50nm

Los microporos debido a su pequeño tamaño tienen la ventaja de adsorber sustancias pequeñas como los compuestos más volátiles que se encuentran en el agua, olores, sabores y muchos solventes. Sin embargo, los mesoporos son ideales para retener particular intermedias, la distribución del tamaño del poro depende de tres factores importantes: Tipo de activación, Origen de la materia prima y Duración del proceso de activación. Los Macroporos retienen partículas grandes tales como sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan durante la descomposición de la materia orgánica (Veletanga, 2018).

Ilustración I-4. Adsorción de componentes sobre superficie del carbón activado.



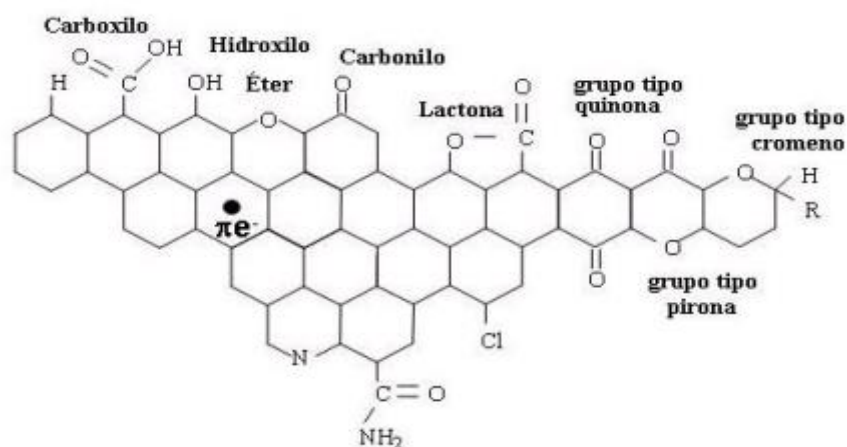
Fuente: (Veletanga, 2018)

1.2.3. Importancia de la química superficial de los carbones

Camposano (2015) dice que la superficie de los carbones, en particular los átomos de carbono de los bordes de los planos basales, pueden encontrarse combinados en mayor o menor proporción con otros átomos distintos al carbono, formando heteroátomos dando lugar a diferentes grupos superficiales.

Por otro lado, los átomos de carbono de los planos basales, poseen orbitales p que contienen electrones más o menos deslocalizados dentro de estos planos basales. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o menor grado de deslocalización de los electrones p afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos. (Camposano, 2015).

Ilustración I-5. Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse en un carbón.



Fuente: (Camposano, 2015)

Además de esto, los electrones deslocalizados de los orbitales π juegan un papel muy importante en la química superficial de los carbones. Por ejemplo, todos los carbones presentan en principio un carácter hidrófobo, no obstante, podemos disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares. Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante. Los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno (Camposano, 2015).

1.2.4. Tipos de carbón activado según su forma física

La forma física que presenta el carbón activado depende mucho de la aplicación y área en la que se utilice teniendo así tres formas: granular, polvo y pellets cilíndricos.

También se pueden encontrar otras formas como hilos, fibras y telas de carbón activo, como se muestra en la ilustración I-6.

Ilustración I-6. Carbón activado según su forma física.



Fuente: (U.Sevilla)

1.2.4.1. Carbón Activado en polvo (CAP)

El carbón activado en polvo presenta tamaños menores de 100 micrómetros, aproximadamente entre 15 y 20 micrómetros. Debido a su tamaño, no puede emplearse en el tratamiento de gases. Se adiciona al líquido en un tanque agitado: después de un tiempo que suele ser de entre 10 y 30 minutos, se deja sedimentar o se separa por medio de un filtro. Como ventaja frente al carbón activo granular es la velocidad a la que trabaja. Entre las propiedades físicas más importantes del CAP son la filtrabilidad y la densidad global o aparente. Si el carbón atraviesa un filtro, contamina el agua tratada.

Ilustración I-7. Representación gráfica del carbón activado en polvo



Fuente: (Alibaba.com, 2021)

1.2.4.2. Carbón activado granular

El carbón activado en forma granular se puede utilizar para purificación de líquidos y de gases, presenta un tamaño mayor a 0.25mm, se emplea en eliminación de cloro del agua y para potabilización del agua (eliminación de colores y olores desagradables), en columnas de lechos fijos o móviles para tratar los fluidos. Este tipo de carbón presenta área superficial elevada y a la vez amplitud de poro menor (Veletanga, 2018).

Ilustración I-8. Representación gráfica carbón activado granular



Fuente: (Alibaba.com, 2021)

1.2.4.3. Carbón activado en pellets

El carbón activado en pellets adquiere una forma cilíndrica que presenta distintas longitudes, se utiliza principalmente para purificación de gases, el diámetro varía entre 0.8 a 3 mm (Veletanga, 2018). Su principal ventaja es que causan una menor caída de presión que los granulares, lo que los hace muy útiles en la purificación de gases, la principal desventaja es su mayor coste de fabricación.

Ilustración I-9. Representación gráfica carbón activado en pellets



Fuente: (Alibaba.com, 2021)

1.2.4.4. Cintas y telas de carbón activado

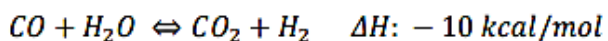
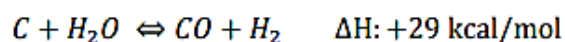
En algunos requerimientos de industrias para aplicaciones específicas como la separación de gases, adsorción, catálisis se fabrica carbón activado en forma de telas o cintas usando como precursores el Rayon, Keylar, Aramid, etc. Las telas de carbón activado tienen una superficie mayor que el carbón activado granular, también se tienen mejores resultados el usar varias láminas de telas de carbón activado que empacar el carbón activado en polvo (Mendieta, 2016).

1.2.5. Métodos de activación del carbón activado

1.2.5.1. Activación Física

El proceso físico también se conoce como activación térmica, consiste en carbonizar a la materia prima para convertirla en carbón, seguido de una combustión controlada, a temperaturas entre 1100-1300 °K, 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. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas donde se eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad (Alverca, 2014).

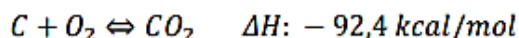
- Activación con H₂O:



- Activación con CO₂:



- Activación con O₂:



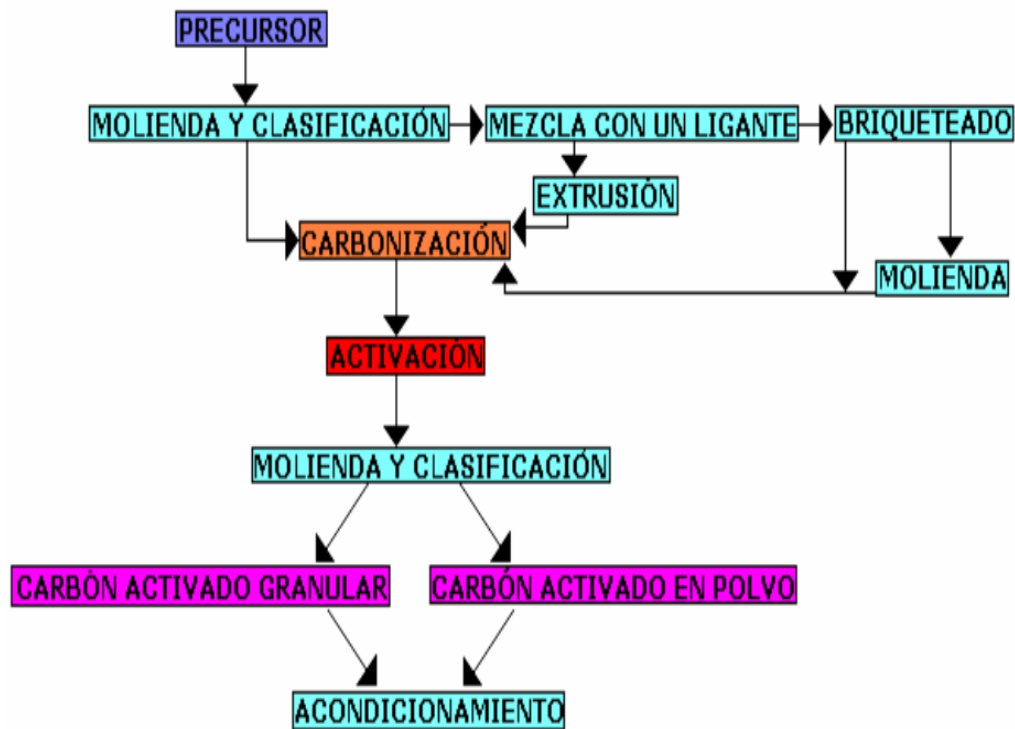
Fuente: (Gonzales & Alvarado, 2017)

El oxígeno presente en estos agentes se combustiona con el carbón liberando CO y H₂ y creando microcanales en la estructura carbonácea. Los carbones sometidos a este tipo de proceso generalmente desarrollan una extensa área superficial debido a la formación de poros.

Este tipo de activación consta de varias etapas. Así, a veces son necesarios ciertos pretratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras ocasiones el material de

partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800 °C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación (EcuRed).

Diagrama I-1. Diagrama del proceso en la activación Física o térmica



Fuente: (U.Sevilla)

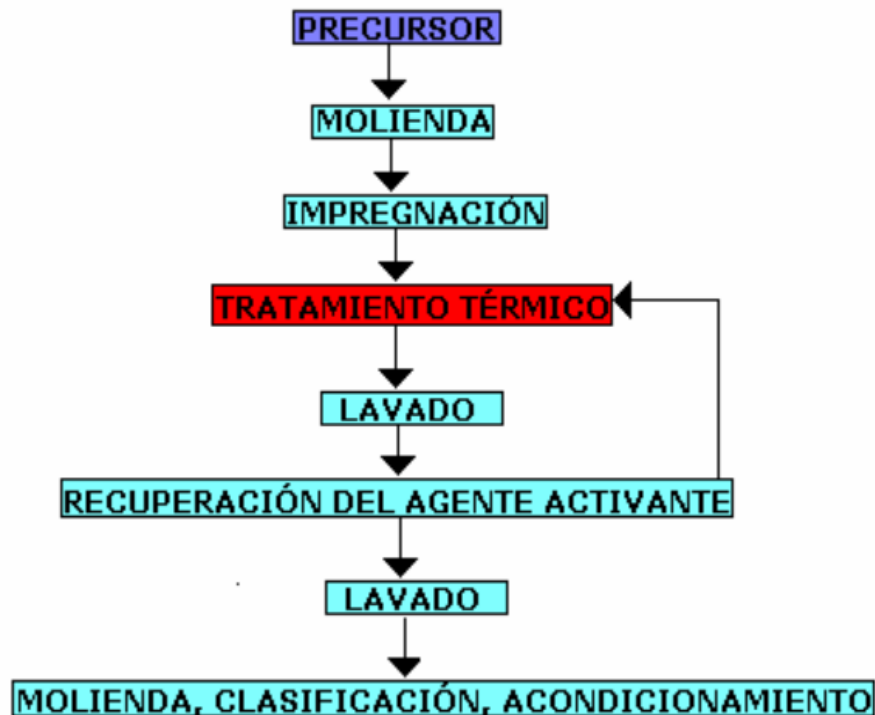
1.2.5.2. Activación Química

El proceso de activación química es aplicado directamente a la materia prima, a diferencia de la activación física donde tiene que haber una carbonización previa a la activación. La carbonización/activación se realiza en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 500 a 900°C; a temperaturas altas, la activación es mayor. No

obstante, en este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante luego el carbón activado se filtra y se seca. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes por impregnación, sin embargo, los más usados industrialmente son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el hidróxido de potasio (KOH) (EcuRed).

Los activadores químicos que se emplean son capaces de reducir la formación de materiales volátiles y alquitranes, elevando el rendimiento en carbono y dependiendo del activador químico utilizado, el carbón activado tendrá mayor o menor cantidad y volumen de poros. El carbón activado obtenido se lava para eliminar el remanente del activador químico empleado. Además, estos carbones se pueden activar físicamente por gasificación parcial con dióxido de carbono o vapor de agua y así producir carbones activados con mayores áreas superficiales.

Diagrama I-2. Diagrama de la activación química



Fuente: (U.Sevilla)

1.2.5.2.1. Reactivos activantes

- **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 (Martinez, 2010).
- **La activación química con H_3PO_4 :** Al igual que el cloruro de zinc, el ácido fosfórico actúa sobre la materia prima, donde los reactivos se mezclan con la materia prima, teniendo en cuenta un tiempo y temperatura de reacción apropiados. Al inicio del tratamiento se produce la carbonización y consecutivamente la activación, produciéndose gases oxidantes y la degradación de las moléculas orgánicas, por deshidratación, restringiéndose así la formación de brea. Esta reacción favorece la activación, pues habrá menor cantidad de material volátil incorporado en la estructura del carbón. La activación con H_3PO_4 implica las siguientes etapas: molienda y clasificación del material de partida, mezcla del precursor con H_3PO_4 (reciclado y fresco), tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200 °C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h, seguido de un nuevo tratamiento térmico hasta 400 – 500 °C, manteniendo esta temperatura en torno a 1h, lavado, secado y clasificación del carbón activado, y reciclado del H_3PO_4 (Martinez, 2010) .

La proporción H_3PO_4 : precursor más empleado suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50% (Martinez, 2010).

- **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. En esta activación el KOH se mezcla

con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones KOH: precursor entre 2:1 y 4:1. (Martinez, 2010).

1.2.6. Ventajas y desventajas de los métodos de activación

A continuación, se mencionan una lista de ventajas y desventajas según el método de activación a emplear.

Tabla I-6. Ventajas de los métodos de activación

VENTAJAS	
ACTIVACIÓN QUÍMICA	ACTIVACIÓN FÍSICA
<ul style="list-style-type: none"> ✓ La temperatura de tratamiento es relativamente baja, menor a 700°C. ✓ El carbón activado se obtiene en una sola etapa de conversión. ✓ Gran parte del agente activante se pueden recuperar. ✓ Los costos de maquinaria de activación son relativamente menores. ✓ Tiene bajo costo energético. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiene bajos costos de operación de planta. ✓ No utiliza reactivos químicos, por consiguiente, tiene un impacto ambiental menor que el químico.

Fuente: (Gonzales & RenzoTeruya, 2004)

Tabla I-7. Desventajas de los métodos de activación

DESVENTAJAS	
ACTIVACIÓN QUÍMICA	ACTIVACIÓN FÍSICA
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiene mayor costo de operación durante la activación. ✓ Utiliza reactivos químicos que pueden ser contaminantes o corrosivos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La temperatura media de activación es elevada, mayor a 900°C. ✓ Requiere de doble etapa para convertir materia prima (madera) en carbón activado. ✓ Tiene costo energético elevado ✓ Tiene costo elevado en capital de trabajo (equipo de activación).

Fuente: (Gonzales & RenzoTeruya, 2004)

1.2.7. Caracterización del carbón activado

La elaboración de carbón activado conlleva a la evaluación de sus características a través del control de calidad, el cual se basa en métodos estandarizados.

Índice de yodo

Constituye un parámetro fundamental que es empleado para identificar el desempeño del carbón activado. Permite cuantificar la porosidad por la adsorción del yodo en disolución, por lo tanto, mientras más alto es el número de yodo, más alto es el grado de activación del carbón.

Densidad aparente

Es el peso en gramos en base seca por un cm^3 de carbón activado. Entre menor sea la densidad indica generalmente que existe mayor porosidad y mejor calidad del carbón activado.

Tamaño de partícula

Un tamaño de partícula muy pequeño facilita la rapidez de la tasa de adsorción, disminuyendo el tiempo de contacto necesario. Esto es debido a que la presión tiende a descender rápidamente, incrementando la adsorción.

Contenido de cenizas

Pertenece al porcentaje de residuo sólido incombustible que queda luego de calcinar una muestra de carbón activado a determinada temperatura.

Tamaño del poro

La distribución correcta del tamaño de poro, es fundamental para permitir la adsorción facilitando el transporte del adsorbente a los sitios y canales apropiados.

pH

Indica el grado de acidez o basicidad de una solución. Mientras más bajo es el pH, menor es la capacidad de adsorción del material.

Contenido de humedad

Es el porcentaje de agua o humedad contenida en el carbón activado que se determina mediante técnicas gravimétricas.

Capacidad de adsorción

Es de gran importancia conocer cuántos miligramos se retienen por gramo de carbón utilizado hasta su saturación, así como la determinación del área superficial para tener más información sobre su porosidad y su aplicación, es por ello que se realizarán dos métodos que caracterizan la adsorción de cada carbón activado.

Adsorción de Azul de metileno

Se considera un parámetro rápido para determinar la capacidad de remoción de los carbones para tamaños moderados de las moléculas a ser adsorbidas (tamaño de la molécula $\geq 1,5$ nm).

1.2.8. Factores que influyen en el proceso de carbón activado

Efecto de H₃PO₄ como agente de activación

Ácido fosfórico, ha sido utilizado como agente de activación de materiales lignocelulósicos con altos contenidos de material volátil y contenidos de carbono menores al 90%. Investigaciones enfatizan que la estructura porosa y el área superficial de los carbones activados obtenidos mediante el ácido fosfórico están altamente influenciados por los efectos del ácido fosfórico en los materiales lignocelulósicos, así como por su concentración en la que se emplee (Flores, 2018).

Efecto de la temperatura de activación

En cuanto al efecto de la temperatura de activación, estudios indican que un incremento de la temperatura en el proceso de activación del precursor afecta el rendimiento del carbón de una manera negativa, ya que se promueven reacciones secundarias como el craqueo térmico de hidrocarburos de peso molecular elevado en el precursor, dando lugar al aumento de productos líquidos y gaseosos, y a la consecutiva disminución del

rendimiento del carbón. Es aquí donde se destaca el papel del ácido fosfórico como inhibidor de la formación de tales constituyentes volátiles (Flores, 2018).

Estudios de investigación indican que durante los procesos de activación con H_3PO_4 a bajas temperaturas (100-200°C) se ha observado una pérdida de peso acelerada y una contracción volumétrica del precursor, lo cual se ha atribuido principalmente a la eliminación de productos volátiles de bajo peso molecular que se forman durante las reacciones de despolimerización y deshidratación. En los procesos de activación con temperaturas más altas, la velocidad de pérdida de peso disminuye considerablemente, ya que el H_3PO_4 inhibe la formación de productos de celulosa volátiles. También se ha observado que a temperaturas de activación alrededor de los 400°C el precursor empieza a dilatarse (Flores, 2018).

De acuerdo con las reacciones que se llevan a cabo entre el ácido fosfórico y los materiales lignocelulósicos, estudios indican que el proceso de activación con este reactivo requiere un tratamiento térmico de aproximadamente 200°C para deshidratar el precursor y luego un tratamiento adicional por encima de 300°C para promover la expansión del precursor y la consolidación de la estructura porosa. Por tanto, se ha establecido que las temperaturas de activación habituales empleadas con este reactivo están entre 300 y 550°C (Flores, 2018) .

Efecto del tiempo de activación

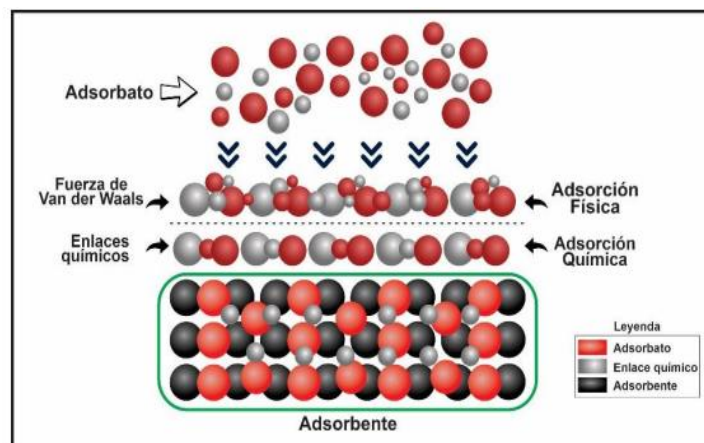
Bajas temperaturas con tiempos de activación prolongados son necesarias durante el proceso de activación para mejorar la producción de Carbón activado. Así al incrementar los tiempos de activación se favorece la repolimerización de los constituyentes de la biomasa al proporcionarles tiempo suficiente para reaccionar. Por otro lado, si los tiempos de activación son muy cortos la repolimerización de los constituyentes de la biomasa no será completada y por lo tanto los rendimientos de carbón serán disminuidos. Es importante mencionar que el efecto del tiempo de activación a menudo está dominado por la temperatura y la velocidad de calentamiento (Flores, 2018).

1.3. 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. Si la interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente se debe sólo a las fuerzas de van der Waals, se trata de una adsorción física o fisisorción, donde las moléculas adsorbidas son ligadas débilmente y los calores de adsorción son bajos, semejantes a la condensación de las moléculas de un vapor sobre un líquido de la misma composición. Además, el aumento de temperatura disminuye considerablemente la adsorción. Por otro lado, si las moléculas químicas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, el fenómeno se denomina adsorción química o quimisorción. Como en este caso se forman y rompen enlaces, el calor de adsorción tiene magnitudes similares a los de una reacción química (Navarrete, 2017).

La fisisorción es la más común para el caso del carbón activado y al ser un tipo de adsorción donde no hay intercambio de electrones entre adsorbato y adsorbente, el proceso es reversible. Mientras que la quimisorción es menos frecuente y al haber un enlazamiento químico, la estructura química del carbón es modificada irreversiblemente (Navarrete, 2017).

Ilustración I-10. Proceso de adsorción



Fuente: (Navarrete, 2017)

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.

Tabla I-8. Grado de adsorción según el tipo de activador

Grano fino activado con $ZnCl_2$	16%
Grano grueso activado con $ZnCl_2$	13%
Grano fino activado con H_3PO_4	30%
Grano grueso activado con H_3PO_4	27%

Fuente: (U.Sevilla)

1.3.1. Propiedades y condiciones que afectan la adsorción en carbón activado

La adsorción en carbón activado se ve afectada por diversas propiedades tanto del carbón como del adsorbato, así como por las condiciones del gas o del líquido en el que se lleva a cabo este fenómeno. Las propiedades que afectan la adsorción son las siguientes:

a) Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado

- La adsorción aumenta cuando el diámetro de los poros predominantes está entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato.
- Diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en fase líquida.

b) Propiedades relacionadas con el adsorbato

- La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebase el del poro.

- Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares.
- Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo se adsorben con mayor fuerza.
- La adsorción en fase líquida aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato.

c) Propiedades relacionadas con el líquido que rodea al carbón activado

- Generalmente aumenta la adsorción al disminuir el pH.
- La teoría dice que la adsorción no se ve afectada por la temperatura; sin embargo, a mayor temperatura, aumenta la solubilidad del adsorbato y se adsorbe en menor proporción. Por otro lado, a mayor temperatura, también disminuye la viscosidad del solvente, facilitando la movilidad del adsorbato y por lo tanto acelerando su velocidad de difusión hacia los poros. En términos prácticos, generalmente aumenta la adsorción al aumentar la temperatura (Arias & Ramirez, 2008).

1.3.2. Análisis de adsorción del carbón activado

El análisis de adsorción mide la adsorción de sustancias específicas por gramo de carbón activado, estas pruebas generalmente se conocen como el número o índice de sustancias relacionadas. El procedimiento general de estas pruebas implica agregar una cantidad de carbón a una solución de sustancia de concentración conocida, agitar vigorosamente durante un período de tiempo, luego filtrar del carbón activado y medir la concentración final por titulación. La diferencia entre la concentración inicial y la concentración final es la cantidad de carbón adsorbido.

Para este proyecto de investigación se optó por los análisis de índice o número de yodo y azul de metileno ya que son considerados los más importantes y más aplicables en la industria para determinar la calidad de los Carbones Activados.

1.3.2.1. Índice o número de yodo

El índice o número de yodo es un método analítico que se define como la cantidad en miligramos de Iodo adsorbido por un gramo de carbón activado, mientras más alto el

número de Iodo es mejor la calidad del Carbón activado, no existe una escala establecida y normada, de acuerdo a diferentes vendedores y marcas, carbones activados con un número de yodo superior a 700 son carbones de calidad superior, carbones activados con número de Iodo que esté entre 400 y 700 son carbones activados de buena calidad, Carbones Activados con número de Iodo entre 200 y 400 son de mala calidad (Mendieta, 2016).

Las normas que rigen este análisis son las normas AWWA B 600-78 de la American Water Works Association (Concilio Europeo de Manufactores Químicos, 1986) y la norma ASTM D4607-14 (Anexo B) el cual detalla el procedimiento estándar para la determinación de número de yodo del carbón activado.

1.3.2.2. Índice de azul de metileno

Es la cantidad de azul de metileno, en solución, que es adsorbida por 1 g de carbón activado. La variación del color de la solución, a causa de la adsorción, es evaluada mediante análisis de espectrofotometría (Gonzales & RenzoTeruya, 2004).

La disolución de azul de metileno, es mezclada con el carbón activado en polvo posteriormente llevar a un agitador a 200 rpm durante 10 minutos. Después que el equilibrio es alcanzado, la disolución se filtra y la concentración de azul de metileno se determina mediante espectrofotometría, midiendo la absorbancia a 668 nm (Garcia Lopez & Oporta, 2017).

La masa adsorbida en el carbón es calculada según:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (1 - 1)$$

Donde:

q_e = Masa adsorbida del azul de metileno en el carbón (mg/gr)

C_o = Concentraciones del colorante al inicio (mg/l)

C_e = Concentraciones del colorante en el equilibrio (mg/l)

V :=Volumen de la solución acuosa (l)

m=Masa de carbón activado (gr)

1.4. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO

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 norma Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon-ASTM D-4607 (Método de prueba estándar para la determinación del índice de yodo del carbón activado) 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 está la norma para carbón activado en polvo American Water Works Association- AWWA B 600-78 (Concilio Europeo de Manufactores Químicos, 1986), Norma Técnica Colombiana NTC-4467, la Deutsches Institut für Normung-DIN (Instituto Alemán de Normalización) de Alemania, entre otras (Sevillano & Torres, 2013).

Tabla I-9. Principales parámetros que especifica un carbón activado

Parámetro	Unidades	Rango de valores típicos	Normas
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a 1200	ASTM D-4607
Área superficial	m ² /g	500 a 1200	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 3174 – 04
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 & Torres, 2013)

1.5. APLICACIONES

El carbón activado tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en polvo como granular en medio líquido y gaseoso.

Sus aplicaciones en medio líquido abarcan la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, tratamientos de aguas residuales, decloración de aguas para su uso en la fabricación de bebidas refrescantes, decoloración y mejora de bebidas alcohólicas (vinos, rones), purificación de grasas y aceites comestibles, purificación de proteínas, como medicamento en la desintoxicación de personas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos (oro, plata), entre otras (U.Sevilla).

Por su parte, en medio gaseoso encuentra sus aplicaciones en el almacenamiento y separación de gases, en máscaras antigás, protección antirradiativa en plantas nucleares, desodorizante de productos alimenticios. Entre otras aplicaciones, de forma general, se pueden mencionar su utilización en filtros de cigarrillos y plantillas de calzados, entre otros. En general, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido mientras el granulado puede ser aplicado en ambos medios (U.Sevilla).

En general, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido mientras el granulado puede ser aplicado en ambos medios.

Recopilando las múltiples aplicaciones, destacamos:

- Eliminación de impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable (mejora de las propiedades organolépticas en el agua).
- Tratamiento de aguas residuales (Tratamiento terciario de aguas residuales.)
- Tratamiento de agua en procesos industriales.
- Depuración de aguas subterráneas y de aguas para piscina.
- Purificación de aire y gases.
- Decoloración de vinos, zumos, azúcar, caramelo y vinagres.
- Mascarillas de gases.
- Eliminación de olores en plantillas de zapatos.
- Potabilización de agua superficial y de pozo.
- Desodorización y eliminación de gusto para productos de la industria alimenticia.
- Decoloración en industria alimenticia, farmacéutica y química.
- Eliminación de compuestos no orgánicos con carbones impregnados o catalíticos, aprovechando la gran superficie del carbón activo.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para el presente trabajo de investigación se utilizó como materia prima las borras de café el cual es considerado como residuo que se obtiene luego de la extracción del café, mismo que se obtuvo de las diferentes cafeterías de la ciudad de Tarija, cuyo proveedor de los mismos es la empresa industrial “CAFÉ IDEAL” ubicada en el departamento de Santa Cruz. Esta industria produce un café 100% boliviano, de variedad arábica, el cual es cultivado entre 1,200 y 1,800 m.s.n.m en la región de Los Yungas, siendo reconocida esta zona como productora de un excelente café.

2.1.1. Caracterización de la materia prima

Para la caracterización fisicoquímica de la materia prima (borras de café) se tiene en cuenta los siguientes parámetros o métodos de ensayo:

- Humedad
- Cenizas
- Carbón Fijo
- Material Volátil

La caracterización fisicoquímica de la materia prima (Borras de café), se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química, con la finalidad de determinar sus parámetros más importantes.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Para seleccionar el método a efectuar en el estudio con el fin de lograr los objetivos de la investigación se toman en cuenta los métodos experimentales descritos en el capítulo anterior, los métodos son:

- Activación Química
- Activación Física

Para la selección del método de activación se optó por desarrollar tablas con las diferentes alternativas que son factores claves para la ejecución de la investigación, con su ponderación respectiva. Se efectúa la evaluación de cada método de activación en

función de una tabla de calificación en un rango de valores para dichos criterios, donde la calificación asignada se realiza en base a la Escala Likert.

En la tabla II-11 se presentan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método, siendo el proceso adecuado aquel que acumule el mayor puntaje.

Tabla II-10. Escala de calificación Likert

Escala de Puntuación	Puntuación
Excelente	5
Muy Bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Mala	1

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-11. Selección del método para la obtención experimental de carbón activado

Factor a Evaluar	Comentarios del Evaluador	Calificación	
		Activación Química	Activación Física
Calidad del producto que se desea obtener	La calidad del producto es variable en la obtención de carbón activado ya que el método de activación química genera un mayor grado de porosidad en comparación con los métodos físicos.	5	4

Aplicabilidad del Proceso	La activación química no requiere de altas temperaturas y requiere menor tiempo de activación en comparación con los métodos físicos.	5	4
Disponibilidad de equipos	La activación física requiere mayor tecnología para su aplicación mientras que en la activación química se utilizan materiales y equipos de fácil acceso en el laboratorio.	5	3
Costo	El método de activación física presenta un costo elevado de los equipos en comparación a la activación química.	4	3
Entorno e Impacto Ambiental	La activación física posee mayor ventaja frente a la activación química ya que es una alternativa de menor impacto ambiental por que emana una menor cantidad de gases tóxicos al aire.	3	4

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla II-12. Matriz de Decisión para el Método Experimental de Obtención de Carbón Activado

			Activación Química			Activación Física		
			C	D	E	F	G	H
N°	A	B	Calif.	C/5	D*A	Calif.	F/5	G*A
1	30	Calidad del producto que se desea obtener.	5	1	30	4	0.8	24
2	25	Aplicabilidad del proceso	5	1	25	4	0.8	20
3	20	Disponibilidad de equipos	5	1	20	3	0.6	12
4	15	Costo	4	0.8	15	3	0.6	9
5	10	Entorno e Impacto Ambiental	3	0.6	6	4	0.8	8
Total	100	Calificación sobre 100.	96			73		

Fuente: Elaboración propia, 2021.

De acuerdo a los resultados expuestos en la matriz de decisión que se realizó anteriormente para seleccionar el método de aplicación en la obtención de carbón activado se observa que la mejor opción como método a aplicar es la activación química ya que tiene mayor ponderación respecto a la activación física, obteniendo una puntuación del 96%.

Una de las ventajas del método de activación es su aplicabilidad ya que no requiere de altas temperaturas, genera un mayor grado de porosidad, proporciona altos rendimientos y requiere menor tiempo de activación en comparación con los métodos físicos.

Para este método se optó por usar el H_3PO_4 como agente activante debido a que se obtiene mayor eficiencia, permite reducir la formación de materia volátil, además de que su costo es mucho menor en comparación con los distintos ácidos a emplear en este método y su disponibilidad es mucho más accesible en el mercado, también representa un impacto ambiental relativamente bajo en comparación con las otras alternativas.

Además, resulta ser un método que puede llevarse a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, no requiere equipos sofisticados y es fácil de ejecutar.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

Para realizar la caracterización de las variables del proceso de elaboración de carbón activado a partir de las borras de café se considera lo siguiente:

2.3.1. Diseño experimental

El diseño experimental es una técnica estadística, en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo. El diseño factorial define una serie de pruebas en las que las variables de entrada del proceso o sistema tienen cambios premeditados, de manera que sea posible observar e identificar las razones de los cambios que se producen en la respuesta de salida, de tal modo que el investigador obtenga estimaciones con la mayor precisión posible.

2.3.1.1. Planteamiento del dominio experimental

Para poder optimizar el proceso de obtención de carbón activado a partir de las borras de café, es necesario conocer las variables que influyen significativamente en el sistema para ello se utilizará un enfoque estadístico que consiste en un diseño factorial. El diseño factorial planteado para la presente investigación es un diseño del tipo 2^k .

Se plantea realizar un estudio de las variables que influyen el proceso de obtención. El estudio se realizará mediante un diseño con un arreglo factorial de 2^3 , es decir consta de tres factores con dos niveles cada uno de ellos y se evalúa su influencia sobre la variable respuesta.

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.

Los factores serán:

Factor A: Temperatura de activación, (+, -).

Factor B: Concentración del activador (+, -)

Factor C: Tiempo de activación (+, -).

Tabla II-13. Factores y niveles.

Variables	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Temperatura de activación (°C)	450	550
Concentración %	30	40
Tiempo de activación (hr)	2	3

Fuente: elaboración propia,2021

2.3.1.2. Matriz de experimentos en la etapa de activación del diseño factorial completo 2^3

Para este trabajo de investigación se realiza una matriz de experimentos donde se trabaja con 8 combinaciones diferentes con las 3 variables a 2 niveles, esto permite evaluar las variables y sus interacciones al mismo tiempo.

$$2^3 = 8$$

Donde:

2 = niveles

3 = variables

8 = el conjunto de posibles combinaciones

Tabla II-14. Matriz de experimentos en el proceso de obtención.

prueba	Matriz de experimentos			Plan de experimentación		
	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Temperatura de activación (°C)	Concentración (%)	Tiempo de activación (h)
1	-	-	-	450	30	2
2	+	-	-	550	30	2
3	-	+	-	450	40	2
4	+	+	-	550	40	2
5	-	-	+	450	30	3
6	+	-	+	550	30	3
7	-	+	+	450	40	3
8	+	+	+	550	40	3

Fuente: elaboración propia, 2021

El número de combinaciones de tratamiento serán 8, se repite la experiencia para validar los resultados, por lo tanto, el número total de combinaciones de tratamiento serán 16.

De acuerdo a estos ensayos se obtendrán resultados preliminares. Donde se podrá establecer como variable respuesta el área superficial en función al índice de yodo y el % de remoción del azul de metileno.

2.3.1.3. Especificación de las variables del dominio experimental

Temperatura: la temperatura utilizada en la etapa de activación es de 450°C y 550°C, en base a diferentes fuentes de información bibliográfica relacionadas con la etapa de activación. Un incremento de la temperatura mayor a 600°C en el proceso de activación del precursor afecta el rendimiento del carbón de una manera negativa, ya que se

promueven reacciones secundarias como el craqueo térmico de hidrocarburos de peso molecular elevado en el precursor, por tanto, se ha establecido que las temperaturas de activación habituales empleadas con ácido fosfórico están entre 300 y 550°C.

Concentración del agente activante: el ácido fosfórico como agente activante es apto en materiales lignocelulósicos con altos contenidos de material volátil y contenidos de carbono menores al 90%. La concentración que se emplee influye en la estructura porosa y el área superficial del carbón activado es por eso que se optó trabajar con dos concentraciones de ácido fosfórico 0.1 N al 30% y 40%.

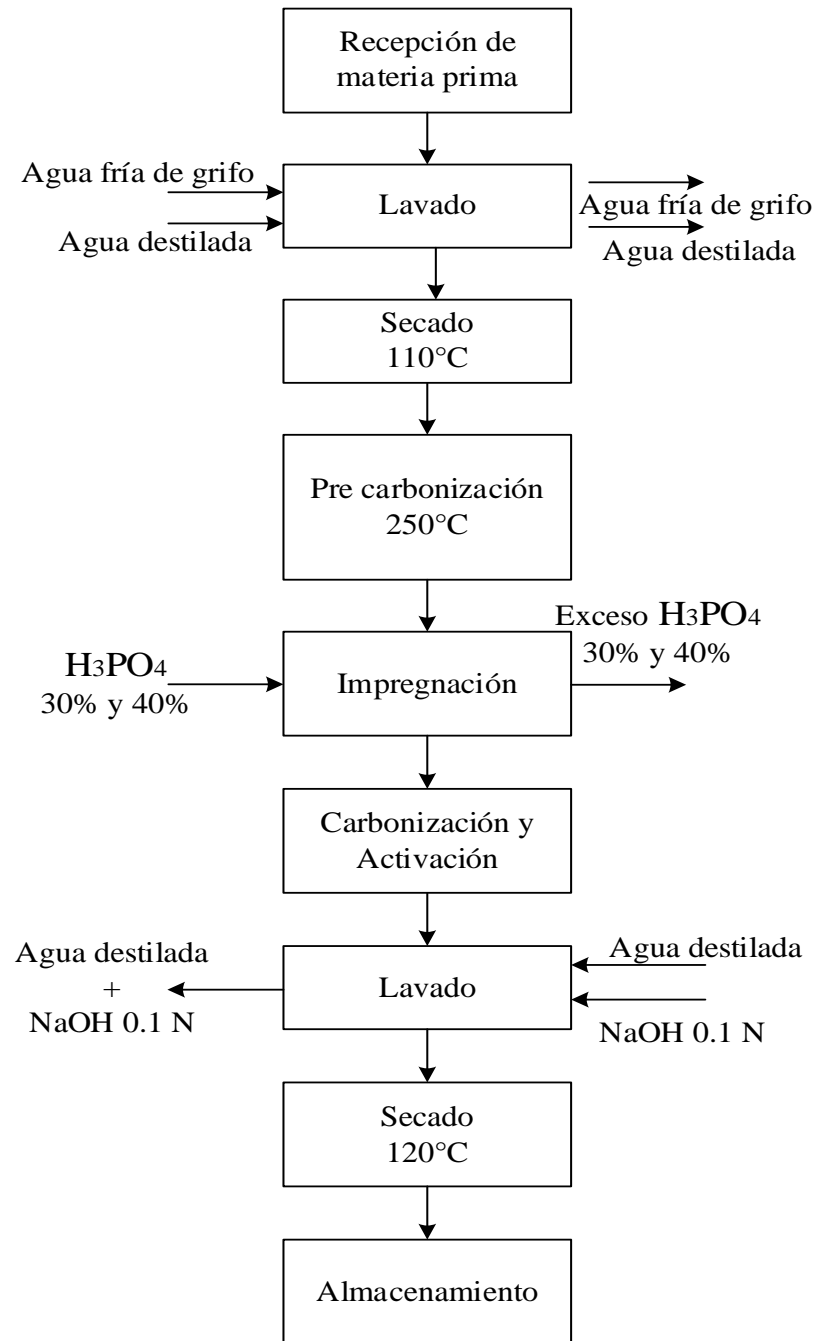
Tiempo: en cuanto al tiempo de carbonización de la muestra se optó por definir dos tiempos diferentes para la aplicación del diseño factorial, estos son a 2 y 3 horas en las temperaturas mencionadas anteriormente ya que el efecto del tiempo de activación a menudo está dominado por la temperatura y la velocidad de calentamiento. No es recomendable ampliar el tiempo de carbonización ya que la muestra de carbón podría convertirse en cenizas.

2.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBÓN ACTIVADO DE BORRAS DE CAFÉ

Para realizar el trabajo es importante establecer los pasos a seguir, uno de los cuales es elaborar el proceso productivo, que es un conjunto secuencial de operaciones unitarias aplicadas a la transformación de materias primas en productos.

El procedimiento que se describe a continuación es en base a la información recolectada de anteriores investigaciones sobre activación química.

Diagrama II- 3. Diagrama del proceso tecnológico empleado para la obtención de carbón activado a partir de la borra de café.



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.1. Pretratamiento de la materia prima

2.4.1.1. Recolección de la materia prima

Para la obtención del carbón activado se recolectó 1 kg de borras de café de las cafeterías:

- 650 gr de la “cafetería Alder”, mismo que tiene varios puestos de venta en la ciudad de Tarija.
- 350 gr de mi pequeña cafetería (puesto de venta en el mercado).

De toda la recolección de borras de café solo se utilizó 500 gr, el restante se reutilizó como abono.

Ilustración II-11. Recepción de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.2. Caracterización de la materia prima

2.4.2.1. Determinación del porcentaje de humedad de las borras de café

El porcentaje de análisis de humedad de la materia prima se realizó en el equipo infrarrojo de marca Sartorius del LOU. Este procedimiento se desarrolló bajo la norma (NB313010:05), detallando el siguiente procedimiento de humedad:

- Primeramente, se encendió el secador y se colocó el platillo receptor de muestras llevándolo a peso cero.
- Luego se pesó en el platillo receptor de aluminio 5 gramos de borras de café.

- Se ubicó el platillo dentro del secador para continuar con el análisis.
 - 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.
- Obteniendo los datos del secador se obtuvo el porcentaje de humedad de la materia prima, realizando el análisis por triplicado para validar el resultado.

Ilustración II-12. Secador de infrarrojo



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.2.2. Determinación de cenizas de las borras de café

El contenido de cenizas de la materia prima se realizó mediante una mufla, de acuerdo a la norma (NB39034:10), desarrollando el siguiente procedimiento:

- Se pesó el crisol a emplear y se llevó a la estufa por 1 hora y 30min a una temperatura de 80°C, esto con la finalidad de eliminar la humedad del crisol.

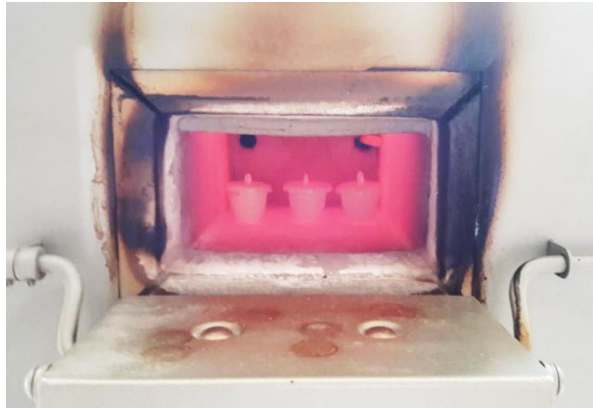
Ilustración II-13. Peso y secado del crisol



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Luego se llevó el crisol a un desecador por un lapso de 30 a 45 minutos para enfriar el mismo.
- Se pesó 2 gramos de muestra en el crisol, el cual fue introducido en la mufla a una temperatura de 700°C durante 2 horas.

Ilustración II-14. mufla a 700°C



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Una vez alcanzado el tiempo establecido se dejó enfriar la mufla hasta llegar a una temperatura de 100°C.
- Se procedió a sacar el crisol de la mufla con ayuda de las pinzas para luego introducirlo en el desecador durante 30min. Concluido ese tiempo pesar el crisol con la muestra.

Ilustración II-15. Muestras en desecador y cenizas obtenidas



Fuente: Elaboración propia, 2021

El porcentaje de ceniza se calculó de la siguiente manera:

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

Donde:

A= peso de la cápsula más ceniza obtenidas (gr)

B= peso de la cápsula vacía (gr)

C= peso inicial del material precursor usado para el análisis (gr)

2.4.2.3. Determinación de material volátil de las borras de café

El contenido de materia volátil se determina a través de la pérdida de masa, menos la que se debe a la humedad, al igual que en el análisis de determinación de cenizas, se debe controlar la oxidación, por lo que la muestra no debe estar en contacto con el aire mientras está en la mufla. Por lo tanto, el crisol debe ajustarse adecuadamente.

Para este procedimiento se utilizó el mismo equipo y el mismo material que el empleado en la determinación de cenizas. A continuación, se desarrolló el siguiente procedimiento:

- Se procedió a calentar el crisol durante 30 minutos en la mufla a 650°C, luego se apagó la misma hasta llegar a una temperatura de 150 °C.

Ilustración II-16. Crisoles en mufla



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Retirar el crisol de la mufla con ayuda de las pinzas para luego llevarlo al desecador hasta temperatura ambiente.
- Se pesa el crisol con su tapa en la balanza analítica y se anotó el peso registrado B.

- Posteriormente se pesó 2 gramos de muestra C y luego se llevó al desecador.
- Se introduce el crisol con la muestra en la mufla a 650°C durante 7 minutos, luego se debe apagar la mufla y esperar a que baje la temperatura a 150 °C.
- Sacar el crisol de la mufla con ayuda de las pinzas. Llevar el crisol al desecador por 2 minutos para que la misma se enfríe.
- Pesarse el crisol con la muestra y su tapa para obtener la cantidad de volátiles A.

$$\text{Material volátil (\%)} = \left[\frac{(A-B)}{C} \right] \times 100 \quad (\text{II-3})$$

Donde:

A= peso de la cápsula y residuo en (gr)

B= peso de la cápsula vacía (gr)

C= peso inicial de la muestra a analizar (gr)

2.4.2.4. Determinación de carbón fijo

El carbón fijo es la parte no volátil que se encuentra en el crisol cuando se han determinado las materias volátiles. La obtención de la cantidad de carbón fijo no es la resultante del peso del residuo, sino que se obtiene por diferencia del total con respecto a los porcentajes de humedad, ceniza y volátiles a través de la expresión descrita en la ecuación (II-4).

$$\%CF = 100 - (\%MV + \%CC) \quad (\text{II-4})$$

Donde:

$\%CF$ = Porcentaje de Carbono fijo

$\%MV$ = Porcentaje de Materia volátil

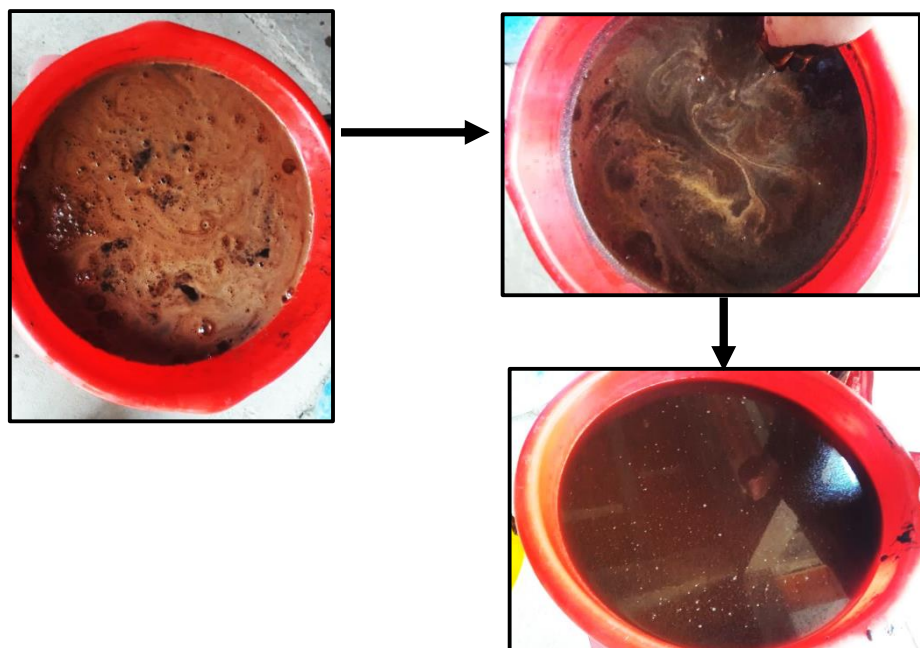
$\%CC$ = Porcentaje de Contenido de cenizas

2.4.3. Lavado

Para asegurar una buena limpieza, la muestra de borra de café recolectada se sometió a 5 lavados con agua de grifo para eliminar polvo, impurezas y sustancias solubles, posteriormente se lavó otras 5 veces más con 4 litros de agua destilada hervida, con el

fin de eliminar la mayor cantidad de tintura negra, teniendo así un 10% en pérdidas de materia prima.

Ilustración II-17. Lavado de materia prima (borra de café)



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.4. Secado

Posteriormente, se eliminó el alto contenido de humedad procediendo a realizar el proceso de secado de la muestra en la estufa de secado por convección natural a una temperatura de 110°C durante 8 horas.

Ilustración II-18. Proceso de secado de las borras de café.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Se pesó la muestra cada 30 minutos hasta mantener el peso constante. Finalizada esta etapa se procede a almacenar la muestra seca en frascos de vidrio con tapa hermética con seguro hermético.

2.4.5. Tamizado

El proceso de tamizado se llevó a cabo, con la finalidad de obtener borras de café con un tamaño de partículas definido, para esta etapa se utilizó un tamiz vibratorio de marca ORTO-ALRESA perteneciente al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Ilustración II-19. Proceso de tamizado de las borras de café



Fuente: Elaboración propia, 2021

El tamiz trabajo con cuatro series de tamices con mallas de diferentes aberturas ordenadas de forma descendente, siendo estas de 1; 0.5; 0.25; 0.063 mm y una bandeja de recepción de muestra, luego se procedió a colocar la muestra (borras de café) en el primer tamiz para después encender el equipo y así obtener la granulometría de la malla 0.25 mm. Las borras de café retenidas de las mallas 0.5 y 0.063 mm se utilizaron como abono para las plantas ya que estas se descartaron porque el tamaño de partícula de la borra no se ajusta bien para este procedimiento.

Ilustración II-20. Borrás de café retenidas en el proceso de tamizado



Fuente: Elaboración propia,2021

2.4.6. Pre carbonización

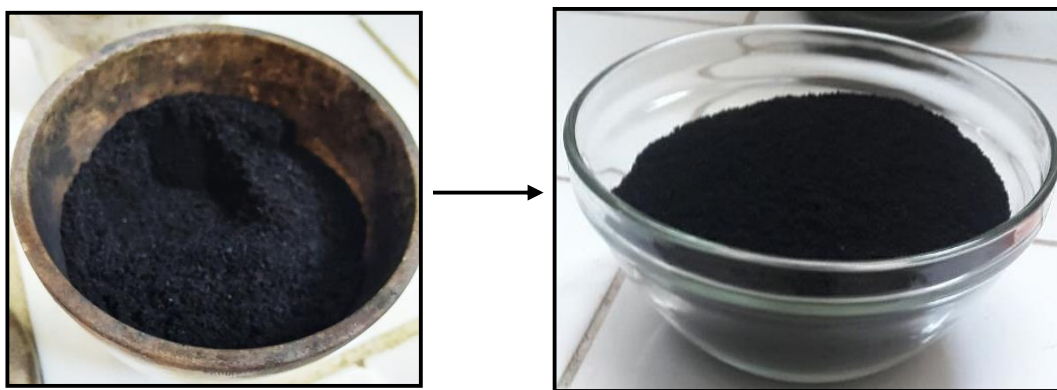
Posteriormente, la muestra no impregnada se pre carbonizó porque el aceite y los componentes volátiles de las borras de café tienden a fusionarse con el activador hasta que se forma un líquido viscoso difícil de filtrar y separar, lo que afecta el rendimiento obtenido de Carbón activado. La etapa de pre carbonización se realizó en la mufla perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias (LOU).

Primeramente, se procedió a pesar aproximadamente 25 gramos de la muestra en crisoles tapados (para controlar la atmósfera oxidante para no generar combustión), luego se prendió la mufla a razón de 10°C/min para después introducir los crisoles en

la mufla con ayuda de las pinzas. Pre carbonizar la muestra hasta alcanzar una temperatura de 250°C, una vez alcanzada la temperatura se deja actuar por un lapso de 1 hora, después de pre carbonizar la muestra se apaga el equipo y se espera a que este baje la temperatura para sacar la muestra y así almacenarlo en un recipiente de vidrio limpio y seco con su respectiva tapa para que no absorba humedad del ambiente.

Se repite el procedimiento descrito anteriormente hasta obtener la cantidad suficiente de borra de café pre carbonizada.

Ilustración II-21. Borrás de café pre carbonizada



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.7. Impregnación

Luego de la pre carbonización de la muestra se aplica la impregnación química, en esta etapa la materia prima se pone en contacto directo con el reactivo o precursor activante. Para este proyecto de investigación se utilizó como agente activante el ácido fosfórico al 85% (grado-técnico alimenticio) con una volatilidad cuyas características son Tasa de evaporación: 40.5 nBuAc=100 25°C, presión de vapor: 17.5 mmHg a 20°C, presión de vapor: 12.3 kPa a 50°C. Posteriormente se preparó dos diferentes concentraciones al 30% y 40% para la impregnación del precursor, con una relación 1:3 p/v ya que de acuerdo a bibliografía estudiada se definió que es la mejor relación de impregnación para obtener un carbón activado de borras de café aplicando el siguiente procedimiento.

- Pesar 10 gr de borras de café pre carbonizada y llevar a un vaso de precipitado de 100 ml.

- Adicionar al vaso precipitado con la muestra 30 ml de ácido fosfórico en la concentración especificada anteriormente, luego mezclar con una varilla de vidrio hasta alcanzar la homogeneidad de la muestra.
- Dejar reposar la mezcla durante 24 horas para que el activador influya en el proceso.

Ilustración II-22. Impregnación de las borras de café

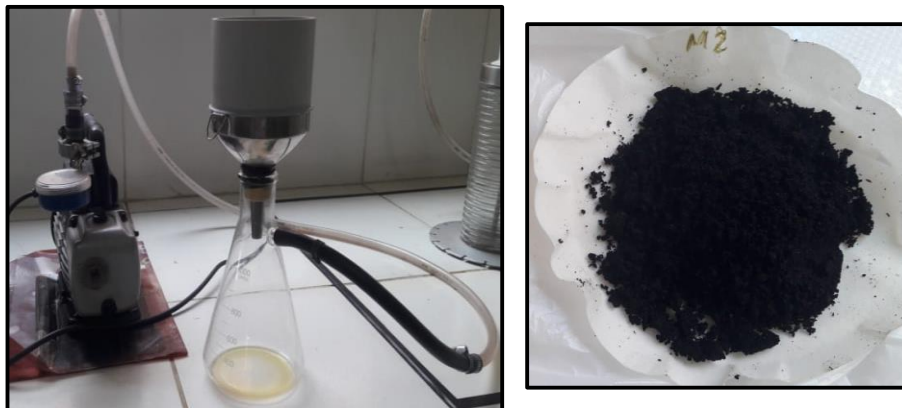


Fuente: Elaboración propia, 2021

Pasado el tiempo de impregnación se procedió a filtrar la mezcla para separar las borras de café pre carbonizada del exceso de agente activante para luego introducir la muestra en los crisoles. La filtración se realizó al vacío con el fin de incrementar la velocidad de filtración, este procedimiento se realizó de manera cuidadosa para evitar que partículas de la muestra traspasen el filtrado.

Luego de la filtración al vacío se llevó la muestra a carbonizar ya que esta es una muestra pequeña y el contenido de humedad no afecta el proceso, en caso de muestras grandes a escala industrial se recomienda optar por una etapa de secado para luego carbonizar la muestra, de modo que el tiempo de carbonización y activación no se vea afectada.

Ilustración II-23. Filtración de la muestra impregnada



Fuente: Elaboración propia,2021

2.4.8. Carbonización y Activación

Luego de la impregnación se realizó la etapa de la carbonización en la mufla del laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) donde se desarrolló la activación química, de acuerdo al siguiente procedimiento.

Ilustración II-24. Mufla



Fuente: Elaboración propia,2021

- Pesar el crisol con su respectiva tapa en una balanza analítica y anotar el dato.

- Tarar la balanza analítica e introducir al crisol la muestra de borras de café ya impregnada con el ácido fosfórico, luego pesar el crisol con la muestra y anotar el dato.
- Introducir los crisoles con las muestras impregnadas dentro de la mufla a utilizar para ser sometido a carbonización y así ejecutar su activación. Para la presente investigación se realizó la activación química a dos diferentes temperaturas, las cuales son 450°C y 550°C durante 2 y 3 horas, el tiempo se cronometra desde el momento en el que alcanza dichas temperaturas.
- La carbonización se puede verificar tomando una pequeña porción de la muestra y ejerciendo una presión hasta escuchar un sonido de ruptura y observando que no exista manchas en la superficie, caso contrario dejar carbonizar por media hora más.
- Una vez obtenido el producto deseado se apagó la mufla y se dejó enfriar hasta que alcanzó una temperatura de 100° C.
- Se procedió a retirar las muestras de carbón activado con ayuda de las pinzas para luego llevar los crisoles a un desecador hasta que enfríen.

Ilustración II-25. Retiro de crisoles de la mufla con ayuda de pinzas



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Finalmente se procede a pesar los crisoles con las muestras de carbón activado para luego lavar las muestras.

Ilustración II-26. Carbón activado obtenido



Fuente: Elaboración propia,2021

2.4.9. Lavado

Luego de la carbonización se procede a lavar el carbón obtenido con la finalidad de eliminar el ácido fosfórico residual hasta alcanzar un pH próximo a la neutralidad (pH 7). Este procedimiento se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Primero se procedió a calentar el agua destilada en un vaso de precipitación de 1000ml.

Ilustración II-27. Agua destilada caliente.

Fuente: Elaboración propia,2021

- Se adicionó 30ml de agua destilada caliente en un vaso de precipitación luego se adicionó al mismo 5ml de hidróxido de sodio 0.1N, ya que el carbón activado se encuentra en medio ácido.
- Se introdujo el carbón activado en el vaso de precipitado y se procedió a agitar constantemente con una varilla de vidrio.

Se utilizó agua destilada para evitar la contaminación del producto ya que el agua destilada es una forma de agua tratada, limpia de microorganismos y posibles contaminantes disueltos en ella. Sin embargo, lavar el producto en grandes cantidades con agua destilada a escala industrial ocasionaría un incremento en el costo de producción, es por ello que se podría tomar como una alternativa el uso del agua potable mediante osmosis inversa, este es un proceso de purificación el cual se usa para desalinizar, suavizar aguas, remover materia orgánica y separar de contaminantes específicos del agua otra alternativa sería un ablandador de agua.

Ilustración II-28. Lavado del carbón activado.



Fuente: Elaboración propia,2021

- Se cortó el papel filtro (watman 42) de acuerdo a las dimensiones del embudo a utilizar para luego filtrar el carbón activado lavado.
- Luego se procedió a medir el pH, al no alcanzar el pH requerido se prosiguió lavando con agua destilada e hidróxido de sodio 0.1 N.
- Finalmente se logró obtener el pH requerido para neutralizar el exceso de H_3PO_4 luego de lavar el carbón activado de 5 a 6 veces cada 5 minutos.

Ilustración II-29. Filtración y Ph del carbón activado lavado



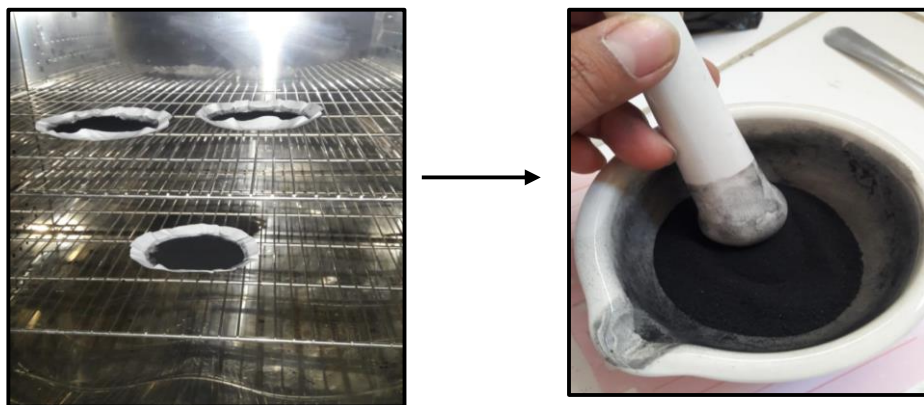
Fuente: Elaboración propia,2021

2.4.10. Secado

Luego de culminar el lavado del carbón activado obtenido se procede a secar el producto obtenido con el fin de remover la humedad presente y para ello se precalentó la estufa hasta una temperatura de 120°C , luego se procedió a introducir las muestras de carbón activado en la estufa durante un lapso de tiempo de 5 horas.

Una vez retirada la muestra de la estufa se pulverizó el producto obtenido en un mortero, se pesó la masa final.

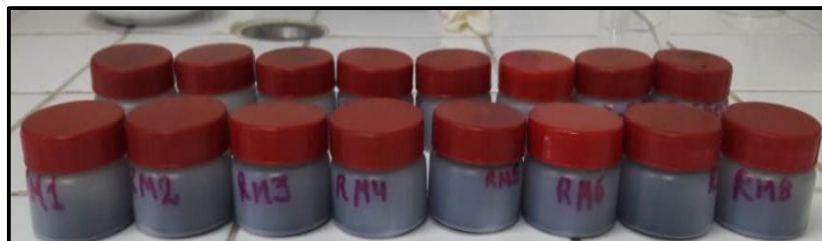
Ilustración II-30. Etapa de secado y pulverizado del carbón activado obtenido



Fuente: Elaboración propia,2021

El carbón activado obtenido se almacenó en frascos de plástico con doble tapa para su posterior análisis.

Ilustración II-31. Almacenamiento del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.11. Caracterización del producto obtenido

2.4.11.1. Determinación del índice del yodo

El índice de yodo (o “número de yodo”) es una indicación de área superficial disponible en m^2 /gramo de carbón activado. Generalmente, el índice de yodo es de 50 a 100 mg/g menor en comparación con el área de superficie.

El procedimiento del análisis en la determinación del índice de yodo se realizó de acuerdo a la norma (ASTM D4607-14) Anexo B y la norma (AWWA B 600-78) de la American Water Works Association.

El procedimiento que se realizó fue el siguiente:

- Primeramente, se pesó 2 gr de carbón activado en base seca y se llevó a un Erlenmeyer de 250 ml.

Ilustración II-32. Carbón activado pesado.



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Con ayuda de una pipeta adicionar en el Erlenmeyer 10ml de HCl al 5%, luego agitar el Erlenmeyer de manera continua hasta que el carbón se disuelva completamente con el ácido.
- Se llevo el Erlenmeyer a ebullición en un calentador por un lapso de tiempo de 30 segundos. Concluido el tiempo de ebullición se procedió a enfriar el Erlenmeyer a temperatura ambiente.

Ilustración II-33. Ebullición del HCl



Fuente: Elaboración propia,2021

- Pipetear 100ml de la solución estándar de yodo 0,1N y transferir al Erlenmeyer. Luego se tapó inmediatamente el Erlenmeyer y se agito durante 30 segundos.
- Posteriormente se filtra la solución a través de un papel filtro Whatman 42 y se lo coloca en un embudo.

Ilustración II-34. Filtración de la muestra preparada



Fuente: Elaboración propia, 2021

- Se procede a descartar los primeros 25ml a 30ml del filtrado para luego recoger el restante en un Erlenmeyer.
- Titular 50 ml de la muestra filtrada con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0,1 N. La muestra debe filtrarse hasta que adquiera una coloración amarillo pálido.
- Luego se añadió 1ml de solución de almidón a la muestra anterior, adquiriendo una tonalidad azul.
- Se continúa titulando hasta que la tonalidad azul desaparezca. Luego se anota el volumen de tiosulfato de sodio 0,1 N para luego determinar el número de yodo.

Ilustración II-35. Titulación con tiosulfato de sodio de la muestra preparada



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.4.11.2. Determinación del índice del azul de metileno

El análisis de azul de metileno se utiliza para determinar la capacidad de adsorción de los carbones activados. El método de análisis del índice de azul de metileno se realizó de acuerdo a los procedimientos establecidos por Segovia y Garcés, 2017 y Test methods for activated carbon 1986. (Anexo E)

Para el desarrollo de este análisis se utilizó azul de metileno al 1%, con la finalidad de preparar las diferentes soluciones propuestas con la concentración ideal donde se pueda diferenciar con facilidad la variación de color antes y después de la adsorción con carbón activo, y que además se pueda determinar la absorbancia de luz en el espectrofotómetro.

Curva de calibración de la solución de azul de metileno

- Primeramente, se preparó una solución de azul de metileno de concentración 4 mg/l, de la cual se obtuvo un color azul bastante oscuro, difícil de utilizar en el espectrofotómetro.

- Partiendo de la solución anterior se preparó diferentes soluciones de azul de metileno en concentraciones de (0.25- 4) mg/l, también se preparó una solución blanco de agua destilada.

Ilustración II-36. Soluciones preparadas para la curva de calibración.



Fuente: Elaboración propia,2021

- Se procede a encender el espectrofotómetro 15 min antes de ser usado con la finalidad de obtener resultados más exactos, luego se selecciona el modo (absorbancia), la longitud de onda de 665,5 nm y se procede a leer el blanco.
- Se lleva la muestra al interior del espectrofotómetro y se continúa leyendo la absorbancia a 665,5 nm, se realiza el mismo procedimiento para cada una de las soluciones.
- Con los datos obtenidos se realiza la curva patrón de calibración absorbancia-concentración.

Decoloración de la solución de azul de metileno para determinar el porcentaje de remoción

La decoloración de azul de metileno se llevó a cabo con la solución de 2mg/l que se preparó anteriormente. Este procedimiento consta de las siguientes etapas:

- Pesar 0.1 gramos de carbón activado.
- De la solución de 2mg/l de A.M, pipetear 25ml e introducirlo en un Erlenmeyer. Luego adicionar al mismo el carbón activado ya pesado.

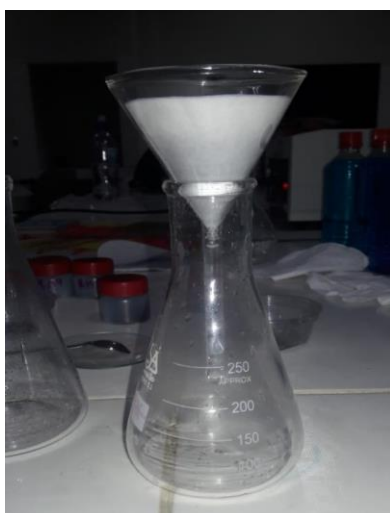
Ilustración II-37. Muestra de azul de metileno con 2mg/l para análisis.



Fuente: Elaboración propia,2021

- Se debe agitar el Erlenmeyer con la muestra de manera continua durante 15 minutos hasta que se decolore.
- Se procede a filtrar la solución decolorada y para ello se utilizó un papel filtro Whatman 42 y un embudo.

Ilustración II-38. Filtración de la solución decolorada



Fuente: Elaboración propia,2021

- Se introduce la solución en la cubeta, evitando burbujas en la misma. Luego se coloca la cubeta en la celda del espectrofotómetro.
- Se anota el dato de la absorbancia a una longitud de 665.5 nm.

Ilustración II-39. Espectrofotómetro



Fuente: Elaboración propia,2021

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL PROCESO

Los resultados obtenidos durante el proceso de Obtención de Carbón Activado a partir de las borras de café de acuerdo a cada etapa se describen a continuación:

3.1.1. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Resultados de análisis del porcentaje de humedad de las borras de café

Para determinar el porcentaje de humedad de la materia prima y obtener resultados verídicos se analizaron 5 muestras de borras de café y se obtuvo un promedio.

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla III-15:

Tabla III-15. Resultados del porcentaje de humedad de las borras de café en base seca.

Muestra	Humedad (%)
1	5,73
2	5,73
3	5,74
4	5,51
5	5,82
Promedio	5,706

Fuente: elaboración propia, 2021

Como se puede observar el resultado promedio del porcentaje de humedad de las borras de café es de 5,706 % de contenido en agua por cada 5 gr de materia prima en un lapso de tiempo de aproximadamente 14 min y una temperatura de 105°C.

Resultados de análisis de la materia prima en base seca

Los análisis que se realizaron a la materia prima en base seca fueron el porcentaje de contenido de cenizas, el porcentaje de material volátil y el carbón fijo de las borras de café. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la tabla III-17

Tabla III-16. Análisis de la caracterización de la materia prima en base seca

Análisis	Número de muestras			Promedio
	1	2	3	
% Cenizas	2,396	1,298	1,347	1,681
% Material Volátil	17,524	16,875	17,582	17,327
% Carbón Fijo	80,992			

Fuente: elaboración propia,2021

3.1.2. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PRODUCTO OBTENIDO

3.1.2.1. Resultados de análisis del índice de yodo del carbón activado obtenido

Los resultados obtenidos en el análisis del índice de yodo para el carbón activado obtenido de borras de café se desarrollaron de acuerdo a la norma (ASTM D4607-14) y la norma (AWWA B 600-78) de la American Water Works Association, para conocer la concentración residual de la solución filtrada esto quiere decir que mientras más alto sea el valor del índice de yodo calculado mayor es la porosidad del carbón activado, por lo tanto se tiene un mayor número de microporos y mejor capacidad de adsorción. El índice de yodo o número de yodo se define como la masa en miligramos de yodo atómico que se adsorbe por gramo de carbón.

A continuación, se expresan las siguientes fórmulas para la determinación del índice de yodo.

Determinación del Índice de yodo

$$\text{Índice de yodo} = \frac{V}{m} * f \quad (\text{III-5})$$

Cálculo de V/m

$$\frac{V}{m} = f \frac{A - (2,2 * B * V1)}{mc} \quad (\text{III-6})$$

Cálculo de las constantes del Índice de Yodo A y B

$$A = N1 * 12693 \quad (\text{III-7})$$

$$B = N2 * 126,93 \quad (\text{III-8})$$

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

$$C = \frac{N2 * V1}{50} \quad (\text{III-9})$$

Donde:

V/m: mg de yodo absorbidos por gramo de carbón activado

C: normalidad del filtrado residual (para calcular factor f)

f: factor de corrección (ver Anexo C)

V1: Volumen utilizado de tiosulfato de sodio 0,1 N en ml

N1: normalidad de la solución estándar de yodo 0,1 N

N2: normalidad de la solución estándar del tiosulfato de sodio 0,1 N

mc: masa del carbón activado.

Se toma como ejemplo la muestra 7 cuya temperatura es 450°C, Concentración al 40% y un tiempo de 3 hr.

Primero se calculó los valores de las constantes A y B con las ecuaciones (III-7) y (III-8)

$$A = 0,1N * 12693$$

$$A = 1269,3$$

$$B = 0,1 * 126,93$$

$$B = 12,693$$

Posteriormente se calcula V/m con los valores de las constantes A y B utilizando la ecuación (III-6)

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2,2 * B * V1)}{mc}$$

$$\frac{V}{m} = \frac{1269,3 - (2,2 * 12,693 * 7,2 \text{ ml})}{2.001}$$

$$\frac{V}{m} = 533.854$$

Luego se calcula el valor C con la ecuación (III-9)

$$C = \frac{0,1N * 7,2}{50}$$

$$C = 0,0144$$

Para obtener el valor de “f” se utilizó el dato obtenido de la constante $C = 0,0144$ de la muestra 7 por lo que buscamos en el (Anexo C) el valor de factor de corrección del índice de yodo, obteniendo así el valor de $f = 1,0613$.

Una vez obtenido el valor del factor de corrección se procedió a calcular el índice de yodo “f” de carbón activado de borras de café con la ecuación (III-5).

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

$$\text{Índice de yodo} = 533.854 * 1,0613$$

$$\text{Índice de yodo} = 566,579 \text{ mg/g}$$

Tabla III-17. Resultados del cálculo del índice de yodo

Muestra	Masa C.A (gr)	Volumen HCl 5%	N (NaSO3)	N (Yodo)	Volumen (NaSO3) ml	C	f	V/m	Índice de yodo
M1	2,002	10	0,1	0,1	9,5	0,0190	1,0100	501,5066	506,5217
M2	2,005	10	0,1	0,1	13,5	0,0270	0,9538	445,0463	424,4852
M3	2,004	10	0,1	0,1	7,2	0,0144	1,0613	533,0553	565,7316
M4	2,005	10	0,1	0,1	11	0,0220	0,9863	479,8650	473,2909
M5	2,005	10	0,1	0,1	12	0,0240	0,9725	465,9376	453,1243
M6	2,002	10	0,1	0,1	13,2	0,0264	0,9463	449,8977	425,7382
M7	2,001	10	0,1	0,1	7,7	0,0154	1,0488	526,8769	552,5884
M8	2,005	10	0,1	0,1	13,1	0,0262	0,9588	450,6173	432,0519

Fuente: elaboración propia,2021

De la tabla. III-18 se comprobó que el mejor carbón activado obtenido es el de la muestra 3, el cual fue impregnado con una concentración de 40% de ácido fosfórico a una temperatura de activación de 450° C por un tiempo de dos horas, dando así un resultado del índice de yodo de 565,7316 mg/gr no obstante, se puede observar en la tabla que a menor temperatura de carbonización el índice de yodo de los carbones activados de borras de café va incrementando.

Tabla III-18. Réplicas de los resultados del cálculo del índice de yodo

Muestra	Masa C.A (g)	Volumen HCL 5 %	N (NaSO3)	N (Yodo)	Volumen (NaSO3) ml	C	f	v/m	Índice de yodo
1	2,002	10	0,1	0,1	10	0,0200	1,0013	494,5325	495,1754
2	2,007	10	0,1	0,1	13,6	0,0272	0,9525	443,2115	422,1589
3	2,007	10	0,1	0,1	8	0,0160	1,0413	521,1277	542,6502
4	2,004	10	0,1	0,1	12,1	0,0242	0,9700	464,7766	450,8333
5	2,002	10	0,1	0,1	11	0,0220	0,9863	480,5841	474,0001
6	2,007	10	0,1	0,1	13	0,0260	0,9600	451,5596	433,4973
7	2,004	10	0,1	0,1	8,2	0,0164	1,0375	519,1209	538,5879
8	2,003	10	0,1	0,1	13,5	0,0270	0,9538	445,4907	424,9090

Fuente: elaboración propia,2021

Se puede observar en la tabla. III-19 que, en los resultados obtenidos de las réplicas realizadas, se determinó que el mejor carbón activado obtenido es la muestra 3 cuyas características son las mismas de los experimentos realizados anteriormente obteniendo así un resultado de 542,6502 mg/g.

Tabla III-19. Resultados promedio del índice de yodo

Muestra	Temperatura	Concentración	tiempo	Experimentos	Réplicas	Promedio
	(h)	(%)	(C)	índice de yodo	índice de yodo	índice de yodo
	(mg/gr)					
1	450	30	2	506,5217	495,1754	500,8485
2	550	30	2	424,4852	422,1589	238,4407
3	450	40	2	565,7316	542,6502	554,1909
4	550	40	2	473,2909	450,8333	462,0621
5	450	30	3	453,1243	474,0001	463,5622
6	550	30	3	425,7382	433,4973	429,6177
7	450	40	3	552,5884	538,5879	545,5882
8	550	40	3	432,0519	424,9090	428,4805

Fuente: elaboración propia,2021

De acuerdo a los resultados expuestos anteriormente se realiza una comparación para el índice de yodo con los parámetros establecidos por la norma ASTM D-4607 el cual especifica que el carbón activado puede obtener un índice de yodo de 500 a 1200 mg/gr. En este caso se puede observar que la muestra 3 de carbón activado de borras de café obtuvo 554,1909 mg/gr en promedio, esto indica que está dentro del parámetro establecido en la norma ASTM D-4607.

Resultados del área superficial según el índice de yodo

El cálculo del área superficial se realizó en función del índice de yodo. De acuerdo a DESOTEC (s.f.) el área superficial equivale a más o menos el número de yodo más 100 y el resultado se expresa en m²/g.

Para calcular el área superficial se tomó como ejemplo la muestra 7 cuya temperatura es de 450°C y una concentración del 40% por un tiempo de calcinación de 3 horas.

$$\text{Área superficial} = \text{índice de yodo} + 100$$

$$\text{Área superficial} = 552,5884 + 100 = 652,5884 \text{ m}^2/\text{g}.$$

Tabla III-20. Área superficial de los experimentos del carbón activado obtenido

Experimentos		
Muestra	Índice de yodo (mg/gr)	Área Superficial (m²/gr)
1	506,5217	606,5217
2	424,4852	524,4852
3	565,7316	665,7316
4	473,2909	573,2909
5	453,1243	553,1243
6	425,7382	525,7382
7	552,5884	652,5884
8	432,0519	532,0519

Fuente: elaboración propia,2021

Tabla III-21. Área superficial de réplicas del carbón activado obtenido

Replicas		
Muestra	Índice de yodo (mg/gr)	Área Superficial (m²/gr)
1	495,1754	595,1754
2	422,1589	522,1589
3	542,6502	642,6502
4	450,8333	550,8333
5	474,0001	574,0001
6	433,4973	533,4973
7	538,5879	638,5879
8	424,9090	524,9090

Fuente: elaboración propia,2021

Tabla III-22. Promedio del área superficial

Muestra	Experimentos Área Superficial (m²/gr)	Replicas Área Superficial (m²/gr)	Promedio
1	606,5217	595,1754	600,8485
2	524,4852	522,1589	523,3221
3	665,7316	642,6502	654,1909
4	573,2909	550,8333	562,0621
5	553,1243	574,0001	563,5622
6	525,7382	533,4973	529,6177
7	652,5884	638,5879	645,5882
8	532,0519	524,9090	528,4805

Fuente: elaboración propia, 2021

De acuerdo a la tabla III-23 se observa que la mejor muestra en cuanto al área superficial promedio es la muestra 3 la cual se obtuvo con un diseño de una temperatura de 450°C y una concentración del 40% por un lapso de tiempo de calcinación de 2 horas.

3.1.2.2. Resultados de análisis del índice de azul de metileno del carbón activado obtenido

En el análisis de azul de metileno se determinó la cantidad decolorada de la solución por cada 0.1 gramos de carbón activado obtenido; la prueba se realizó a cada una de las muestras de carbón activado obtenido.

Curva de calibración de la solución de azul de metileno

Para realizar la curva de calibración, se obtuvo datos de la lectura de la absorbancia de luz en el espectrofotómetro, introduciendo las soluciones de concentración conocida descritas en el capítulo anterior.

Como se puede observar en la tabla III-24 se utilizaron las soluciones de concentración, 1; 2; 3; 4 y 5mg/l debido a que la utilización de concentraciones superiores, dan un

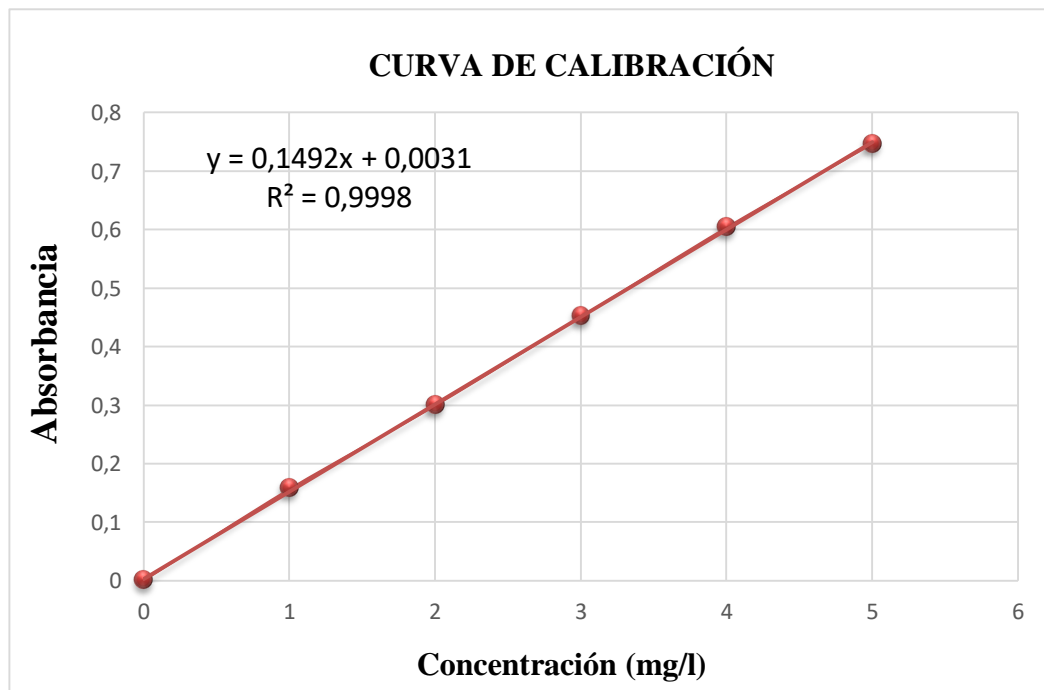
coeficiente de correlación más alejado de la unidad, por tanto, impide la lectura de la absorbancia.

Tabla III-23. Lecturas de absorbancia para la curva patrón con distintas concentraciones de azul de metileno.

Concentración (mg/l)	Absorbancia
0	0
1	0,157
2	0,299
3	0,451
4	0,604
5	0,746

Fuente: elaboración propia,2021

Gráfica III-1 Curva de calibración y ecuación de concentración



Fuente: elaboración propia,2021

De la gráfica III-1 se obtiene la ecuación de concentración con la que se podrá realizar los cálculos de porcentaje de remoción y masa adsorbida de la solución de azul de metileno por el carbón activado.

La ecuación de la concentración es:

$$y = 0,1492 x + 0,0031$$

$$x = \frac{y-0,0031}{0,1492} \quad (\text{III-10})$$

Donde

x = la concentración expresada en mg/l

y = absorbancia expresada en nm

Cálculos realizados del índice de azul de metileno del carbón activado obtenido

Para calcular la masa adsorbida del azul de metileno que fue decolorado por gramo de carbón activado se utilizó la solución de 3 mg/l de las soluciones preparadas de azul de metileno que se emplearon para la curva de calibración.

Para este análisis se utilizó la siguiente fórmula:

$$qe = \frac{(Co-Cf)V}{m} \quad (\text{III-11})$$

Donde

qe = Masa adsorbida (mg/gr)

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

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

V = Volumen en (l) de la solución "A" preparada

m = Masa del carbón activado en (gr)

Para calcular la concentración inicial de la solución de azul de metileno que se utilizará para obtener el % de remoción de cada muestra de carbón activado obtenido se

empleara la ecuación (III-12) donde la variable “x” que obtuvimos de la curva de calibración es la concentración inicial del azul de metileno.

Para calcular el porcentaje de remoción se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remocion} = \frac{(C_o \text{ de A.M.} - C_f)}{C_o \text{ de A.M.}} * 100\% \quad (\text{III-12})$$

Donde

$C_o \text{ de A.M.}$ = 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)

Para calcular el área superficial se tomó como ejemplo la muestra 7 cuya temperatura es de 450°C y una concentración del 40% por un tiempo de calcinación de tres horas.

Con la ecuación (III-10) se calculó la concentración inicial de la solución de azul de metileno.

La absorbancia del azul de metileno al inicio es de 0,451

$$y = 0,451$$

$$x = \frac{y - 0,0031}{0,1492}$$

$$x = \frac{0,451 - 0,0031}{0,1492}$$

$x = 3,002 \text{ mg/l} = C_o$ de la solución inicial de azul de metileno

Cálculo de la concentración final de la solución de azul de metileno filtrado.

La absorbancia de la muestra 7 es de 0,063

$$y = 0,063$$

$$x = \frac{y - 0,0031}{0,1492}$$

$$x = \frac{0,063 - 0,0031}{0,1492}$$

$x = 0,401 \text{ mg/l} = C_f$ de la solución final de azul de metileno después del filtrado.

Cálculo de la masa adsorbida de la muestra 7 con la ecuación (III-11) expresado en mg/g.

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

$$q_e = \frac{(3,002 \text{ mg/l} - 0,401 \text{ mg/l}) * 0,025 \text{ l}}{0,1 \text{ g}}$$

$$q_e = 0,650 \text{ mg/g}$$

Porcentaje de remoción de azul de metileno de la muestra 7 se utiliza la ecuación (III-12).

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

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(3,002 \text{ mg/l} - 0,401 \text{ mg/l})}{3,002 \text{ mg/l}} * 100\%$$

$$\% \text{ Remoción} = 86,626\%$$

Tabla III-24. Lecturas de los experimentos de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa adsorbida y % de remoción

Muestra	Absorbancia	X (mg/l)	Masa Adsorbida	% Remoción
M1	0,070	0,448	0,638	85,064
M2	0,077	0,495	0,627	83,501
M3	0,051	0,321	0,670	89,306
M4	0,075	0,482	0,630	83,947
M5	0,073	0,468	0,633	84,394
M6	0,076	0,489	0,628	83,724
M7	0,063	0,401	0,650	86,626
M8	0,073	0,468	0,633	84,394

Fuente: elaboración propia, 2021

Tabla III-25. Lecturas de las réplicas de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa adsorbida y % de remoción

Muestra	Absorbancia	X (mg/l)	Masa Adsorbida	% Remoción
MR1	0,072	0,462	0,635	84,617
MR2	0,075	0,482	0,630	83,947
MR3	0,055	0,348	0,664	88,413
MR4	0,072	0,462	0,635	84,617
MR5	0,075	0,482	0,630	83,947
MR6	0,073	0,468	0,633	84,394
MR7	0,069	0,442	0,640	85,287
MR8	0,070	0,448	0,638	85,064

Fuente: elaboración propia,2021

Tabla III-26. Promedio del % de remoción del azul de metileno y masa adsorbida

Muestra	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Tiempo (hr)	Promedio masa adsorbida (mg/gr)	Promedio % de remoción del azul de metileno
1	450	30	2	0,637	84,840
2	550	30	2	0,628	83,724
3	450	40	2	0,667	88,859
4	550	40	2	0,633	84,282
5	450	30	3	0,632	84,171
6	550	30	3	0,631	84,059
7	450	40	3	0,645	85,957
8	550	40	3	0,636	84,729

Fuente: elaboración propia,2021

En la Tabla III-27 se puede observar que, según los promedios de los resultados de la prueba de Azul de metileno, el mejor carbón activado obtenido es la muestra 3, esto de acuerdo a los procedimientos establecidos por el compendio de métodos de test para el carbón activado del concilio europeo de federaciones de manufactureros químicos (American Water Works Association- AWWA B600-78) y la norma técnica colombiana NTC – 4467.

3.1.3. BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

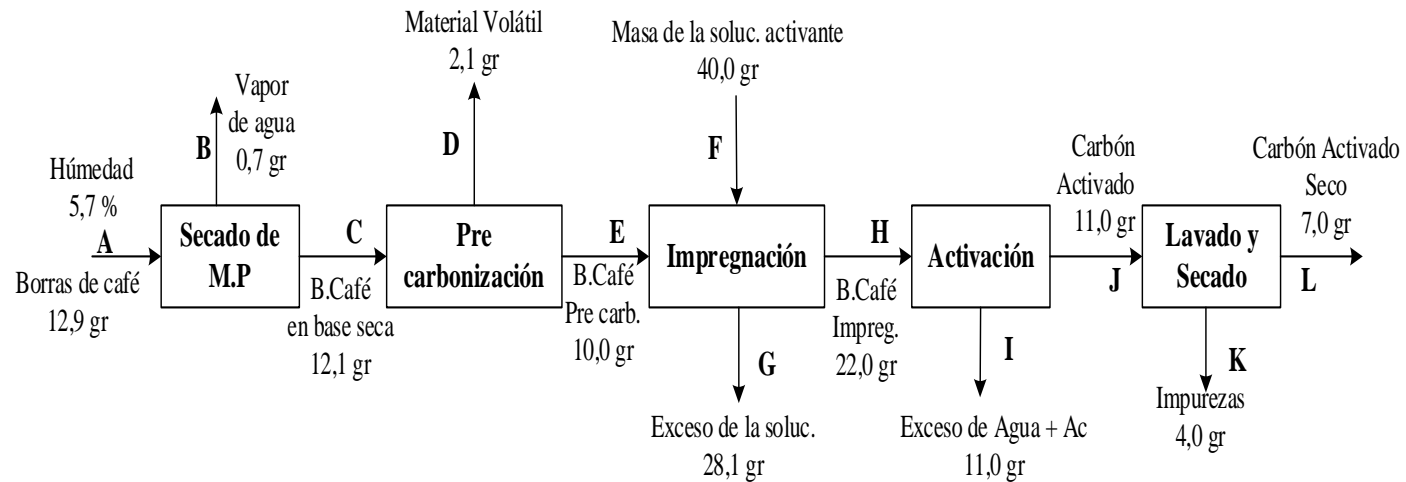
A continuación, se detallan los balances de materia y energía de los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto además de la discusión de los mismos.

En el diagrama III-4 se detallan los resultados del experimento de la muestra 3

3.1.3.1. Balance de materia

Diagrama de flujo del balance de materia general del carbón activado de borras de café

Diagrama III-4. Diagrama de Flujo General del proceso de obtención de carbón activado de borras de café.



Fuente: Elaboración Propia. 2021

Tabla III-27. Corrientes del balance de materia para cada experimento y réplica.

Muestra	Masa M.P Húmeda	Masa vapor de agua	Masa M.P seca	Masa M. Volátil	Masa M.P pre carb.	Masa soluc.act.	Masa soluc. exceso	Masa B. Café impreg	Masa H₂O+Ac	Masa carbón Activado	Masa Imp.	Masa carbón Act. final
M1	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	26,9	20,7	10,1	10,5	4,1	6,5
M2	12,9	0,7	12,1	2,1	10,0	37,5	26,4	21,1	10,8	10,3	3,7	6,6
M3	12,9	0,7	12,1	2,1	10,0	40,0	28,1	22,0	11,0	11,0	4,0	7,0
M4	12,9	0,7	12,1	2,1	10,0	40,0	28,7	21,4	11,0	10,4	4,2	6,2
M5	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	26,7	20,9	10,7	10,2	3,5	6,7
M6	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	27,0	20,6	10,4	10,2	4,0	6,2
M7	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	40,0	28,3	21,8	10,8	11,0	5,0	6,0
M8	12,8	0,7	12,1	2,1	10,0	40,0	28,8	21,2	11,0	10,2	3,9	6,3
MR1	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	26,5	21,1	10,6	10,5	4,2	6,2
MR2	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	26,9	20,7	10,4	10,3	4,2	6,1
MR3	13,0	0,7	12,2	2,1	10,1	40,0	29,3	20,9	10,6	10,3	3,4	6,9
MR4	12,9	0,7	12,1	2,1	10,0	40,0	27,6	22,5	12,0	10,5	4,5	6,0
MR5	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	37,5	26,4	21,2	10,4	10,8	4,3	6,5
MR6	12,8	0,7	12,1	2,1	10,0	37,5	26,0	21,5	11,3	10,3	3,4	6,8
MR7	12,9	0,7	12,1	2,1	10,0	40,0	28,5	21,6	11,0	10,6	4,2	6,4
MR8	12,9	0,7	12,2	2,1	10,1	40,0	29,0	21,1	11,0	10,1	3,4	6,8

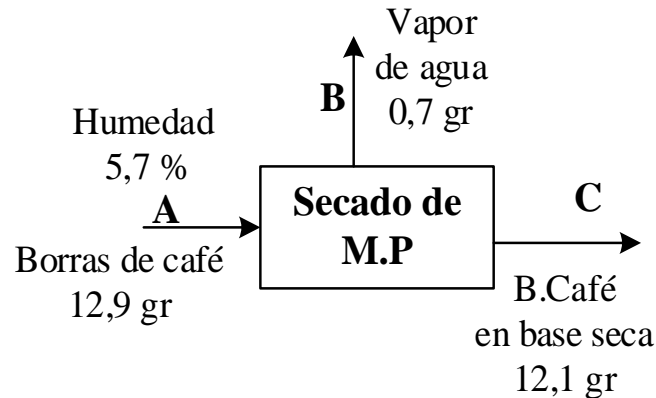
Fuente: Elaboración Propia. 2021

En tabla III-27, se puede observar las corrientes de cada una de las etapas realizadas para la obtención experimental de carbón activado borras de café. Las perdidas en las diferentes etapas se descartaron debido a que se consideraron insignificantes ya que se trabajó con pequeñas cantidades, siendo este 10 gr de muestra de materia prima.

Balance de materia por etapa

Para desarrollar el balance de materia por etapa se tomó como ejemplo la mejor muestra en base a las variables respuestas del diseño factorial, siendo estas área superficial y porcentaje de remoción, ejemplificando así la muestra 3.

Balance de materia en la etapa de secado de las borras de café



Balance general de masa en la etapa de secado

$$A = B + C \quad (\text{III-13})$$

Donde:

A= Masa de las borras de café húmedo

B= Masa de vapor de agua (0,7gr)

C= Masa de borras de café en base seca

$X_v =$ Fracción del contenido de humedad de las borras de café = $5,7\% = 0,057$

Reemplazando datos en la Ecuación (III-13)

$$A = A(0,057) + C$$

$$C = A - A(0,057)$$

$$A = \frac{C}{(1 - 0,057)} = \frac{12,1}{(1 - 0,057)}$$

$$A = 12,9 \text{ gr}$$

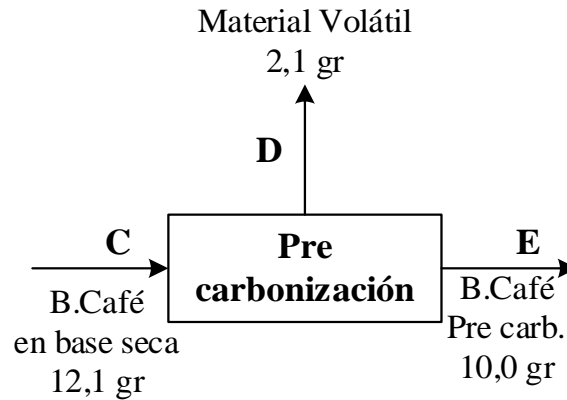
Los valores obtenidos de cada experimento y replica de las corrientes de la etapa de secado se detallan en la tabla III-28.

Tabla III-28. Valores de corrientes cada experimento y réplica de la etapa de secado

Muestra	Masa M.P Húmeda	Masa vapor de agua	Masa M.P seca
M1	12,9	0,7	12,2
M2	12,9	0,7	12,1
M3	12,9	0,7	12,1
M4	12,9	0,7	12,1
M5	12,9	0,7	12,2
M6	12,9	0,7	12,2
M7	12,9	0,7	12,2
M8	12,8	0,7	12,1
MR1	12,9	0,7	12,2
MR2	12,9	0,7	12,2
MR3	13,0	0,7	12,2
MR4	12,9	0,7	12,1
MR5	12,9	0,7	12,2
MR6	12,8	0,7	12,1
MR7	12,9	0,7	12,1
MR8	12,9	0,7	12,2

Fuente: elaboración propia,2021

Balance de materia en la etapa de pre carbonización



Balance general de masa en la etapa de pre carbonización

$$C = D + E \quad (\text{III-14})$$

Donde:

C= Masa de las borras de café en base seca

D= Masa de material volátil de las borras de café

E= Masa de las borras de café pre carbonizada

X_{mv}= Fracción del contenido de material volátil= 17,3% = 0,173

Reemplazando datos en la ecuación III-14

$$E = C - D$$

$$E = C - C(0,173)$$

$$E = 12,1 - 12,1(0,173)$$

$$E = 10,0 \text{ gr}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y replica de las corrientes de la etapa de pre carbonización se detallan en la tabla III-28.

Tabla III-29. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de pre carbonización

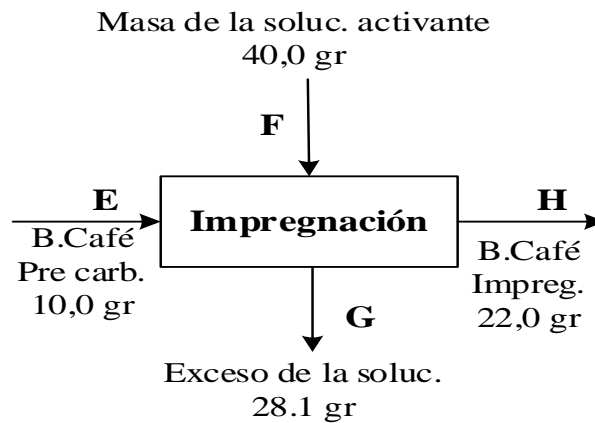
Muestra	Masa M.P seca	Masa M. Volátil	Masa M.P pre carb.
M1	12,2	2,1	10,1
M2	12,1	2,1	10,0
M3	12,1	2,1	10,0
M4	12,1	2,1	10,0
M5	12,2	2,1	10,1
M6	12,2	2,1	10,1
M7	12,2	2,1	10,1
M8	12,1	2,1	10,0
MR1	12,2	2,1	10,1
MR2	12,2	2,1	10,1
MR3	12,2	2,1	10,1
MR4	12,1	2,1	10,0
MR5	12,2	2,1	10,1
MR6	12,1	2,1	10,0
MR7	12,1	2,1	10,0
MR8	12,2	2,1	10,1

Fuente: elaboración propia,2021

Balance de materia en la etapa de impregnación con ácido fosfórico

La Impregnación es la etapa donde el agente activante empieza a reaccionar con la muestra pre carbonizada para así obtener el carbón activado. La impregnación se realizó durante 24 hr con concentraciones diferentes de ácido fosfórico y una relación de impregnación 1:3 p/v, como se describe en el capítulo II.

El diagrama de flujo para la etapa de impregnación con ácido fosfórico es el siguiente:



Balance general de masa en la etapa de pre carbonización

$$E + F = G + H \quad (\text{III-15})$$

Donde:

E= Masa de las borras de café pre carbonizada

F= Masa de la solución activante

G= Masa de la solución en exceso

H= Masa de las borras de café impregnada

Densidad del agua= 1gr/ml

Masa de agua para 30%= 19,412 gr; Masa de agua para 40%= 15,882gr

Densidad del ácido fosfórico= 1,71 gr/ml

Masa del ácido fosfórico al 30% = 18,105gr

Masa del ácido fosfórico al 40% = 24,142 gr

Resultado de masa de la solución de agua

$$F_{(30\%)} = M_{H_2O} + M_{ac.}$$

$$F_{(30\%)} = (19,412 + 18,105) \text{ gr}$$

$$F_{(30\%)} = 37,517 \text{ gr}$$

$$F_{(40\%)} = M_{H_2O} + Mac.$$

$$F_{(40\%)} = (15,882 + 24,142) \text{ gr}$$

$$F_{(40\%)} = 40,0 \text{ gr}$$

Despejar G de la ecuación III-15

$$G = E + F - H$$

$$G = 10,0 + 40,0 - 22,0$$

$$G = 28,1 \text{ gr}$$

Tabla III-30. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de impregnación

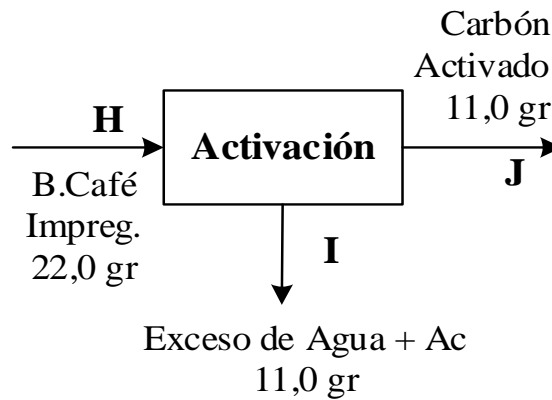
Muestra	Masa M.P pre carb.	Masa soluc. activante	Masa soluc. exceso	Masa B. Café impreg
M1	10,1	37,5	26,9	20,7
M2	10,0	37,5	26,4	21,1
M3	10,0	40,0	28,1	22,0
M4	10,0	40,0	28,7	21,4
M5	10,1	37,5	26,7	20,9
M6	10,1	37,5	27,0	20,6
M7	10,1	40,0	28,3	21,8
M8	10,0	40,0	28,8	21,2
MR1	10,1	37,5	26,5	21,1
MR2	10,1	37,5	26,9	20,7
MR3	10,1	40,0	29,3	20,9
MR4	10,0	40,0	27,6	22,5
MR5	10,1	37,5	26,4	21,2
MR6	10,0	37,5	26,0	21,5
MR7	10,0	40,0	28,5	21,6
MR8	10,1	40,0	29,0	21,1

Fuente: elaboración propia, 2021

Balance de materia en la etapa de Activación

En la etapa de activación química la materia prima ya impregnada se convierte en carbón activado, siguiendo el procedimiento del capítulo anterior.

A continuación, se detalla el diagrama de flujo para la etapa de activación.



Balance general de masa en el proceso de activación

$$H = I + J \quad (\text{III-16})$$

Donde:

H= Masa de borras de café impregnada

I= Masa de exceso de agua y ácido (material volátil)

J= Masa de carbón obtenido

De ecuación III-16 despejar I

$$I = H - J$$

$$I = 22,0 - 11,0$$

$$I = 11,0 \text{ gr}$$

Tabla III-31. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de Activación

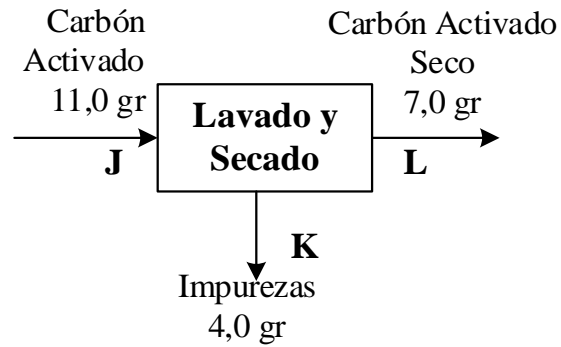
Muestra	Masa B. Café impreg	Masa agua+Ac	Masa carbón Activado
M1	20,7	10,1	10,5
M2	21,1	10,8	10,3
M3	22,0	11,0	11,0
M4	21,4	11,0	10,4
M5	20,9	10,7	10,2
M6	20,6	10,4	10,2
M7	21,8	10,8	11,0
M8	21,2	11,0	10,2
MR1	21,1	10,6	10,5
MR2	20,7	10,4	10,3
MR3	20,9	10,6	10,3
MR4	22,5	12,0	10,5
MR5	21,2	10,4	10,8
MR6	21,5	11,3	10,3
MR7	21,6	11,0	10,6
MR8	21,1	11,0	10,1

Fuente: elaboración propia,2021

Balance de materia en la etapa de lavado y secado del carbón activado obtenido

En esta etapa final del proceso de obtención de carbón activado se eliminan todas las impurezas, exceso de ácido y sales inorgánicas y orgánicas que se hubiesen podido formar. El proceso de obtención se describe en el capítulo anterior donde se observó que al lavar el producto se generó muchas pérdidas ya que las partículas más pequeñas del carbón activado se quedaban en los poros del papel filtro.

En la siguiente ilustración se detalla el diagrama de flujo para la etapa de lavado y secado.



Balance general de masa en la etapa de lavado y secado

$$J = K + L \quad (\text{III-17})$$

Donde:

J= Masa de carbón activado obtenido

K= Masa de impurezas

L= Masa de carbón activado final

De ecuación (III-17) despejar I

$$K = J - L$$

$$K = 11,0 - 7,0$$

$$K = 4,0 \text{ gr gr}$$

Tabla III-32. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de lavado y secado

Muestra	Masa carbón Activado	Masa impurezas	Masa carbón Act. final
M1	10,5	4,1	6,5
M2	10,3	3,7	6,6
M3	11,0	4,0	7,0
M4	10,4	4,2	6,2
M5	10,2	3,5	6,7
M6	10,2	4,0	6,2
M7	11,0	5,0	6,0
M8	10,2	3,9	6,3
MR1	10,5	4,2	6,2
MR2	10,3	4,2	6,1
MR3	10,3	3,4	6,9
MR4	10,5	4,5	6,0
MR5	10,8	4,3	6,5
MR6	10,3	3,4	6,8
MR7	10,6	4,2	6,4
MR8	10,1	3,4	6,8

Fuente: elaboración propia,2021

3.1.3.2. Balance de energía

El balance de energía de la investigación experimental de carbón activado obtenido se realizó en las etapas donde hubo consumo de energía.

Balance de energía en la etapa de secado

La etapa de secado se realizó en la estufa (ver anexo A) del laboratorio de operaciones unitarias, este tiene un factor de consumo de 0,5. El equipo de secado se utilizó en la etapa de secado de la materia prima por un lapso de tiempo de 8 horas a una temperatura de 110°C y secado del producto final a una temperatura de 120°C por 5 horas para minimizar el tiempo y ahorrar energía se introdujo 4 muestras por día haciendo un total de 20 horas, incluyendo los experimentos de las réplicas.

Primer secado a 110°C por 8hrs

Tiempo = $t = 8$ hrs

Temperatura = 110 °C

Factor = $f = 0,5$

Potencia del secador = $P_{\text{secador}} = 2$ Kw

$$E_{\text{secador}} = P_{\text{secador}} \times t \times f \quad (\text{III-18})$$

$$E_{\text{secador}} = 2kW \times 8 \text{ hrs} \times 0,5$$

$$E_{\text{secador}} = 8 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{secador}} = 8 \text{ kWh} = 8 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 28800 \text{ kJ}$$

La energía consumida para el proceso de secado en la primera etapa es de 28800 KJ.

Segunda etapa de secado a 120°C por 20hrs

Tiempo = $t = 20$ hrs

Temperatura = 120 °C

Factor = $f = 0,5$

Potencia del secador = $P_{\text{secador}} = 2$ Kw

$$E_{\text{secador}} = P_{\text{secador}} \times t \times f \quad (\text{III-19})$$

$$E_{\text{secador}} = 2kW \times 20 \text{ hrs} \times 0,5$$

$$E_{\text{secador}} = 20 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{secador}} = 20 \text{ kWh} = 20 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 72000 \text{ kJ}$$

La energía consumida para el proceso de secado después del lavado del carbón activado obtenido es de 72000 KJ.

Como se introdujeron 4 muestras por día para el secado por lo cual la energía total consumida por el horno es:

$$E_{\text{secador total}} = 28800 \text{ KJ} + 72000 \text{ KJ}$$

$$E_{\text{secador total}} = 100800 \text{ KJ}$$

La energía total consumida en el proceso de secado para todos los experimentos y replicas en total es de 100800 KJ.

Balance de energía en la etapa de pre carbonización

El proceso de pre carbonización se realizó en una mufla (ver anexo A) a una temperatura de 250 °C por 1 hora con un peso de materia prima de aproximadamente 100 gr de borra de café seco, este procedimiento se repitió 2 veces hasta alcanzar un peso aproximado de 200gr.

Tiempo = $t = 2 \text{ hrs}$

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

Temperatura de mufla = 250 °C

$$E_{\text{Mufla}} = P_{\text{Mufla}} \times t \quad (\text{III-20})$$

$$E_{\text{Mufla}} = 3,2 \text{ kw} \times 2 \text{ hrs}$$

$$E_{\text{Mufla}} = 6,4 \text{ kWh} = 6,4 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 23040 \text{ kJ}$$

La energía consumida en el proceso de pre carbonización en la mufla es de 23040 kJ.

Balance de energía en el proceso de activación química

En la activación química del carbón activado se introdujo 4 muestras a la mufla por 2 hr y las otras 4 muestras por 3 hr, las temperaturas en las que actuó la mufla fueron de 450 °C y 550 °C respectivamente.

Tiempo 1 = $t_1 = 2 \text{ hrs}$

Tiempo 2 = $t_2 = 3 \text{ hrs}$

Temperatura 1 = 450 °C

Temperatura 2 = 550 °C

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

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular la energía del tiempo 1 que es de 2 h:

$$E_{Mufla1} = P_{Mufla} \times t1 \quad (\text{III-21})$$

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

$$E_{Mufla1} = 6,4 \text{ kwh}$$

$$E_{Mufla1} = 6,4 \text{ kWh} = 6,4 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 23040 \text{ kJ}$$

Al resultado multiplicamos por los cuatros experimentos que se hizo a 2 h, si a esto sumamos los cuatro experimentos de las respectivas replicas a 2 h, se multiplicaría por ocho experimentos para tener el total de la energía en la activación a 2 h.

$$E_{Mufla1 \text{ total}} = 6,4 \text{ kWh} \times 8 = 51,2 \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 184320 \text{ kJ}$$

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular la energía al t2 que es de 3 h

$$E_{Mufla2} = P_{Mufla} \times t2 \quad (\text{III-22})$$

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

$$E_{Mufla2} = 9,6 \text{ kwh}$$

$$E_{Mufla2} = 9,6 \text{ kWh} = 9,6 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 34560 \text{ kJ}$$

Al resultado multiplicamos por los cuatros experimentos que hicimos a 3 h si a esto sumamos los cuatro experimentos de las respectivas réplicas a 3 h, se multiplicaría por ocho experimentos para tener el total de la energía en la activación a 3 h.

$$E_{Mufla2} = 9,6 \text{ kWh} \times 8 = 76,8 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 276480 \text{ kJ}$$

Se procede a sumar las energías utilizadas a 2 h y 3 h para así obtener el total de energía utilizada durante el proceso de activación.

$$E_{Mufla \text{ total } 1 \text{ y } 2} = 184320 \text{ kJ} + 276480 \text{ kJ} = 460800 \text{ kJ}$$

La energía consumida para el proceso de activación en la mufla es de 460800 kJ.

3.1.4. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO

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 utilizada, por lo tanto, el porcentaje del rendimiento en masa es igual a:

$$R = \frac{\text{Masa final de carbon activado}}{\text{Masa inicial de borras de café}} * 100\% \quad (\text{III-23})$$

A continuación, se ejemplificó el experimento realizado de la muestra 3

Donde:

Masa inicial de borras de café = 12,138 gr de borras de café en base seca

Masa final de carbón activado obtenido = 6,973 gr de carbón activado obtenido

$$R = \frac{6,973 \text{ gr}}{12,138 \text{ gr}} * 100\%$$

$$R = 57.448 \%$$

El rendimiento en masa no es relevante y determinante a la hora de seleccionar el método más eficiente en la obtención de carbón activado de borras de café, es por eso que para este proceso se determinó el porcentaje de adsorción del azul de metileno y el número de Iodo, los cuales indican la calidad del producto obtenido en cuanto a la capacidad de remoción y área superficial.

En la tabla III-32 se detalla el rendimiento en masa de cada uno de los experimentos y réplicas realizadas.

Tabla III-33. Rendimiento en masa de los experimentos y réplicas del carbón activado obtenido a partir de las borras de café.

Muestra	Masa Materia Prima seca (gr)	Masa carbón Activado final (gr)	RENDIMIENTO (%)
M1	12,186	6,462	53,027
M2	12,127	6,589	54,333
M3	12,138	6,973	57,448
M4	12,146	6,194	50,995
M5	12,206	6,674	54,680
M6	12,155	6,165	50,721
M7	12,184	5,981	49,090
M8	12,115	6,326	52,217
MR1	12,154	6,236	51,310
MR2	12,191	6,103	50,061
MR3	12,210	6,851	56,108
MR4	12,148	5,991	49,319
MR5	12,168	6,497	53,394
MR6	12,111	6,842	56,493
MR7	12,125	6,379	52,612
MR8	12,162	6,753	55,525
Promedio			52,958

Fuente: elaboración propia, 2021

3.1.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LAS VARIABLES RESPUESTAS

El análisis estadístico de los resultados obtenidos es de suma importancia para la interpretación de resultados experimentales ya que también se proporciona una estimación de los errores ejecutados y la exactitud con la que se realizan dichos experimentos.

El análisis de varianza (ANOVA) es el análisis estadístico que permite analizar la variación en una variable respuesta del diseño factorial del proyecto, los cuales son, el valor de índice yodo y el índice de azul de metileno.

Para la realización de análisis estadístico se utilizó el programa Minitab Versión 19.

3.1.5.1. Análisis estadístico de la variable respuesta área superficial

Análisis de varianza (ANOVA) también conocida como análisis factorial, constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre la media de una variable continua.

En cuanto a la realización del análisis estadístico para la variable respuesta área superficial del carbón activado de borras de café se tomaron los valores de las tablas III-21, III-22.

Tabla III-34. Resumen del diseño factorial variable respuesta área superficial

Factores:	3	Diseño de la base:	3. 8
Corridas:	16	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales	0

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Tabla III-35. Diseño factorial variable respuesta área superficial

Muestras	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Tiempo (hr)	área superficial (m ² /gr)
1	450	30	2	606,522
2	550	30	2	524,485
3	450	40	2	665,732
4	550	40	2	573,291
5	450	30	3	553,124
6	550	30	3	525,738
7	450	40	3	652,588
8	550	40	3	532,052
9	450	30	2	595,175
10	550	30	2	522,159
11	450	40	2	642,650
12	550	40	2	550,833
13	450	30	3	574,000
14	550	30	3	533,497
15	450	40	3	638,588
16	550	40	3	524,909

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Análisis de varianza para el área superficial

Tabla III-36. Análisis de varianza (ANOVA) variable respuesta área superficial

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	38214,2	5459,2	45,63	0,000
Lineal	3	34531,7	11510,6	96,21	0,000
Temperatura	1	25713,3	25713,3	214,92	0,000
Concentración	1	7479,8	7479,8	62,52	0,000
Tiempo	1	1338,6	1338,6	11,19	0,010
Interacciones de 2 términos	3	2507,4	835,8	6,99	0,013
Temperatura*Concentración	1	2389,5	2389,5	19,97	0,002
Temperatura*Tiempo	1	86,5	86,5	0,72	0,420
Concentración*Tiempo	1	31,3	31,3	0,26	0,623
Interacciones de 3 términos	1	1175,1	1175,1	9,82	0,014
Temperatura*Concentración*Tiempo	1	1175,1	1175,1	9,82	0,014
Error	8	957,1	119,6		
Total	15	39171,4			

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Los valores P de los factores e interacciones obtenidos de la tabla III-37 son inferiores al valor P 0,05 (valor de significancia) mismos que indican que estos factores e interacciones son muy influyentes para obtener una gran área superficial en los carbones activados de borras de café, en caso de que las interacciones del valor P superen el valor de 0,05 tienden a no ser significativas en el estudio. Como ser las interacciones temperatura*tiempo con un valor P 0,420 y concentración*tiempo con un valor P 0,623.

Se puede observar que el modelo tiene una significancia de P 0,000 lo cual indica que el modelo es correcto para el diseño factorial.

Tabla III-37. Resumen del modelo variable respuesta área superficial

S	R- cuadrado	R- cuadrado(ajustado)	R- cuadrado(pred)
10,9381	97,56%	95,42%	90,23%

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

El valor cuadrático ajustado es muy prometedor para predecir la variable respuesta en posteriores experimentos.

Ecuación de regresión lineal variable respuesta área superficial

El modelo matemático para variable respuesta área superficial responde a la ecuación:

$$\text{Área superficial} = 3083 - 5,32 t - 55,5 C - 1245 T + 0,1225 t * C + 2,493 t * T + 33,7 C * T - 0,0686 t * C * T$$

Donde

t = Tiempo

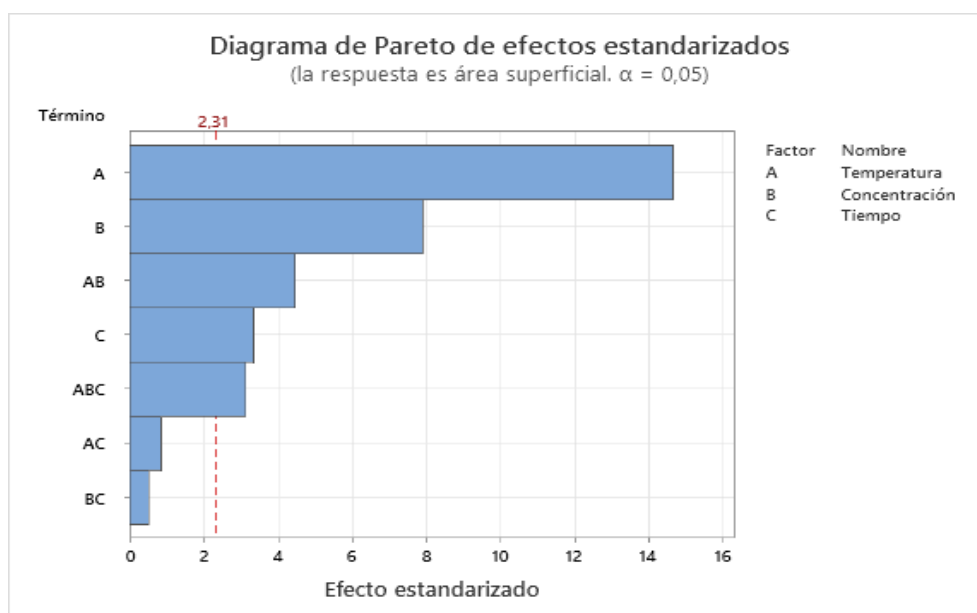
T= Temperatura

C= Concentración

Pareto de los efectos estandarizados para el área superficial

El diagrama de Pareto es una gráfica de barras que organiza valores, los cuales están separados por barras y organizados de mayor a menor, de izquierda a derecha respectivamente.

Gráfica III-2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el área superficial

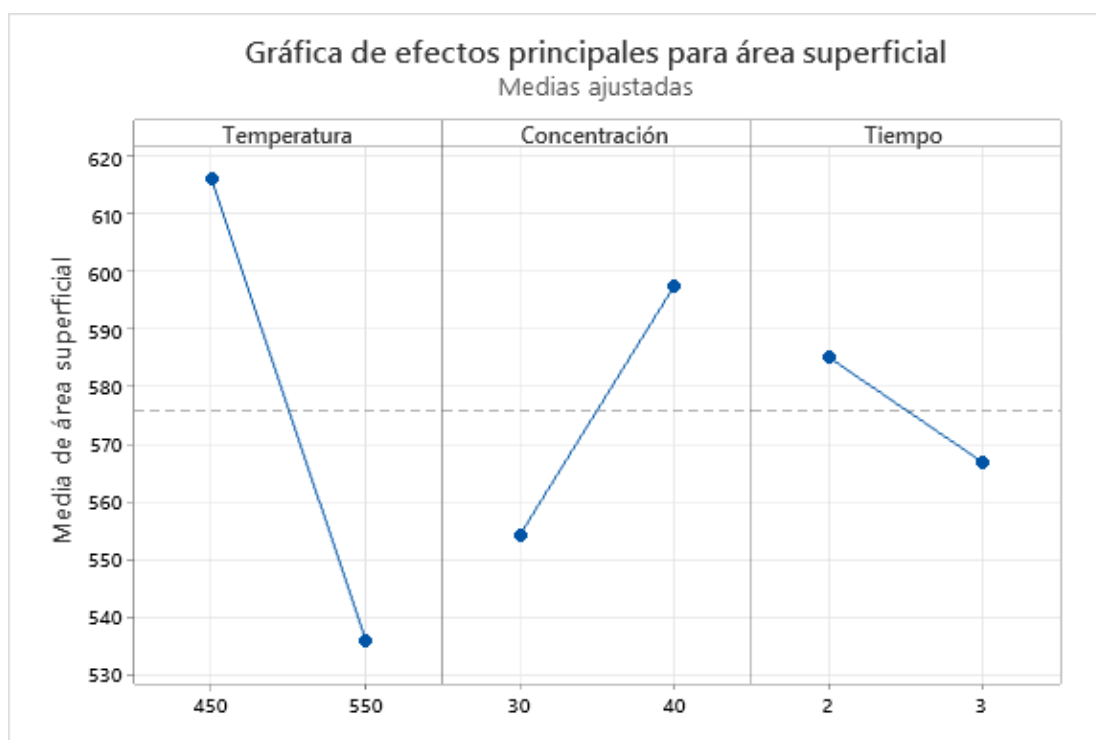


Fuente: Elaboración propia, Minitab 18

En la gráfica III-2 se detallan los factores más influyentes en los experimentos, cuando las barras sobrepasan la línea crítica (línea en el gráfico) los factores son significativos en el diseño. Como se puede observar en el experimento los factores A y B son los más significativos como también el factor C que apenas supera la línea crítica, las interacciones AB y ABC también son significativas, mas no así las interacciones existentes entre los factores AC y BC.

Gráficas factoriales para el área superficial

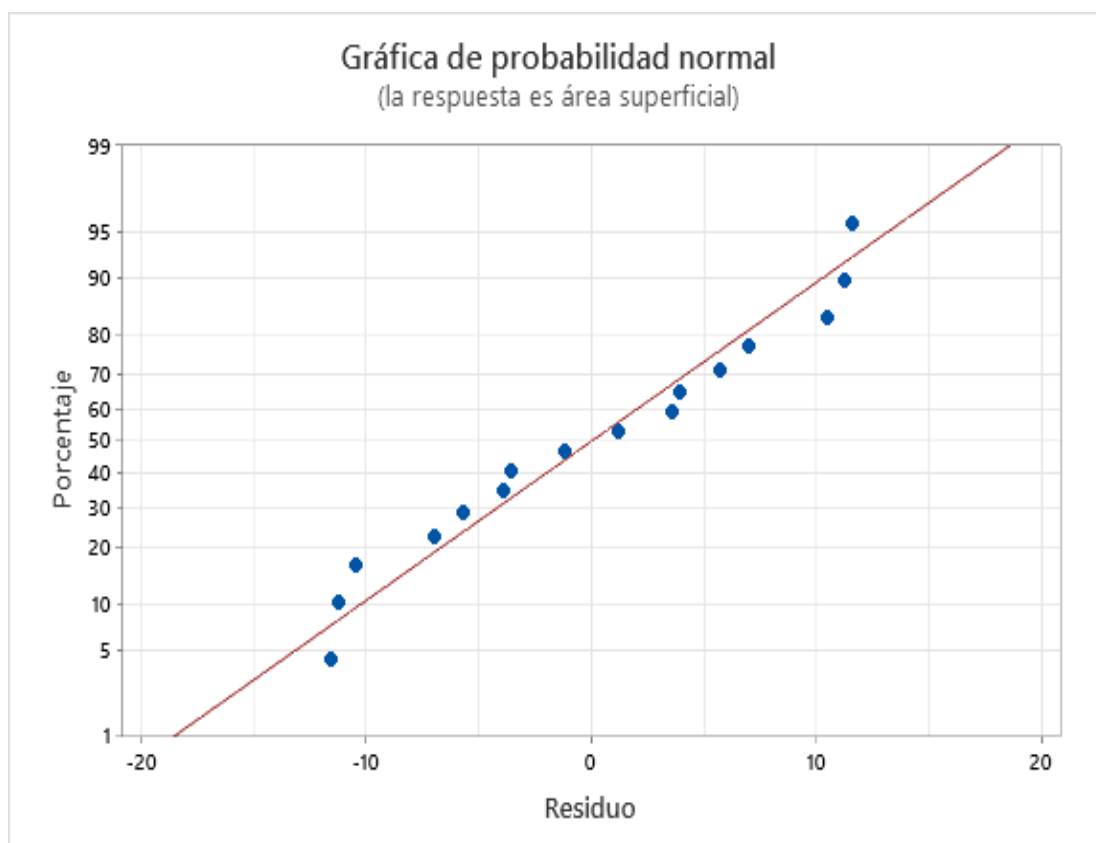
Gráfica III-3. Efectos principales para el Área Superficial



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la Gráfica III-3 se observa que los tres factores: tiempo, concentración y temperatura tienen efecto sobre la variable respuesta área superficial siendo mayor el efecto de la temperatura de carbonización, correspondiente al nivel alto (550 °C). A temperaturas bajas el área superficial es mayor. Con respecto a la concentración de ácido fosfórico alto (40%) se obtiene mayor área superficial y respecto al tiempo en el nivel bajo (2 hr) tiene efecto mayor sobre el área superficial.

Gráfica III-4. Probabilidad normal variable respuesta área superficial

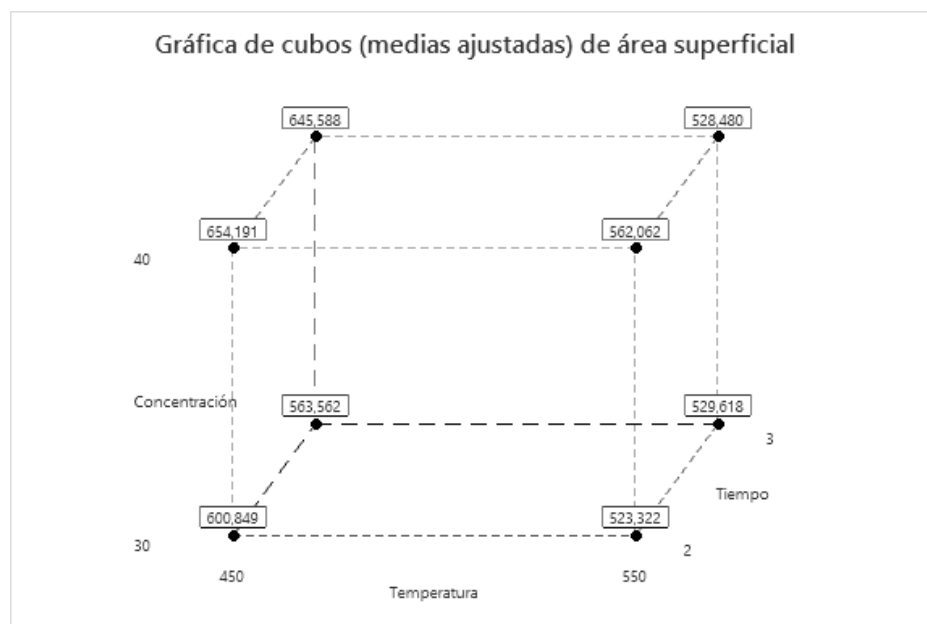


Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la gráfica III-4 se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo. Algunos puntos alejados de la línea implican una distribución con valores atípicos, sin embargo, según el análisis anova no muestra gran significancia el desajuste, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Según el modelo lineal; se obtiene un ajuste, el que a continuación se gráfica junto al área superficial que fue obtenido de cada experimento, para poder verificar el ajuste de la ecuación al modelo matemático.

Gráfica III-5. Gráfica de cubos (medidas ajustadas) del área superficial



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La Gráfica III-5 permite determinar los factores y en qué nivel da la mejor área superficial (m²/g), también se puede observar y determinar cuál es el peor tratamiento que se le puede dar a las borras de café pre carbonizada para tener un área superficial (m²/g) ineficiente.

Lo que se puede destacar para la obtención de un área superficial (m²/g) óptimo (vértice de mayor valor) 654.191 (m²/g) se debe impregnar la materia prima con un 40% de ácido fosfórico, otro factor que se debe tomar en cuenta es la temperatura de activación la cual para tener el valor óptimo es de 450 °C por un tiempo de nivel bajo de 2 horas.

3.1.5.2. Análisis estadístico de la variable respuesta porcentaje de remoción

Tabla III-38. Resumen del diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno

Factores:	3	Diseño de la base:	3:8
Corridas:	16	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Tabla III-39. Diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno

Muestra	Bloques	Temperatura	Concentración	Tiempo	% Remoción
1	1	450	30	2	85,287
2	1	550	30	2	83,501
3	1	450	40	2	89,529
4	1	550	40	2	83,947
5	1	450	30	3	84,394
6	1	550	30	3	83,724
7	1	450	40	3	85,510
8	1	550	40	3	84,394
9	1	450	30	2	85,064
10	1	550	30	2	84,171
11	1	450	40	2	89,306
12	1	550	40	2	84,617
13	1	450	30	3	84,840
14	1	550	30	3	84,394
15	1	450	40	3	85,287
16	1	550	40	3	84,840

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Tabla III-40. Análisis de varianza (ANOVA) variable respuesta % de remoción del azul de metileno

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	45,0120	6,4303	54,32	0,000
Lineal	3	28,3880	9,4627	79,93	0,000
Temperatura	1	15,2657	15,2657	128,95	0,000
Concentración	1	9,0847	9,0847	76,74	0,000
Tiempo	1	4,0376	4,0376	34,11	0,000
Interacciones de 2 términos	3	13,4338	4,4779	37,82	0,000
Temperatura*Concentración	1	4,0376	4,0376	34,11	0,000
Temperatura*Tiempo	1	6,5923	6,5923	55,68	0,000
Concentración*Tiempo	1	2,8039	2,8039	23,68	0,001
Interacciones de 3 términos	1	3,1902	3,1902	26,95	0,001
Temperatura*Concentración*Tiempo	1	3,1902	3,1902	26,95	0,001
Error	8	0,9471	0,1184		
Total	15	45,9591			

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Los valores P obtenidos de la tabla III-41 son inferiores al valor P 0,05 (valor de significancia) los cuales indican que estos factores e interacciones son muy influyentes para obtener un alto % de remoción del azul de metileno por los carbones activados a partir de las borras de café.

Tabla IV-41. Resumen del modelo variable respuesta % de remoción del azul de metileno

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,344074	97,94%	96,14%	91,76%

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Ecuación de regresión lineal variable respuesta % de remoción del azul de metileno

El modelo matemático para variable respuesta del % de remoción de azul de metileno responde a la ecuación:

$$\% \text{ de remoción del azul de metileno} = -81,8 + 0,2992 t + 6,039 C + 54,5 T - 0,01094 t * C - 0,0994 t * T - 1,954 C * T + 0,003572 t * C * T$$

Donde

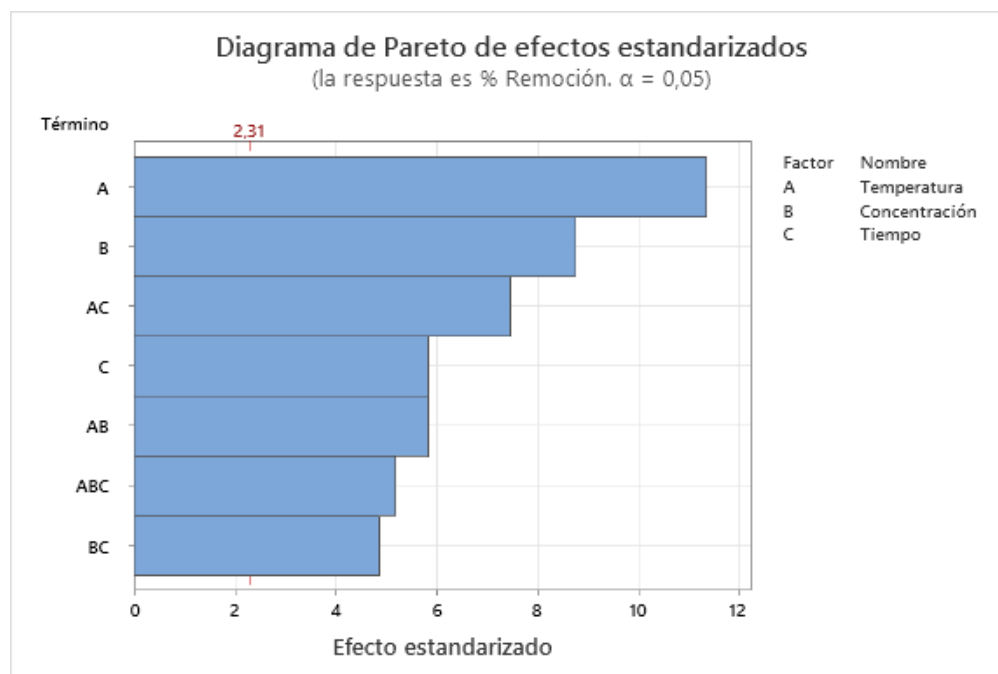
t = Tiempo

T= Temperatura

C= Concentración

Pareto de los efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno

Gráfica III-6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno

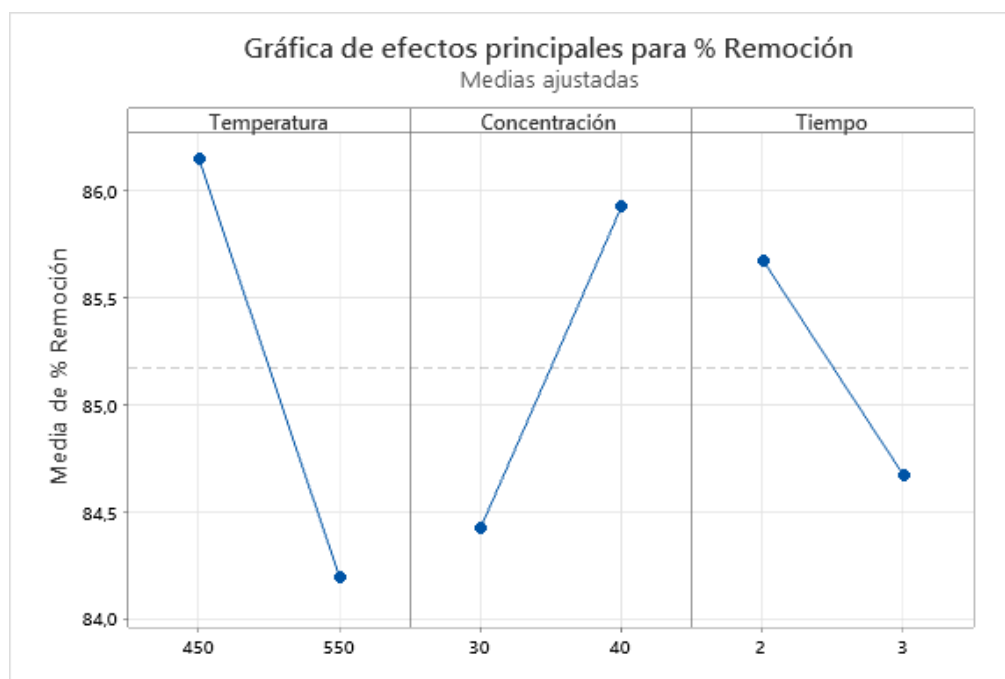


Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La gráfica III-6 muestra los factores influyentes en los experimentos del diseño factorial, estos factores son significativos en el diseño cuando las barras sobrepasan la línea crítica (línea en el gráfico).

Graficas factoriales para el % de remoción del azul de metileno

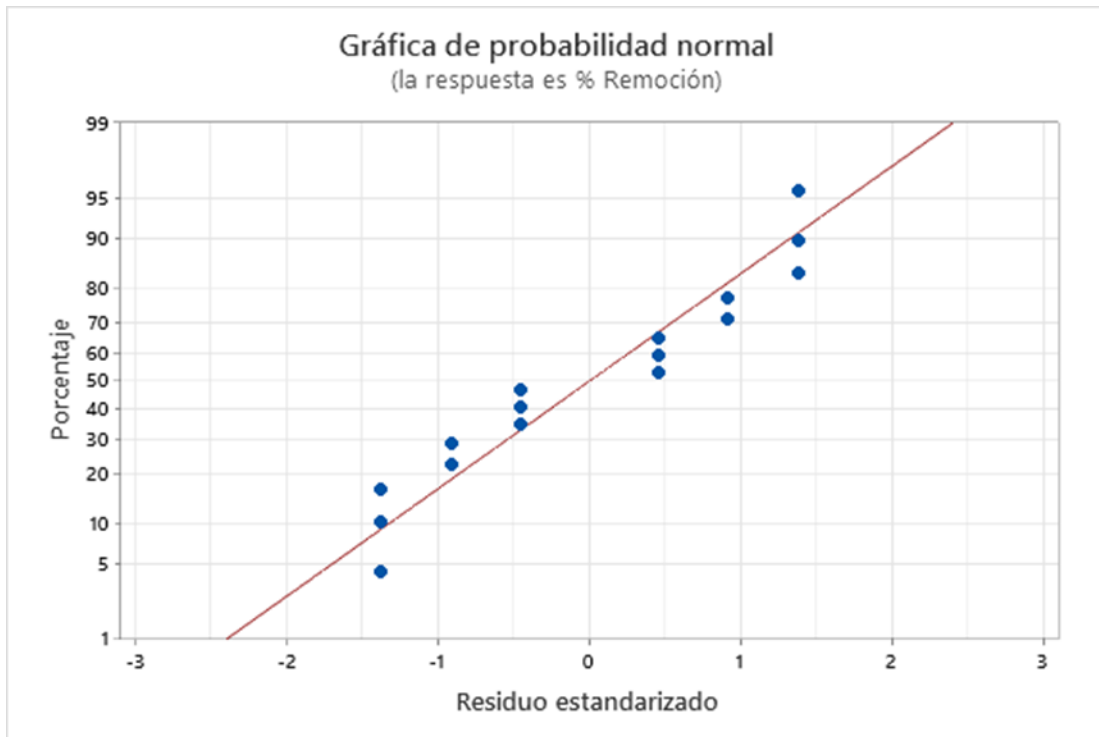
Gráfica III-7. Efectos principales del % de remoción del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La gráfica III-7 se observa que los tres factores: tiempo, concentración y temperatura tienen efecto sobre la variable respuesta % de remoción del azul de metileno, siendo mayor el efecto de la temperatura de carbonización, correspondiente al nivel bajo (450 °C). A temperaturas bajas el % de remoción del azul de metileno es mayor. Con respecto a la concentración de ácido fosfórico alto (40%) se obtiene un leve aumento del % de remoción del azul de metileno del carbón activado con respecto al nivel alto de la temperatura. Con el tiempo el nivel bajo (2 hr) tiene efecto mayor sobre el área superficial, pero en menor medida que los otros dos factores.

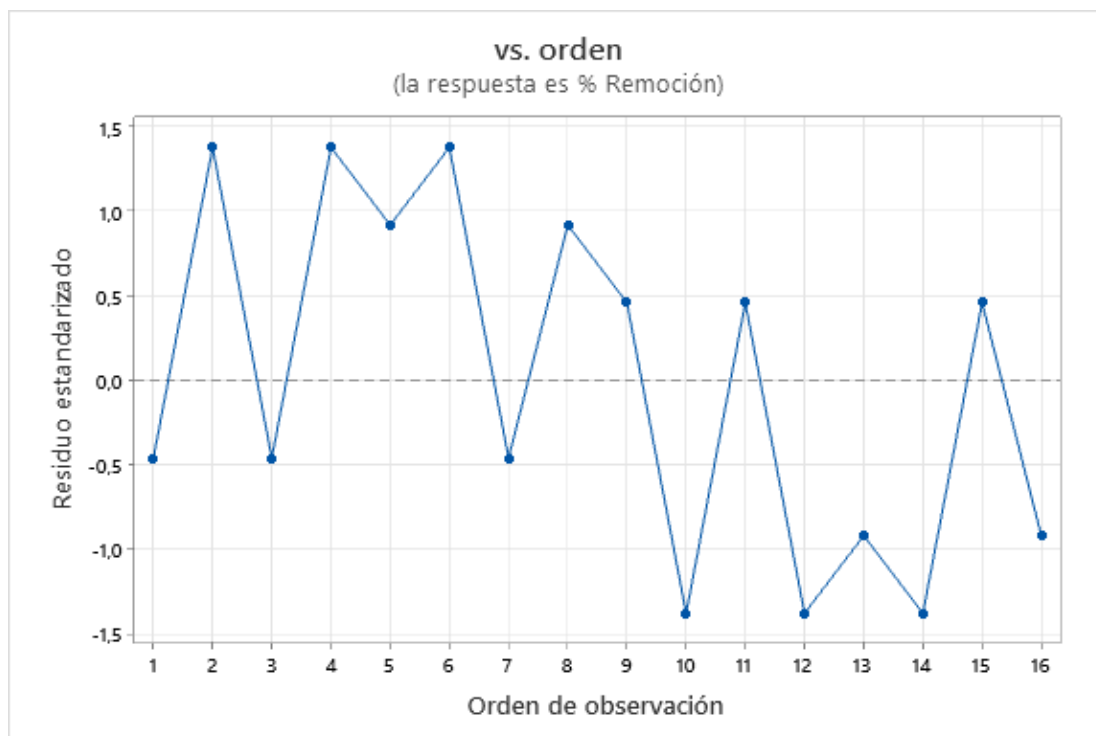
Gráfica III-8. Probabilidad normal variable respuesta para él% de remoción del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

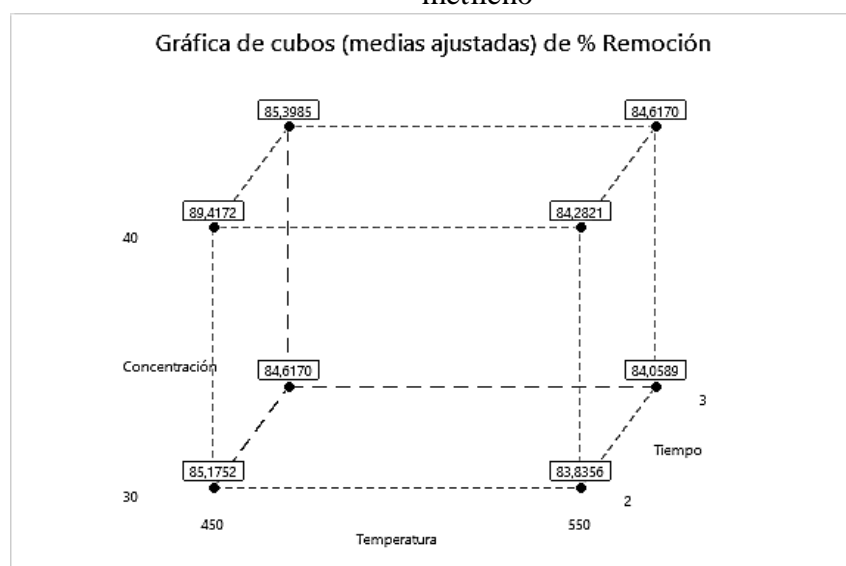
En la gráfica III-8 se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos alejados de la línea implican una distribución con valores atípicos, sin embargo, por lo que el modelo escogido es correcto.

Gráfica III-9. Residuo vs orden para el % de remoción del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

Gráfica III-10. Gráfica de cubos (medias ajustadas) del % de remoción del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La gráfica III-10 permite determinar los factores y en qué nivel da el mejor % de remoción del azul de metileno del carbón activado.

Lo que se puede destacar para la obtención de un % de remoción del azul de metileno del carbón activado óptimo (vértice de mayor valor) 89,4172 %, se debe impregnar la materia prima con un 40% de ácido fosfórico, otro factor que se debe tomar en cuenta es la temperatura de activación la cual para tener el valor óptimo es de 450 °C por un tiempo de nivel bajo de 2 horas.

3.1.6. COMPARACIÓN DE LA MEJOR MUESTRA DE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO CON UNO COMERCIAL

En la siguiente tabla se puede comparar las propiedades y características del carbón activado comercial de marca CLARIMEX y el mejor carbón activado obtenido el cual es la muestra 3.

Tabla III-42. Comparación entre Carbones Activados

Análisis	Carbón activado CLARIMEX	Muestra (CC40T550t2)
Índice de yodo	708,887 (mg/g)	554,191 (mg/g)
Masa adsorbida	0,748 (mg/g)	0,667 (mg/g)
% de remoción de Azul de Metileno	99,000 %	88,859 %
Área superficial	808,887 (m ² /g)	654,191 (m ² /g)

Fuente: Elaboración propia, 2021

Los valores de la muestra 3 de la tabla III-42 son los promedios del experimento y la réplica de los experimentos realizados.

Esta comparación sobre la caracterización de los carbones nos indica que el carbón activado comercial de marca Clarimex tiene mejores propiedades que el carbón activado obtenido por las borras de café; pero los resultados han sido próximos y dentro de los requisitos que un carbón activado puede tener. Para el índice de yodo lo establecido por la norma ASTM D-4607 es de 500 a 1200 mg/g, este es un parámetro fundamental ya que mientras más alto sea su valor, indica que tiene mayor porosidad. De acuerdo a diferentes vendedores y marcas, carbones activados con un índice de yodo superior a 700 son carbones de calidad superior, carbones activados con índice de yodo que esté entre 400 y 700 son carbones activados de *buena calidad*, carbones activados con índice de yodo entre 200 y 400 son de mala calidad y carbones con índice de yodo inferior a 200 son de muy mala calidad y/o que no son adsorbentes.

Estos resultados se encuentran dentro del parámetro establecido por la norma ASTM D-4607.

El porcentaje de remoción de azul de metileno indica la capacidad de adsorción de un carbón activo frente a moléculas grandes. En la tabla III-42 se puede observar que el porcentaje de remoción de azul de metileno tratado con carbón activado comercial (CLARIMEX) es de buena calidad ya que supera el 90% de remoción por lo que se puede asumir que este carbón activado posee una gran cantidad de mesoporos capaces de retener moléculas grandes, en cuanto al porcentaje de remoción del carbón activado obtenido de borras de café se tiene un 88.859%. El carbón activado obtenido presenta un valor cercano al 99%, lo cual indica que es de buena calidad. Estos resultados se encuentran dentro de los requisitos establecidos por la norma AWWA B600-78 ya que se puede considerar carbones activados con buena capacidad de adsorción que se encuentren a partir de un 50% de porcentaje de remoción de azul de metileno.

El área superficial es una de las principales características del carbón activado, mientras mayor sea esta sus propiedades adsorptivas mejoran. Los carbones activados presentan elevadas áreas superficiales del orden de 500 a 1200 m²/g de carbón, e incluso llegar a desarrollar áreas mayores hasta los 3000 m²/g estos parámetros se establecen por la norma ASTM D-3037. El carbón activado comercial tiene un área superficial de

808,887 m²/g mientras que el carbón activado obtenido posee un área superficial de 654,191 m²/g próximo al área superficial del carbón activado comercial. Por lo tanto, los resultados expuestos se encuentran dentro del parámetro establecido por la norma.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.2. CONCLUSIONES

De acuerdo a todo lo expuesto en el presente proyecto de investigación de obtención de carbón activado a partir de las borras de café, según los resultados obtenidos y objetivos planteados, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se logró obtener carbón activado realizando la caracterización de la materia prima permitiendo así el aprovechamiento de este residuo (borras de café), también se realizó la selección del método de obtención experimental el cual se realizó en base a la elaboración de una tabla con una puntuación de acuerdo a la escala de calificación Likert. Los métodos a evaluar fueron el método de activación física y química, obteniendo mayor puntaje de calificación el método de activación química ya que se determinó que este método es más aplicable de ejecutar en el laboratorio porque no requiere de altas temperaturas ni de equipos sofisticados.
- La caracterización fisicoquímica de la materia prima borras de café, se resume a continuación: Humedad 5,706 %, Ceniza 1,681 %, Materia Volátil 17,327 % y Carbón Fijo 80,992.
- Se optó por utilizar el ácido fosfórico como agente activante porque obtiene mayor eficiencia y su costo es relativamente menor, además de representar un impacto ambiental relativamente bajo en comparación con los distintos ácidos que se emplean en la activación química.
- Se determinó que las condiciones óptimas para la obtención de carbón activado a partir de las borras de café son a 450°C en la etapa de activación por un tiempo de 2 horas y una concentración del agente activante al 40% tiende a ser la mejor muestra, siendo esta la muestra 3 cuya relación Materia Prima/agente activante es de 1:3 en p/v. Estos parámetros nos indican que, a mayor concentración, mejor rendimiento del carbón activado, mejor área superficial y mejor capacidad de remoción.
- Los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación se realizaron de acuerdo a las normas Standard Test Method for Determination of Iodine Number

of Activated Carbon-**ASTM D-4607** y la American Water Works Association-**AWWA B 600-78**. El área superficial promedio que se obtuvo en función al índice de yodo es de 654,1909 m²/gr ya que mientras más alto sea su valor mayor es su porosidad por lo tanto mayor es el número de microporos lo que hace que tenga mejor capacidad de adsorción. En cuanto al % de remoción en función al índice de azul de metileno se tiene un 88,859 % de remoción por lo tanto el carbón activado obtenido es apto para la remoción de compuestos orgánicos y para el tratamiento de aguas.

- El rendimiento en masa promedio de la mejor muestra de carbón activado obtenido a partir de las borras de café es del 56,778 %, considerándose aceptable para la producción del mismo.
- Los cálculos matemáticos de la tabla Anova y el diagrama de Pareto demuestran que la temperatura es más significativa a diferencia de la concentración y tiempo. Por lo tanto, la producción de carbón activado mediante el método de activación química depende de la concentración del agente activante, tiempo del proceso de activación y temperatura de calcinación.

4.1.3. RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones se elaboran las siguientes recomendaciones:

- Para obtener una mejor impregnación y activación se recomienda realizar un secado a la materia prima, con el fin de permitir al agente activante, ocupar los poros desalojados por el agua evaporada.
- Se recomienda tomar una pequeña cantidad de muestra para establecer la temperatura y tiempo óptimo de carbonización, y así evitar que la muestra se calcine debido a que estos parámetros varían en las diferentes materias primas a utilizar.
- Utilizar Ácido Fosfórico de grado técnico-alimenticio al 85% es recomendable, ya que no es necesario un grado para análisis, además de que el costo del ácido fosfórico de grado técnico-alimenticio es menor en comparación con los demás agentes activantes.

- Debido al exceso de ácido que contiene el carbón activado obtenido se recomienda lavar varias veces el carbón activado con agua destilada e hidróxido de sodio 0,1N hasta que el pH sea neutro para luego secar el mismo.
- El trabajo de investigación realizado se puede utilizar como referencia para obtener carbón activado a escala industrial, tomando en cuenta la optimización de los procesos de impregnación y activación, así como también el tiempo de activación.
- Actualmente existe una gran cantidad de desechos agroindustriales, disponibles y de bajo costo que son desperdiciados es por eso que se recomienda realizar más estudios de investigación en cuanto a materias primas aptos para este fin.
- Se recomienda almacenar el carbón activado en frascos con doble tapa para evitar la humedad del mismo ya que al ser un material adsorbente podría contaminarse y disminuir su capacidad de adsorción.