

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

En la antigüedad, los egipcios ya conocían algunas propiedades del carbón activado lo cual era utilizado para propósitos medicinales. Existen registros de su uso en la antigua India y Grecia, en Tebas (Grecia) se halló un papiro que data del año 1550 a.C. en el que se describe el uso de carbón vegetal como adsorbente para determinadas prácticas médicas. Por el año 400 a.C., Hipócrates (medico griego) recomendaba el uso de carbón vegetal para filtrar el agua eliminando así malos olores y sabores. En relación al tratamiento de agua con carbón activado, 450 años a.C. en los barcos fenicios utilizaban barriles con la madera parcialmente carbonizada por su cara interna para el almacenamiento de agua.

Las propiedades adsorptivas fueron investigadas por primera vez en 1773 por el químico Karl Wilhelm Scheele, quien analizó la capacidad de adsorción de diversos gases por carbonizados logrados a partir de diferentes materias primas.

Luego Lowitz, realizó experimentaciones donde demostró la capacidad de los carbones para decoloración de disoluciones acuosas. En el siglo XIX se aplicó originalmente este material para refinación del azúcar (Young & Crowell, 1962). El estudio de mayor relevancia fue el realizado por Ostrejko en 1900, que aplicó el proceso de activación a los carbonizados, promoviendo así la producción de los CA a nivel industrial. Ostrejko empleó para la activación cloruros metálicos o gases como dióxido de carbono y vapor de agua. Entre 1914 y 1918, durante la primera guerra mundial, se avanzó logrando CA capaces de proteger a los soldados de los gases tóxicos, evolucionando hasta el desarrollo de las máscaras antigases.

La Revolución Industrial trajo aparejada el incremento en el uso de los CA y se diversificaron aún más sus aplicaciones, tales como potabilización del agua, en la industria farmacéutica y química y como catalizador, en sistemas de control de contaminación en industrias y automotores, por sus propiedades eléctricas en electrodos de baterías y en la actualidad en dispositivos de almacenamiento de energía (supercondensadores) y de gases tales como metano, hidrógeno y dióxido de carbono. (Catamarca, 2022).

En 2009 Zenteno, W. trabajó en la “OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVO A PARTIR DE RESIDUOS DE LA MADERA” concluyó que, durante la elaboración del presente trabajo de investigación, se logró determinar las variables de mayor incidencia en las diferentes etapas del proceso de obtención del carbón activo por el método de activación química.

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

En 2021 Mamani A. Trabajo en la investigación OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE NARANJA, VARIEDAD CRIOLLA (*Citrus Sinensis L. Osb*), CULTIVADA EN LA PROVINCIA ARCE (DEPARTAMENTO DE TARIJA) Concluyó que es posible obtener carbón activado de cáscara de naranja, variedad criolla con un proceso de activación química con ácido fosfórico.

Carbón activado

El carbón activado es un material adsorbente de origen artificial, caracterizado por su elevada porosidad y una extensa superficie que oscila entre 500 y 1500 m²/g. Estas propiedades, combinadas con la naturaleza química de sus átomos de carbono, le confieren la capacidad de atraer y retener una amplia gama de moléculas presentes en fluidos circundantes. Este fenómeno se conoce como "adsorción".

El Carbón activado puede ser obtenido a partir de cualquier material que tenga un alto contenido de carbono y baja proporción de material inorgánico. El carbón activado se utiliza en una amplia gama de aplicaciones para usos industriales y residenciales que incluyen la purificación de agua potable, tratamiento de aguas municipales, emisiones de plantas de energía y vertederos, recuperación de metales preciosos, etc. Es por ello que la demanda de carbón activado ha aumentado, el consumo de carbón activado está creciendo a una tasa entre 1% y 5% por año. Los principales actores que operan en la industria mundial del carbón activado se muestran en el cuadro I.

Cuadro I. Empresas productoras de carbón activado para 2022

N	NOMBRE DE LA EMPRESA	PAÍS
1	CARBÓN CALGON	EE-UU
2	CARBÓN ACTIVADO NORIT	PAÍSES BAJOS
3	CARBÓN ACTIVADO HUAMEI	CHINA
3	CARBÓN DE DONAU	ALEMANIA
4	HAYCARB	INDONESIA
5	ACTIVE GLOBAL INCORPORATION	INDIA
6	CARBONOS JACOBI	SUECIA
7	DESCOTEC	BÉLGICA
8	CARBÓN ACTIVADO CPL	REINO UNIDO

Fuente: (Huamei, 2022)

El mercado mundial de carbono activado se valoró en más de USD 3.000 millones en 2015 y se prevé que la creciente conciencia del consumo de agua limpia junto con el aumento del número de plantas de tratamiento de agua beneficie el crecimiento general del mercado de carbón activado. Un informe reciente de Research and Markets estimó que para 2023, se esperó que el mercado mundial de carbón activado alcance los 6.200 millones de dólares, frente a los 3.000 millones de dólares en 2015, ya que este producto versátil es muy útil en las industrias. Debido a su versatilidad y demanda existen países que se dedican a la producción de carbón activado. (Martínez, 2018)

Principales productores

El consumo de carbón activado experimenta un crecimiento constante a nivel mundial, con una tasa anual estimada entre el 1% y el 5%. Si bien este crecimiento es significativo en mercados consolidados como Estados Unidos, Europa y Japón, se observa una aceleración aún mayor en los países en desarrollo, impulsada por la creciente demanda en aplicaciones ambientales y de purificación.

En Estados Unidos, Calgon Carbon Corporation lidera el mercado con una capacidad de producción que representa aproximadamente el 42% del total

nacional. La empresa emplea principalmente la activación térmica, utilizando precursores como carbones bituminosos, cáscara de coco y carbón vegetal. Norit Americas se posiciona como el segundo mayor productor, con un 23% de la capacidad, utilizando lignito y carbón bituminoso, y aplicando tanto la activación térmica como la química (con ácido fosfórico).

En Europa Occidental, Norit , con plantas en los Países Bajos y el Reino Unido, domina el mercado con casi el 50% de la capacidad de producción. La empresa utiliza turba para la activación térmica y serrín para la activación química (con ácido fosfórico).

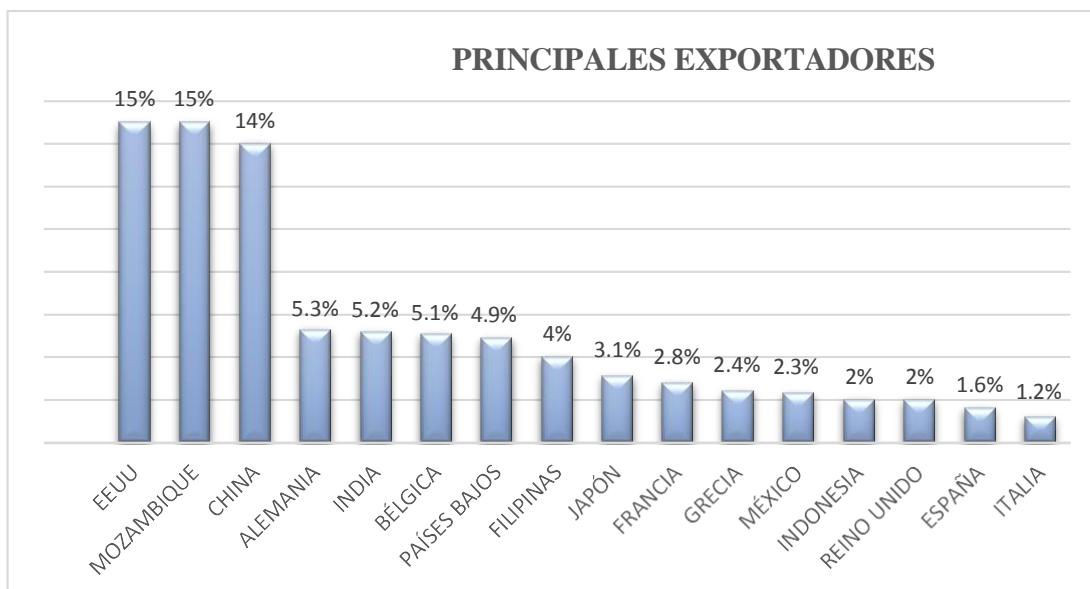
Comercio internacional de carbón activado

El mercado global de carbón activado presenta una dinámica comercial significativa, con flujos de exportación e importación concentrados en un número selecto de países.

Los principales exportadores de este producto son: Estados Unidos (441 millones de dólares), Mozambique (428 millones de dólares), China (409 millones de dólares), Alemania (154 millones de dólares), India (152 millones de dólares).

La distribución porcentual de estos flujos comerciales se detalla en la tabla I.

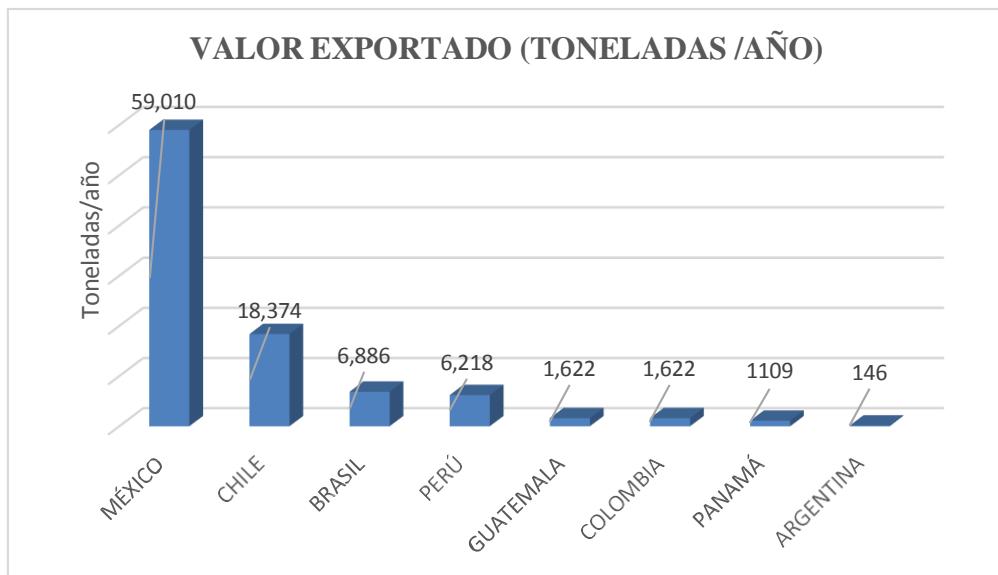
Tabla I. Principales exportadores de carbón activado a nivel mundial (2022)



Fuente: (Martínez, 2018)

En cuanto a los principales exportadores de carbón activado en Latinoamérica, se detallan en la tabla II.

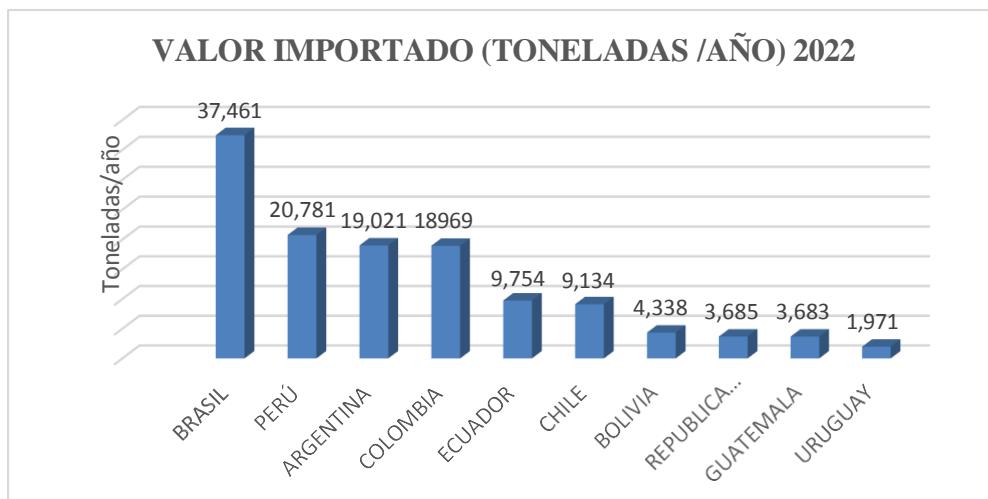
Tabla II. Principales exportadores de carbón activado en Latinoamérica (2021-2022)



Fuente: (ITC, 2019) Elaboración propia

Siendo México el principal exportador de carbón activado en Latinoamérica, ocupando el decimosegundo lugar a nivel mundial de exportadores. En cuanto a los principales importadores de carbón activado en Latinoamérica se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Principales importadores de carbón activado en Latinoamérica



Fuente: (ITC, 2019) Elaboración propia

Importación y mercado del carbón activado en Bolivia

En el año 2022, Bolivia importó 4338 toneladas de carbón activado, posicionándose como el séptimo mayor importador en Latinoamérica y el número 73 a nivel mundial. Los principales proveedores de carbón activado para Bolivia son Perú, Estados Unidos, Chile y México, según datos de (Datawheel, 2022).

Actualmente, en Bolivia no se cuenta con industrias que se dediquen a la producción de carbón activado, todo el consumo de este producto es importado.

A nivel latinoamericano existen algunas plantas productoras de carbón activado, siendo México el mayor productor de la región donde las principales empresas son Clarimex (con plantas en México y Brasil), Carbonapelsa, y Carbotechnia. Específicamente, en el departamento de Tarija, no se registra la presencia de ninguna industria productora de carbón activado.

Aplicaciones del carbón activado

La industria del carbón activado tiene una alta relevancia, basada en sus numerosas aplicaciones relacionadas directamente con industrias de diversa índole como la alimentaria, farmacéutica, química, nuclear, petrolífera, de tratamiento de aguas de consumo y depuración de efluentes industriales y domésticos, tratamiento de aire y de gases entre otras. La industria alimentaria, química y farmacéutica, emplea aproximadamente el 40 % de la producción mundial de carbón activo.

Entre las aplicaciones de mayor demanda del carbón activo dentro de estos sectores cabe destacar:

- Potabilización del agua (Retiene plaguicidas, sustancias aceitosas o grasosas, detergentes, productos de desinfección, toxinas, colorantes, sustancias producidas por la descomposición productos alimenticios o de desechos de animales.)
- Tratamiento de aguas residuales
- Decoloración en la fabricación de azúcares (jarabe de caña y de maíz, etc.)
- Purificación de antibióticos, vitaminas y otros productos farmacéuticos.
- Mejora de propiedades organolépticas, color, sabor y olor de bebidas y

aceites comestibles. En general el proceso de adsorción/desorción tiene lugar en fase líquida y suele usarse tanto carbón activo granular como en polvo; el primero presenta la posibilidad de una regeneración relativamente fácil, mientras que el segundo se desecha una vez usado.

Las aplicaciones en fase gaseosa utilizan carbón activo granular, aunque también se está empezando a utilizar en polvo (especialmente en la eliminación de dioxinas y mercurio de los gases provenientes de las plantas de incineración), debido a la mejora que se produce en cuanto al contacto gas/sólido.

Algunos ejemplos destacables de aplicaciones en fase gas son:

- Recuperación de disolventes reactivos y co-productos (ej. monómeros de estireno y cloruro de vinilo)
- Separación de componentes gaseosos. máscaras de gas (para uso industrial y militar).
- Almacenamiento y transporte de gases combustibles como, metano o hidrógeno, como aplicación emergente.

Mercado consumidor

El carbón activado, gracias a sus propiedades únicas de adsorción, se posiciona en el mercado como un insumo clave con una amplia gama de aplicaciones, lo que se traduce en un diversificado grupo de potenciales clientes. Si bien su utilidad abarca múltiples sectores, un segmento de mercado particularmente relevante y en crecimiento son las industrias que buscan activamente reducir sus índices de contaminación.

Las industrias no están usando carbón activado para controlar la contaminación por casualidad. Lo hacen porque hay una creciente y seria necesidad de reducir su impacto ambiental respondiendo a una creciente presión por la sostenibilidad ambiental, tanto por parte de las regulaciones gubernamentales como por la demanda de los consumidores por productos y procesos más ecológicos. Las empresas buscan soluciones eficientes para tratar sus efluentes líquidos y gaseosos, y el carbón activado ofrece una opción efectiva para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, olores y colores.

En el cuadro II se muestra los potenciales consumidores de carbón activado en Bolivia.

Cuadro II. Principales consumidores de carbón activado en Bolivia

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

(Mamani, 2021)

Producción de nuez en Bolivia

Tarija se consolida como el principal departamento productor de nuez en Bolivia, gracias a sus condiciones climáticas excepcionales. El Valle Central de Tarija, que abarca los municipios de Méndez, Uriondo y Padcaya, y la región de Paicho y Sella, se destacan como los núcleos principales de producción. Esta región valluna, con su clima andaluz, ofrece un entorno ideal para el cultivo de nogales.

La producción de nuez en Tarija se proyecta como la segunda actividad económica más importante del departamento, después de la viticultura. En el ámbito agroindustrial, el crecimiento sostenido de este sector tiene el potencial de convertir a la nuez en el segundo producto de mayor relevancia económica para la región.

Productores y agrónomos locales consideran que el cultivo de nuez es un motor clave para el desarrollo económico sostenible de Tarija. La región cuenta con más de 600 hectáreas dedicadas al cultivo de nogales, lo que la posiciona como un actor importante en el mercado nacional. Aunque Argentina y Chile son los principales proveedores de nuez en Bolivia, cubriendo el 60% de la demanda, Tarija aporta el 40% restante. El rendimiento promedio de los nogales en Tarija oscila entre 70 y 80 kg por planta al año, lo que evidencia un alto potencial productivo.

Tarija alberga una rica diversidad de variedades de nogales, incluyendo:

- Variedades introducidas: Regia (originaria de Europa), Albina mejorada, Serr y Chandler (variedades californianas).
- Variedades nativas: Australis, Bolivarensis , Nigra.
- Variedades mejoradas por el INIAF: Argentina INTA, Trompito Choya, Davis y Tulare.

Esta diversidad genética, combinada con las condiciones agroecológicas favorables, posiciona a Tarija como un centro estratégico para la producción de nuez en Bolivia (Patiño, 2019)

OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICO.

Objetivo general

- Obtener carbón activado experimentalmente a partir de la cáscara de nuez (*Junglans regia*).

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la materia prima determinando el contenido de humedad y cenizas.
- Analizar y seleccionar el proceso tecnológico industrial de obtención de carbón activado de cáscara de nuez (*Junglans regia*).
- Obtener carbón activado por medio de activación química.
- Seleccionar los parámetros óptimos para la obtención del carbón activado a partir de la cáscara de nuez (*Junglans regia*).

- Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de obtención de carbón activado de cáscara de nuez (*Junglans regia*) con las siguientes pruebas experimentales: porcentaje de remoción del índice de azul de metileno, índice de yodo, área superficial en función al índice de yodo.
- Determinar el rendimiento de la parte experimental de obtención de carbón activado de la cáscara de nuez (*Junglans regia*).
- Evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado en una muestra de agua.

JUSTIFICACIÓN

Justificación Económica

La producción de carbón activado a partir de cáscara de nuez representa una oportunidad económica significativa al aprovechar un residuo orgánico abundante y subutilizado. Estudios previos han demostrado que la cáscara de nuez es una materia prima secundaria valiosa, con un peso aproximado del 50% de la fruta, lo que la hace ideal para la producción de carbón activado.

En Bolivia, Tarija se destaca como el principal productor de nuez, con una producción anual estimada de 50 toneladas. El aprovechamiento de este residuo no solo generará una demanda adicional para la producción de nuez, sino que también agregará valor a un material que actualmente se considera desecho. Al transformar la cáscara de nuez en carbón activado, se crea un producto con aplicaciones industriales y comerciales, lo que puede impulsar la economía local y regional. Además, al tratarse de un recurso renovable, se garantiza la sostenibilidad a largo plazo de esta actividad económica.

Justificación ambiental

Cuando las cáscaras de nuez se acumulan en basurales o se disponen de manera informal, la materia orgánica se descompone en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). Este proceso produce metano. Por otro lado, la exposición de estas cáscaras a la lluvia puede generar lixiviados. Estos líquidos, aunque no sean altamente tóxicos, pueden arrastrar materia orgánica y otros compuestos que alteran el pH del suelo y pueden llegar a cuerpos de agua superficiales o subterráneos,

impactando la calidad del agua y la biodiversidad de nuestros ríos y quebradas.

Este proyecto propone la producción de carbón activado a partir de cáscara de nuez como una solución sostenible para mitigar estos pequeños impactos ambientales. Al valorizar este residuo orgánico y transformarlo en un material con alta capacidad de adsorción, se reduce la cantidad de desechos en las corrientes hídricas.

Justificación social

La creciente demanda de carbón activado, tanto a nivel nacional como internacional, presenta una oportunidad significativa para el desarrollo industrial en Tarija.

La producción local de este material no solo impulsaría la economía regional, sino que también generaría empleo y diversificaría la base industrial del departamento. Además, la obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez aportaría valor agregado al sector agrícola, al convertir un residuo en un producto comercializable. Al mismo tiempo, el sector industrial se beneficiaría al contar con un material versátil y con múltiples aplicaciones, lo que podría estimular la innovación y el desarrollo de nuevas industrias en la región.

Justificación tecnológica

La producción de carbón activado a partir de cáscara de nuez se sustenta en tecnologías de fácil implementación y costos accesibles. Esto asegura la factibilidad del proyecto, permitiendo su desarrollo con los recursos disponibles en la región.

Justificación personal

La realización de este trabajo responde a los requerimientos para la obtención del grado académico, representando un paso crucial en mi desarrollo profesional. Mi motivación radica en generar un impacto positivo en el medio ambiente, mediante la transformación de un residuo en un producto de valor.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Carbón activado

El carbón activo es un adsorbente preparado a partir de materiales carbonosos que se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros, propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas.

Es un carbono inerte y micro-poroso con una gran superficie interna (desde 500 y hasta 1500 m²/g.). Esa superficie puede adsorber moléculas orgánicas de líquidos y de gases ya que las moléculas impuras se adhieren a esa superficie. (Garcia Ubeda, 2013)

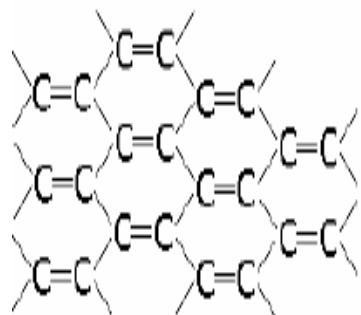
El carbón activado es un material carbonoso preparado por carbonización de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, que se ha sometido a un proceso de activación con gases oxidantes, o bien a un tratamiento con adición de productos químicos, con el objeto de aumentar su porosidad y desarrollar su superficie interna, lo que confiere a los carbones activados una alta capacidad adsorbente.

Un carbón activado está constituido por microcristales elementales, y lo componen estructuras bidimensionales de planos hexagonales de átomos de carbono, como se muestra en la Figura I-1, pero que carecen de orden cristalográfico en la dirección perpendicular a las láminas, es decir, los planos se encuentran desplazados unos respecto a otros y solapando entre sí, por lo que presentan un elevado porcentaje de la estructura altamente desordenada. De esta falta de orden les viene la denominación de “carbones no grafíticos” (Yuso, 2012).

La diferencia fundamental entre el carbón activo y el carbón mineral o vegetal radica en las superficies específicas de ambos. Este parámetro da una idea de la cantidad de poros internos, lo cual se traduce en sitios capaces de adsorber moléculas de interés.

Previo a su activación, el carbón posee una superficie aproximada de 50 m²/g. Sin embargo, al ser sometido al tratamiento adecuado, se pueden lograr incrementos en la superficie de hasta 50 veces el valor original. (Celiz, 2018).

Figura I-1. Estructura de un carbón activado.



Fuente: Yuso,2012.

Esta estructura del carbón activado, constituida por un conjunto irregular de capas de carbono con espacios producidos por los huecos creados por el plegamiento de las capas, es lo que constituye la porosidad. Esta estructura se muestra en la Figura I-2.

Figura I-2. Representación esquemática de la estructura de un carbón activado.



Fuente: Yuso,2012.

1.1.1. Estructura y Propiedades de los carbones activados

1.1.1.1. Propiedades químicas:

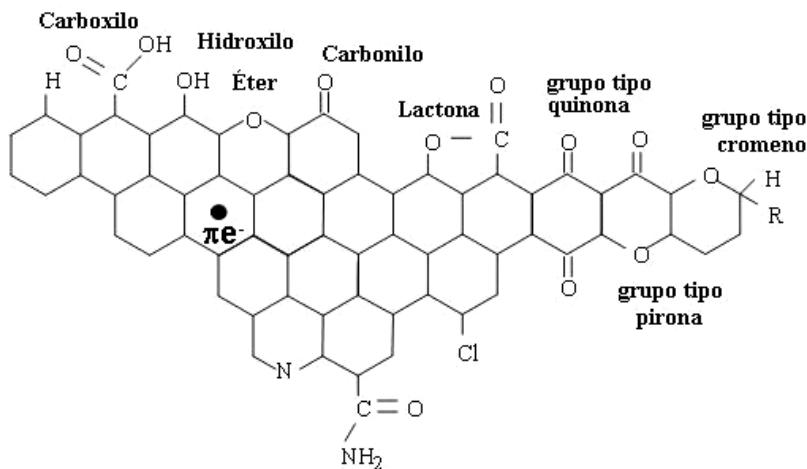
El carbón activado no sólo contiene carbono, sino también pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre e hidrógeno, que están unidos químicamente en forma de diversos grupos funcionales, tales como carbonilo, carboxilo, fenol, lactona, quinona, y grupos éter. Estos óxidos superficiales a veces se derivan de la materia prima o que se pueden formar durante o después del proceso de activación por la

acción del vapor de aire o agua. Todas las materias primas utilizadas para la producción de carbones activados contienen componentes minerales que se concentran durante el proceso de activación (Arrieta, 2016).

Las propiedades adsorbentes de los carbones activados no se ven sólo determinados por su estructura porosa sino también por su naturaleza química, ya que contienen en su estructura pequeñas cantidades de heteroátomos tales como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno, lo que da como resultado que sustancias polares sean retenidas sobre la superficie del carbón activado. Esto es debido a que los átomos de carbono situados en los bordes de los planos no están saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres. (Yuso, 2012)

En la Figura I-3 se muestran una representación esquemática de los grupos superficiales más importantes que pueden encontrarse en un carbón activado.

Figura I-3. Principales grupos funcionales presentes en la superficie de un carbón activado.



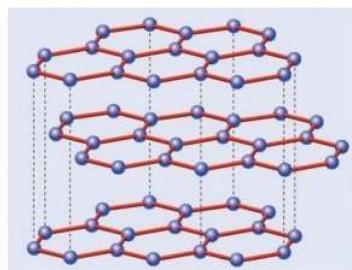
Fuente: Yuso, 2012.

La química superficial del carbón activado tiene una naturaleza anfótera debido a la coexistencia de grupos superficiales ácidos y básicos. Esto dependerá de la concentración de estos grupos y de la fuerza como ácido o base de los mismos. El contenido de heteroátomos también puede modificar las propiedades ácido-base de las disoluciones que se ponen en contacto con el carbón, o puede aumentar la acidez superficial. (Arrieta, 2016).

1.1.1.2. Estructura física

El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito, como se muestra en la figura I-4.

Figura I-4. Estructura cristalina del grafito.



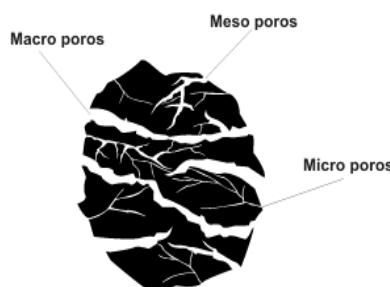
Fuente: CANALDA, José Carlos: “La sorprendente versatilidad del carbono(I). sus estados alotrópicos”.

Lo que diferencia al carbón activado del grafito es que su estructura no es perfecta, ya que las láminas tienen defectos en el reticulado, presentan sitios vacíos y pocas son paralelas y en breves extensiones.

Estas imperfecciones se traducen en la formación de la porosidad tan característica de este material. El tamaño y la cantidad de cada uno de los tipos de poros es lo que usualmente se denomina distribución de poros. Éstos se clasifican según su tamaño (figura I-5), definidos por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) en:

- Microporos: Diámetro de poro menor de 2 nm
- Mesoporos: Diámetro de poro entre 2 nm y 50 nm
- Macroporos: Diámetro de poro mayor de 50 nm

Figura I-5. Gránulo de carbón activado.



Fuente: Yuso,2012.

No todos los poros tienen la misma función en los materiales adsorbentes: tanto los macroporos como los mesoporos funcionan como vías de entrada y transporte de moléculas dentro de la estructura, mientras que los microporos constituyen los sitios donde se hace efectiva la mayor parte de la adsorción dentro del cuerpo del carbón activado. (Celiz, 2018)

1.2. Precursores para el Carbón Activado

Para obtener carbón activo se puede emplear como precursor cualquier material orgánico, debido al elevado contenido de carbono que presenta en su estructura. Los más empleados son los residuos agrícolas o forestales, productos de naturaleza lignocelulósica, como la madera, cáscara de nuez, de coco, de almendra, hueso de aceituna, etc. También se emplea antracita, carbones grasos, turba, huesos, lodos, plásticos, etc. La elección del precursor se realiza en función de su disponibilidad, precio y pureza. Es por este motivo que los desechos agroindustriales toman mayor fuerza como posibles materias primas para la preparación de carbón activado, ya que, al ser desechos que se descartan tienen bajo costo y disponibilidad. (Navarrete, 2017)

1.2.1. Propiedades de un Precursor

Los precursores lignocelulósicos se caracterizan a través de su contenido de humedad, de volátiles, de cenizas y de carbón fijo , donde se tiene que la humedad es el agua que retine el material intrínsecamente en condiciones normales, las cenizas son la fracción de materia inorgánica presente originalmente en el material, los volátiles la fracción de materia orgánica que se puede liberar por efectos térmicos y que están compuestos principalmente por la materia vegetal del precursor como lo son la lignina y la celulosa.

Finalmente, el contenido de carbón fijo que es el que conformara principalmente el carbón activado. A partir de estas características se define un buen precursor del cual se obtendrá un carbón de alta pureza, a aquel que cumpla con ser un sólido micro particulado con humedad <10%, cenizas entre 1 y 3% y porcentaje máximo de volátiles esperados de 60%.

En la Tabla I-1 se observan una recopilación de datos, donde se observan los porcentajes de carbono fijo, volátiles y cenizas de algunos desechos

agroindustriales. (Navarrete, 2017)

Tabla I-1 Propiedades de precursores agroindustriales

Precursor	Carbón fijo %	Volátiles %	Cenizas %
Madera suave	40-50	55-60	0,3-1,1
Madera Dura	40-42	55-60	0,3-1,2
Cáscara de Nuez	30-40	55-60	5-15%

Fuente: (Navarrete, 2017)

1.3. Métodos de Activación del Carbón Activado

1.3.1. Activación Física

La activación física se realiza en dos pasos que consiste en la carbonización de un material de alto contenido de carbón seguido de la activación del material resultante a una temperatura elevada en presencia de gases oxidantes. Algunos de los gases empleados son el dióxido de carbono, vapor de agua, aire o mezclas de ellos. El rango usual de temperaturas de carbonización es de 400 a 800 °C, mientras que el rango de temperatura de activación es de 600 a 900 °C.

La activación consiste en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción en las diferentes aplicaciones ya mencionadas. Normalmente se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización del precursor y la gasificación controlada del carbonizado.

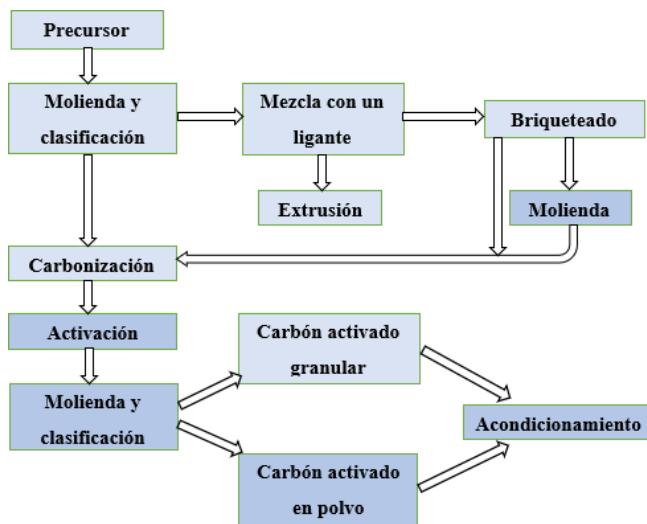
La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón en la cual se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor, para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 700°C.

En la activación el material sólido se expone a una atmósfera oxidante (oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de éstos) a temperaturas entre 800 y 1000 °C, que elimina los productos volátiles, aumentando el volumen de poros y la superficie específica al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. La carbonización y la

activación se realizan principalmente en hornos rotatorios construidos en acero inoxidable y materiales refractarios para soportar las altas temperaturas de activación, cercanas a 1000 °C. Cuando se utiliza como materia prima un material orgánico (ya sea, cáscara de coco, cuescos de frutas u otro), el proceso debe comenzar con la carbonización del material.

La figura I-6 muestra las etapas involucradas en la obtención de carbón activado mediante activación física (Camposano, 2015).

Figura I-6. Obtención de carbón activado



Fuente: Instituto Nacional del carbón, España

1.3.2. Activación Química

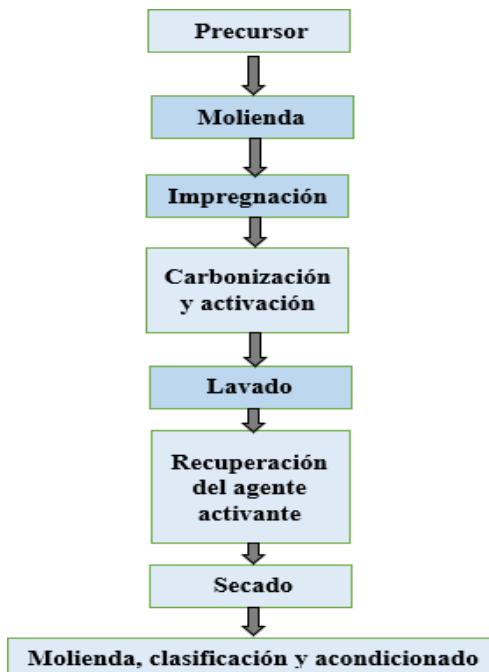
Este proceso implica la carbonización de la materia prima en presencia de agentes activantes como ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio.

La materia prima se impregna por agentes activantes químicos, la muestra se seca y se carboniza en atmósfera inerte a temperaturas que varían entre 400 °C a 700 °C. Se elimina el agente activante mediante lavado con agua. Los agentes activantes aumentan el tamaño de poro y la superficie del carbón activado. Por ello cuanto mayor sea el grado de impregnación, mayor será el tamaño de poro y la superficie del carbón activado final. Ante ello se puede afirmar que el mejor proceso para obtener carbón activados es por el proceso de activación química en comparación

del proceso de activación física, además de reducir el tiempo de proceso y necesitar temperaturas más bajas que en el proceso físico. (Bautista, 2022).

La Figura I-7, muestra la obtención de carbón activado a través de activación química.

Figura I-7. Obtención de carbón activado a través de activación Química.



Fuente: Instituto Nacional del carbón, España

1.4. Comparación de los mecanismos de los agentes activantes

Según (Bandosz, 2006) y (kwiatkowski, 2012) los agentes activantes más usuales, para la obtención de carbones activados comerciales son: ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio.

El ácido fosfórico, presenta algunas ventajas sobre otros insumos por ser menos tóxico y presenta una recuperación simple mediante el lavado con agua. También el ácido fosfórico H_3PO_4 reacciona con las especies orgánicas y se convierte en ésteres de fosfato y polifosfato, que funciona como puentes para unir las especies orgánicas entre sí y produce poros en la superficie del carbón activado. Conduciendo al carbón activado a obtener altos rendimientos de absorción y elevadas áreas superficiales.

El cloruro de zinc $ZnCl_2$ muestra algunas desventajas por la presencia de zinc residual en el carbón, es muy nocivo para el medio ambiente, corrosivo y presenta una recuperación química ineficiente. Con el $ZnCl_2$ los poros del carbón activado se forman mediante la degradación de la celulosa y la aromatización del esqueleto de carbono, el $ZnCl_2$ aumenta el rendimiento del carbón por descomposición del material carbonoso y restringe la formación del alquitrán a altas temperaturas dando lugar a microporos amplios, esto da como resultado una capacidad de adsorción ligeramente mayor y una porosidad más amplia que en el caso de la activación térmica.

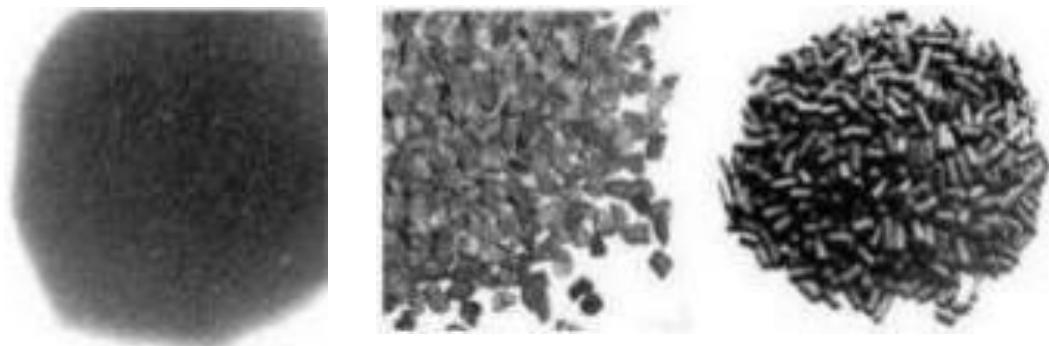
El hidróxido de potasio (KOH) también presenta algunas desventajas, por ser un agente químico corrosivo y costoso, pero obtienen carbones con buena área superficial. El mecanismo de activación del KOH es diferente al de H_3PO_4 y $ZnCl_2$, esta diferencia es debido a la participación de los mecanismos de gasificación en el proceso de formación de poros. Por el efecto de las reacciones de gasificación en la activación, este método necesita temperaturas mayores en comparación con los agentes activantes de H_3PO_4 y $ZnCl_2$.

El KOH reacciona con el esqueleto de carbono produciendo productos sólidos y gaseosos, al mismo tiempo se produce una quema de carbono que da lugar a la porosidad, desarrollando carbones de área superficial extremadamente alta. Estos agentes activantes presentan diferentes ventajas y desventajas, pero el agente activante que presenta menores desventajas además de proporcionar una buena área superficial del carbón activado y buen rendimiento de adsorción es el H_3PO_4 , este agente químico es muy utilizado para la obtención de carbón activado para uso en la industria farmacéutica y alimentaria (Bandosz, 2006) (kwiatkowski, 2012).

1.5. Clasificación del carbón activado

Los carbones activados pueden clasificarse de acuerdo al tamaño de las partículas, como lo muestra la Figura I-8.

Figura I-8. Tipos de carbones activados



Fuente: Martínez de Yuso, 2012.

I.5.1. Carbón activado granular (CAG)

El carbón activado granular consiste en gránulos de forma irregular que se instalan dentro de un recipiente por el que se hace circular el líquido o gas que va a tratarse. El carbón activado granular se fabrica en diversos tamaños. Por ejemplo, un 8x30 es un carbón cuyas partículas pasan por la malla 8 pero no por la 30.

La especificación de malla que se utiliza con mayor frecuencia es la estándar americana. El número de malla equivale al número de aberturas por pulgada lineal. Un carbón 8x30 tiene partículas de entre 0.595 y 2.38 mm. (Sonora, 2011).

La figura I-9 muestra la forma del carbón activado granular.

Figura I-9. Carbón Activado granular



Fuente: (Sonora, 2011)

Mientras menores son las partículas de carbón, trabajan con una rapidez sustancialmente mayor, aunque también causan una mayor caída de presión en el fluido tratado.

Lo primero se debe a que se acorta y se facilita el acceso del adsorbato a la superficie interna del carbón.

Para dar una idea del efecto que tiene el tamaño de partícula en la cinética de la adsorción, un carbón activado granular comercial tamaño 12x40 normalmente adsorbe con el doble de rapidez que uno 8x30. (Sonora, 2011)

1.5.2. Carbón activado en polvo (CAP)

El carbón activado en polvo se define como aquel carbón cuyas partículas pasan a través de la malla 50. Como ejemplo, el carbón activado en polvo para el tratamiento de agua según normas internacionales señala que 99 % debe pasar por la malla 100, 95, 80 % debe pasar por la malla 200 y 90% la malla 325.

Este rango de tamaños corresponde aproximadamente al del talco (Sonora, 2011).

Figura I-10. Carbón Activado en polvo



Fuente: (Sonora, 2011)

Este tipo de carbón no puede emplearse en lechos fijos y por lo tanto no se utiliza 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, que normalmente es tipo prensa.

1.5.3. Carbón activado pelletizado

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

Los pellets suelen ser cilíndricos debido a que normalmente se producen por extrusión.

Su principal ventaja consiste en que causan una menor caída de presión que los carbones granulares, cosa que los hace muy útil en la purificación del aire y otros gases en los que existe una baja presión, también en ocasiones es aplicado en fase liquida.

Comercialmente se encuentran en diámetros de 0.8 a 5 mm, siendo el de 4 mm más común. (Sonora, 2011). La Figura I-11, muestra el carbón activado pelletizado.

Figura I-11. Carbón Activado pelletizado



Fuente: (Sonora, 2011)

1.6. Mecanismos de operación como adsorbente.

Es importante comprender el mecanismo de adsorción ya que permite predecir con cierto grado de aproximación el comportamiento del carbón activado en muchas de las aplicaciones que puede tener.

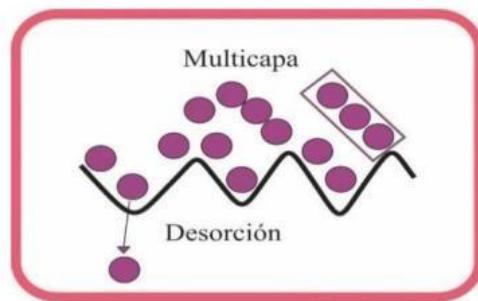
Existen dos tipos de fenómenos de adsorción: adsorción física o fisisorción y adsorción química o Quimi sorción. La diferencia entre ellas radica en el tipo de interacciones entre el adsorbente y el adsorbato.

En la adsorción física las interacciones predominantes son de tipo Van der Waals, mientras que en la adsorción química las interacciones semejan enlaces químicos. (Talanquer, 2018)

1.6.1. Adsorción física o Fisisorción:

Las moléculas del gas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas de Vander Waals (interacciones dipolares, dispersión y/o inducción).

Figura I-12. Adsorción Física

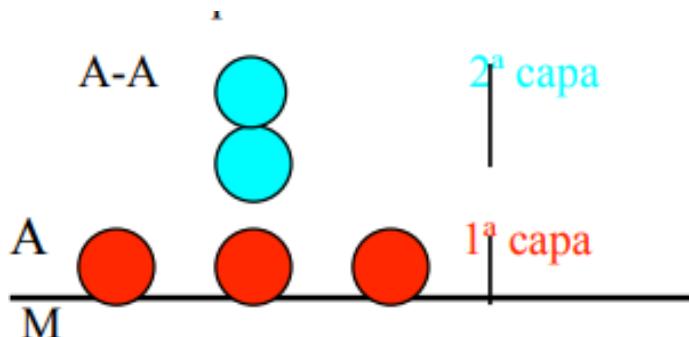


Fuente: Curso de Química Física Avanzada, Universidad de Valencia.

Este hecho define todas las características propias de la fisisorción:

- Es una interacción débil.
- Es un proceso exotérmico (las fuerzas de Van der Waals son atractivas) en el que los calores liberados, ΔH_{ads} (Delta H de adsorción) es negativo. El valor aproximado (20-40 kJ/mol) indica la magnitud de la energía liberada por mol de adsorbato adsorbido. son semejantes a las entalpías de condensación de la sustancia adsorbida.
- La molécula fisisorbida mantiene su identidad ya que la energía es insuficiente para romper el enlace, aunque su geometría puede estar distorsionada.
- La fisisorción es un proceso no específico ya que las fuerzas que intervienen no lo son y no existe una selectividad marcada entre adsorbato y adsorbente. En general, los gases muy polarizables son adsorbidos más fácilmente.
- La fisisorción se produce en multicapas. Sobre una capa de gas fisisorbida puede adsorberse otra. La ΔH_{ads} (Delta H de adsorción para la primera capa) viene determinada por las fuerzas entre adsorbente (M) y adsorbato (A), mientras que la ΔH_{ads} para las capas siguientes depende de las interacciones A- A por lo tanto es similar a la entalpía de condensación. (Valencia, 2010)

Figura I-13. Fisisorción en multicapas

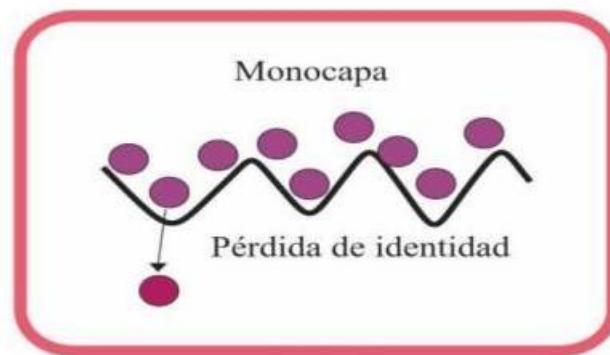


Fuente: Curso de Química Física Avanzada, Universidad de Valencia

1.6.2. Adsorción Química o Quimisorción

Fue propuesta por Langmuir en 1916. En este caso las moléculas de gas se mantienen unidas a la superficie formando un enlace químico fuerte. (Castañeda, 2021).

Figura I-14. Adsorción Química



Fuente: Curso de Química Física Avanzada, Universidad de Valencia

Este hecho define las características propias de la quimisorción:

- Se trata de una interacción más fuerte que la fisisorción.
- Las entalpías de quimisorción son mucho mayores que las de fisisorción y del orden de las que se liberan en la formación de enlaces químicos, ΔH°_{ads} (Delta H estándar de adsorción) = (-100-500) kJ/mol. El superíndice "°" indica que se refiere a condiciones estándar (generalmente 1 bar de presión)

y una temperatura específica, aunque esta última puede variar según la convención). El valor negativo (-100 a -500 kJ/mol) indica que la quimisorción es un proceso exotérmico, es decir, libera una cantidad significativa de calor debido a la formación de enlaces químicos fuertes. Si en la quimisorción se produce formación y rotura de enlaces podrían esperarse valores de $\Delta H^\circ_{\text{ads}}$ tanto positivos como negativos (al igual que en las reacciones químicas ordinarias). Sin embargo, la quimisorción es exotérmica normalmente.

- La quimisorción es específica.
- Dado que implica la formación de un enlace entre adsorbato y el adsorbente, el proceso se detiene tras la formación de una monocapa sobre la superficie. Aunque sólo una capa puede estar quimisorbida puede producirse adsorción física de nuevas capas de adsorbato sobre la primera.
- En general, la quimisorción implica la rotura y formación de enlaces, por lo que la molécula quimisorbida no mantiene la misma estructura electrónica (enlaces) que en fase gaseosa. (Valencia, 2010)

1.7 Caracterización del carbón activado

1.7.1 Número de yodo y área superficial

El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activado. Esto se debe a que el yodo se adsorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Por lo tanto, la cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área del carbón.

El número de yodo, que se expresa en mg/g miligramos de yodo adsorbidos por gramos de carbón, tiene un valor aproximadamente igual al del área superficial obtenida por el método BET de adsorción de N₂, expresada en m²/g.

El índice de yodo suele ser utilizada como la principal herramienta de control de calidad en la producción de carbón activado y como método de evaluación. Por otro lado, el número de yodo disminuye en proporción al grado de saturación del carbón activado, por lo tanto, este parámetro puede utilizarse para estimar el tiempo de vida

útil que resta a un carbón en uso. (Ramírez Guerra, 2009)

1.7.2. Valor del azul de metileno del carbón activado

El valor del azul de metileno se utiliza habitualmente como indicador del rendimiento de los carbones activados en aplicaciones de adsorción en fase líquida, midiendo la capacidad del carbón activado para adsorber el colorante específico azul de metileno.

Permite comparar la capacidad de adsorción y la capacidad de decoloración del carbón activado, especialmente en la eliminación de compuestos orgánicos y colorantes del agua y otros líquidos. (Zhulin, 2023).

1.7.3. Densidad aparente

Es el peso en g/cm³ de carbón totalmente seco en aire. Es decir, incluye el volumen de los poros y el de los espacios entre las partículas de carbón. Esta variable es la base para determinar el volumen necesario para contener una determinada masa de carbón activado granular. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesario para lograr un buen retro lavado del carbón.

1.7.4. Contenido de cenizas totales

Son el residuo que queda después de calcar el carbón a 650 °C, hasta llegar a peso constante, y se expresan en términos de porcentaje en base seca. La cantidad y composición de las mismas puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado.

Es posible disminuir su presencia en el carbón mediante lavados con ácido, lo que se hace en el caso de procesos que se ven afectados por ellas. Como ejemplo está el carbón activado granular que se utiliza en la recuperación de solventes del aire. Al tener un menor contenido de cenizas, aumenta su temperatura de ignición, disminuyendo el riesgo de que ésta suceda, debido a que las cenizas son óxidos de sodio, potasio y de otros metales, que actúan como chispa y provocan la ignición de la cama de carbón saturado. (Ramírez Guerra, 2009).

1.8. Aplicaciones del Carbón Activado

El carbón activo es el adsorbente más versátil por su alta superficie específica,

distribución polimodal de tamaños de poro, estructura porosa en forma de rendija y por su capacidad de presentar diferentes tipos de naturaleza química en su superficie.

Las principales aplicaciones son: Recuperación de disolventes, control de las emisiones de vapores de gasolina, control de gases industriales, separación de gases, eliminación de olores en depuradoras de aguas residuales, Soporte de catalizadores. También se utiliza como filtro en tratamientos de olores, filtro de máscaras de gas protección de vías respiratorias, filtros de cigarrillos, etc.

Para sus aplicaciones en fase líquida, se pueden considerar los siguientes sectores:

1.8.1. Industria alimentaria, farmacéutica y química.

Debido a este sector se inició la industria del carbón activo a comienzos de este siglo. Hoy en día representa alrededor del 40% del total de la producción del carbón activo.

El proceso de purificación es la aplicación más importante dentro de este sector, de forma que entre otros usos se puede utilizar para:

- Decoloración de vinos y azucares.
- Purificación de antibióticos, Vitaminas y otros productos farmacéuticos.
- Eliminación de olores y colores de comidas y bebidas.

1.8.2. Tratamiento de aguas.

El consumo de carbones activos destinado a la aplicación de este sector supone un 40% total del mercado. El proceso de potabilización de aguas para el consumo humano supone un 20% del total, tanto en carbón activo granular como en polvo.

Históricamente, ha sido utilizado durante muchos años como agente para eliminar sabores y olores. También se utilizan carbones activos para purificar aguas subterráneas o de aljibes. En el tratamiento de aguas residuales, ya sean, municipales como industriales, el uso del carbón activo, está muy extendido.

Finalmente, aplicaciones de tratamiento de aguas como ser: limpieza de acuarios, Eliminación de sabores y olores, Tratamiento de piscinas, etc. (Garcia Ubeda, 2013).

En el cuadro I-1, nos muestra a detalle las principales aplicaciones industriales del carbón activado.

Cuadro I-1. Principales aplicaciones industriales del Carbón Activado.

Aplicaciones	Descripción
Tratamiento de Agua potable	Remoción de contaminantes orgánicos, clarificación, Agente para eliminar sabores y olores.
Industria alimentaria	Descolonización del vinagre, Decoloración de vinos y azucares, etc. Eliminación de olores y colores de comidas.
Producción de bebidas	Remoción de grasas, sabores indeseables, aldehídos y fenoles de brandy y la cerveza, etc
Tratamiento de aguas residuales industriales	Reducción de halógenos totales de la demanda biológica y química, eliminación de olores en depuradoras de aguas residuales
Industria Química	Recuperación de solventes orgánicos para reciclaje, control de emisiones de vapor, soporte para catalizar reacciones.
Industria farmacéutica	Purificación de antibióticos, Vitaminas y otros productos farmacéuticos,
Industria Hidrometalurgia	Recuperación de oro por proceso de carbón en pulpa, en lecho y en columna

Fuente: elaboración propia 2025.

1.9. Materia Prima: Nuez (*Juglans regia*)

1.9.1. Origen de la Nuez (*Juglans regia*)

La Nuez se remonta a 7000 a C. Los romanos llamaban nueces (*Juglans regia*), "bellota real de Júpiter".

La historia indica que las nueces inglesas provenían de la antigua Persia, donde estaban reservadas para la realeza.

La nuez es a menudo conocida como la "nuez persa", se intercambiaron a lo largo de la Ruta de la Seda entre Asia y el Medio Oriente. Las caravanas transportaban nueces a tierras lejanas y, finalmente, a través del comercio marítimo, extendieron la popularidad de la nuez en todo el mundo. Los marines mercantes ingleses transportaban el producto para comerciar en todo el mundo y se conocían como "nueces inglesas".

Hoy en día, el comercio de nueces sigue siendo un negocio bien establecido, ordenado y estructurado. (Tapia Rodríguez, 2021).

1.9.2. Taxonomía y morfología de la Nuez (*Juglans regia*)

Tabla I-2. Taxonomía de la nuez.

Nombre común:	Nogal
Nombre científico:	<i>Juglans Regia</i>
Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Fagales
Familia:	Juglandaceae
Género:	<i>Juglans</i>
Especie:	<i>J. Regia</i>

Fuente: (Tapia Rodríguez, 2021)

1.9.3. Variedades y Tipos de Nueces.

A parte de la *Junglans regia* existen variedades de nuez, las cuales son:

1.9.3.1. Nuez de Macadamia

Es una drupa globosa de hasta 3 cm de diámetro. El pericarpo es carnoso y el endocarpo lignificado, liso y duro, envuelve a una semilla de 1,5-2,5 cm de diámetro, comestible y rico en aceite (<70%). Se utiliza como alimento y con fines medicinales.

1.9.3.2. Nuez pecan

La nuez peca se consume principalmente al natural como aperitivo. Es un fruto seco que se conoce como ‘nuez americana’ la corteza o mesocarpio es leñoso, pero fino y fácil de romper cuando está maduro; la carne endocarpio es blanco y de sabor agradable, cubierto por una piel fina de color marrón oscuro.

1.9.3.3. Nuez de castilla

La semilla contiene hasta 50 % de aceite es un fruto seco de alto valor nutritivo: rico en proteínas, vitaminas del grupo B, vitamina C, oligoelementos, aceites vegetales, lecitina y ácidos grasos omega 3 (poliinsaturados).

1.9.3.4. Nuez de la India

La nuez de la India es el fruto de un árbol llamado *Aleurites moluccanus wild* (nombre científico), que crece en el sur de Asia, y que, además, es cultivada en algunos lugares como Brasil.

La nuez es redonda, de 4-6 cm de diámetro, la semilla se encuentra en el interior y tiene una capa muy dura y un alto contenido de aceite. (Benitez, 2022).

1.10 Cáscara de la nuez (*Junglans regia*)

Figura I-15. Cáscara de la nuez



Fuente: Agroquímicos Arca S, A de C.V.

La figura I-15, muestra la cáscara de nuez, este material lignocelulósico corresponde a un residuo sólido agrícola que deriva de la etapa de partido en el procesamiento de la nuez y representa entre el 50% del peso total de la nuez seca.

Se estima que la cáscara de nuez posee como componentes estructurales como ser la celulosa, hemicelulosa y lignina, por tanto, se trata de un material lignocelulósico.

La celulosa y hemicelulosa corresponden a polímeros naturales y la lignina, la segunda materia biológica más abundante en el mundo, a un hetero polímero, considerada como una de las moléculas responsables de otorgar mayor dureza a las maderas (Miranda, 2018).

La tabla I-3, muestra la composición en 100 gramos de la cáscara de nuez.

Tabla I-3. Composición cáscara de nuez (g/100 g de nuez)

Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Proteína %	Ceniza %
60,2	13,2	18,6	1,3	1,1

Fuente: Parodi Miranda D. (2018). Material compuesto a partir del residuo cáscara de nuez *Juglans regia*. RChD.

Otras características que se han estudiado indican que su densidad aparente corresponde a:

- 650 kg/m³
- Dureza es de 2,5 Mohs,
- pH neutro
- Peso específico es 1,25 kg/L
- Autoignición ocurre por encima de los 270°C

En cuanto a su descomposición, es biodegradable y al mantener la cáscara de nuez con humedad se torna de color verde a negro en un lapso no mayor a 6 meses, y así se puede realizar compostaje. (Miranda, 2018).

1.11. Ventajas del carbón activado a partir de cáscara de la nuez.

Gracias a la elevada porosidad del carbón vegetal a base de nuez, posee una gran capacidad de adsorción y es utilizada en la producción de carbón activado.

En el cuadro I-2 se muestra las ventajas del carbón activado a partir de la cáscara de nuez.

Cuadro I-2. Ventajas del carbón activado a partir de cáscara de la nuez.

Ventajas	Descripción
Alta capacidad de adsorción	Tiene una alta capacidad de adsorción debido a su gran superficie y estructura microporosa.
Bajo contenido de cenizas	Tiene un bajo contenido de cenizas, lo que significa que produce menos residuos y requiere reemplazos menos frecuentes.
Versátil	Se puede utilizar en una variedad de aplicaciones, como purificación de agua, procesamiento de alimentos y bebidas y más.
Económico	Es una solución rentable para muchas aplicaciones.

Fuente: (CNHOSEN, 2000)



CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materia prima.

la materia prima utilizada para la obtención de carbón activado fue la cáscara de nuez (*Juglans regia*), recolectada en la región de Sella Méndez, provincia Eustaquio Méndez, departamento de Tarija.

Estas nueces, conocidas localmente como variedad criolla, se caracterizan por su pequeño tamaño y su sabor intenso y agradable.

2.2. Descripción del método de investigación.

Para determinar el proceso tecnológico óptimo de producción del carbón activado, se consideraron dos alternativas: la activación química y la activación física.

Se optó por la elaboración de una matriz de decisión como herramienta fundamental para la selección del proceso más adecuado.

La evaluación comparativa de ambos métodos de activación se realizó mediante una tabla de calificación, utilizando la escala de Likert para asignar valores a los criterios relevantes.

La tabla II-1 presenta la ponderación asignada a cada factor evaluado, determinada en función de su relevancia relativa.

Tabla II-1. Escala de Calificación Likert

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

Fuente: Elaboración propia, 2025

A continuación, en la tabla II-2, se muestra los factores que se evaluaron para elegir el método de obtención del carbón activado a partir de cáscara de nuez.

Tabla II-2. Factores a evaluar

Factor evaluado	Detalle	calificación	calificación
		Activación física	Activación Química
Complejidad de operación del proceso	Se desea que la operación sea simple, flexible y confiable.	3	5
Aplicabilidad del proceso.	La activación física, exige temperaturas elevadas cercanas a los 1000 °C, se contrapone a la activación química, la cual se realiza a temperaturas que no superan los 700 °C. Esta diferencia es crucial para el proyecto, ya que el carbón activado será obtenido a escala de laboratorio.	3	4
Confiabilidad del proceso	La activación física implica el uso de gases a temperaturas muy elevadas. Mantener un control preciso de la temperatura y el flujo de gas en un entorno de laboratorio puede ser difícil y requiere equipos especializados.	2	5
Disponibilidad de equipos	Se dispone del equipamiento necesario para realizar el método de activación química.	2	5
Generación de residuos	En ambos métodos se genera residuos.	3	3
Resultados obtenidos	A escala de laboratorio, la activación química produce carbones activados con un rendimiento superior en comparación con la activación física. Esto se atribuye a la acción más intensa de los agentes químicos, que resulta en una superficie específica significativamente mayor, según lo reportado en bibliografía.	3	4

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla II-2 se ve la selección del método experimental de obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez, donde se califica los factores evaluados a cada método y se le asigna una puntuación del (1 al 5), para luego ser sumado y determinar cuál es el mejor método mediante el mayor porcentaje.

Donde:

A = Calificación.

Peso relativo (%) = Calificación del factor evaluado.

B = (A x Peso relativo (%)) /100%.

2.2.1. Selección del método de obtención de carbón activado

Tabla II-3. Selección del proceso de activación para la obtención

Experimental

Factores evaluados	Peso relativo (%)	Métodos de activación			
		Método de activación Física		Método de activación Química	
		A	B	A	B
Complejidad de operación del proceso	15	3	0,45	5	0,75
Aplicabilidad del proceso.	20	3	0,6	4	0,8
Confiabilidad del proceso	20	2	0,4	5	1
Disponibilidad de equipos.	10	2	0,2	4	0,4
Generación de residuos	15	3	0,45	3	0,45
Resultados obtenidos	20	3	0,6	4	0,8
Puntuación final	100		2,7		4,2

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla II-3, se observa que la activación química presenta mejores resultados en la mayoría de los factores evaluados, siendo los factores de confiabilidad del proceso, aplicabilidad del proceso y resultados obtenidos los que tienen mayor ponderación, y donde la activación química tiene una mayor diferencia con respecto

a la activación física. Por lo cual el método que se aplica es el de activación química porque obtuvo el mayor puntaje además de contar con las condiciones y equipos en laboratorio de operaciones unitarias (LOU) perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS) Tarija - Bolivia.

2.3. Diseño factorial

El presente proyecto se llevó a cabo mediante un diseño experimental factorial 2³, con el fin de evaluar la influencia de tres variables clave en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez (*Juglans regia*).

Estas variables son: temperatura de activación, concentración del activador y tiempo de activación. Cada variable se estudió en dos niveles: un nivel bajo (-) y un nivel alto (+).

2.3.1. Ecuación para el modelo

la ecuación para este modelo se muestra a continuación:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha y_{ik} + \beta y_{jk} + \alpha\beta y_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

μ = es la medida general del experimento.

α_i = es el efecto causado por el nivel i del factor de temperatura

β_j = es el efecto causado por el nivel j del tiempo.

γ_k = es el efecto causado por el nivel k de la concentración.

$\alpha\beta_{ij}$ = es el efecto causado por la interacción del nivel i de la temperatura y el nivel j del tiempo.

αy_{ik} = es el efecto causado por la interacción del nivel i de la temperatura y el nivel k de la concentración.

βy_{jk} = Es el efecto causado por la interacción del nivel de tiempo y la concentración.

$\alpha\beta y_{ijk}$ = Es el efecto causado por la interacción del nivel de temperatura, tiempo y concentración.

ε_{ijk} = Termino de error.

El proyecto se llevó a cabo utilizando un diseño factorial 2^3 , lo que resultó en un total de ocho experimentos, dado que se evaluaron tres variables a dos niveles cada una.

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ experimentos diferentes.}$$

Como se realizarán dos repeticiones, el número total de experimentos determinado es:

$$\text{Nº de experimentos} = 8 \times 2 = 16 \text{ experimentos}$$

2.3.2. Niveles de las variables

A continuación, en la tabla II-4, se presentan los niveles de las variables estudiadas en el proceso de obtención de carbón activado:

Tabla II-4. Niveles de las variables para la obtención de carbón activado.

Nivel	Temperatura °C	Concentración	Tiempo (horas)
Inferior (-)	300	40 %	1
Superior (+)	500	60 %	2

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.3.3. variables dependientes e independientes

La Tabla II-5 presenta las variables consideradas en el proyecto.

Tabla II-5. Tabla de variables

Variables	Descripción
Variables dependientes.	Área superficial en función del índice de yodo. % de remoción de azul de metileno.
Variables independientes	Temperatura de activación, (+, -) Tiempo de activación (+, -). Concentración del activador (+, -)

Fuente: Elaboración propia 2025.

2.3.4. Orden de los factores en el diseño experimental.

La Tabla II-6 muestra la secuencia de los factores en el diseño experimental aplicado al proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez.

Tabla II-6. Orden de los factores en el diseño experimental.

N	Factores			Respuesta
	Temperatura	Concentración	Tiempo	
1	300	40	1	Y1
2	300	40	2	Y2
3	300	60	1	Y3
4	300	60	2	Y4
5	500	40	1	Y5
6	500	40	2	Y6
7	500	60	1	Y7
8	500	60	2	Y8

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.3.5. Codificación de los experimentos

La tabla II-7, nos muestra la codificación de los experimentos donde se detalla la organización de los 8 experimentos. Los ocho experimentos están diseñados para evaluar diversas combinaciones de temperatura, concentración (40% - 60%) y tiempo (1 -2 horas) en el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez.

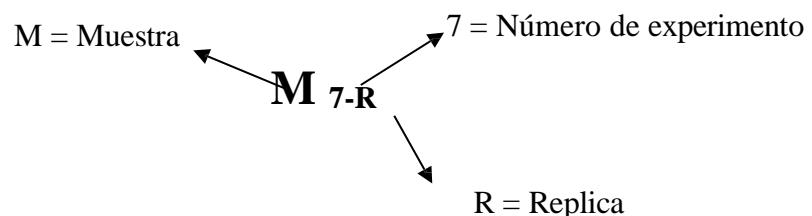
Para garantizar la precisión de los resultados, cada experimento se realizó por duplicado, es decir se trabajó con replica (replica 2).

Tabla II-7. Codificación de los experimentos

N	Plan de experimentación		
	Temperatura	Concentración	Tiempo
M ₁	300	40	1
M ₂	300	40	2
M ₃	300	60	1
M ₄	300	60	2
M ₅	500	40	1
M ₆	500	40	2
M ₇	500	60	1
M ₈	500	60	2
M _{1-R}	300	40	1
M _{2-R}	300	40	2
M _{3-R}	300	60	1
M _{4-R}	300	60	2
M _{5-R}	500	40	1
M _{6-R}	500	40	2
M _{7-R}	500	60	1
M _{8-R}	500	60	2

Fuente: Elaboración propia, 2025.

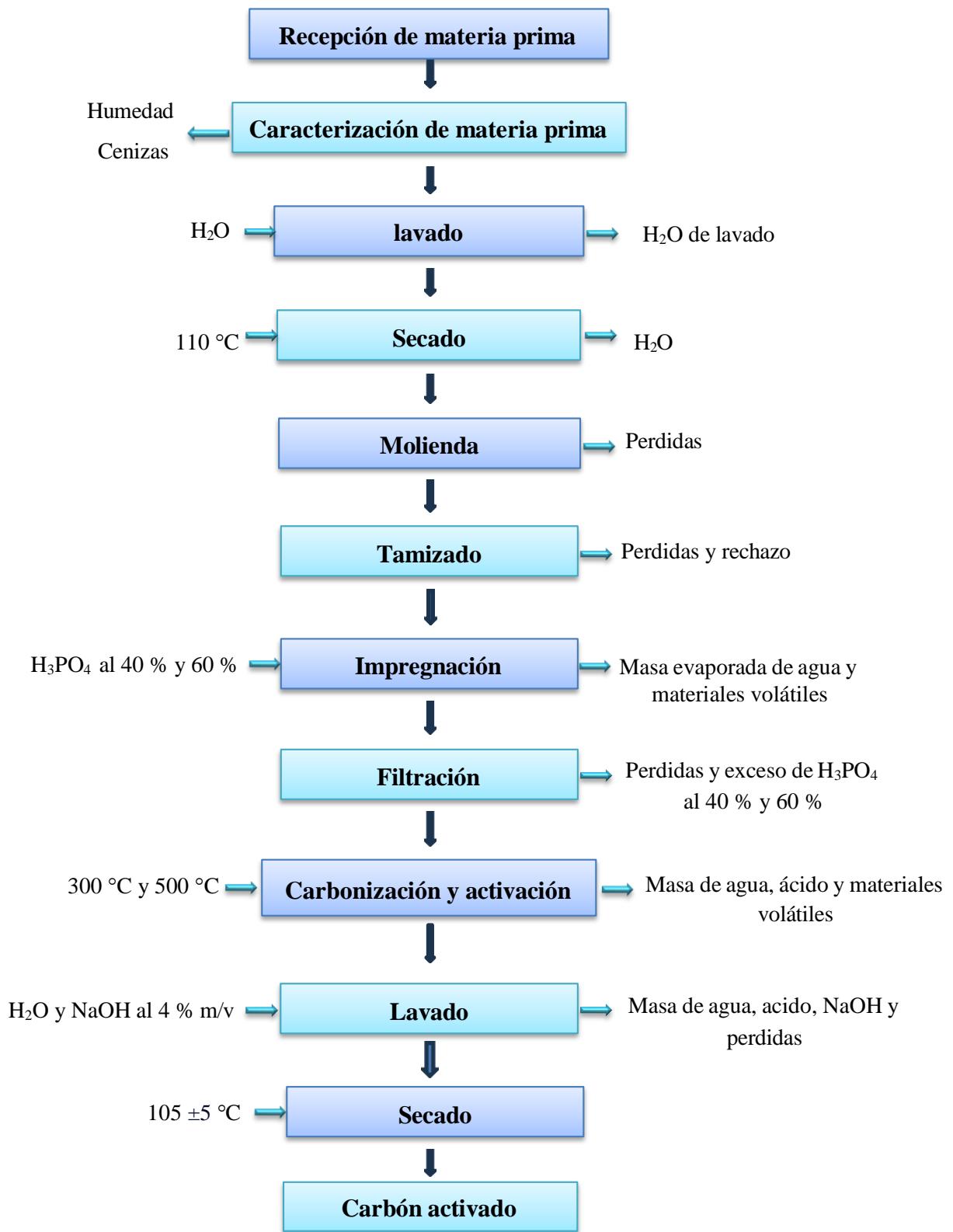
Descripción de la abreviación M_{7-R}:



2.4 Descripción del proceso de obtención de carbón activado.

Las operaciones involucradas se describen a continuación:

Figura II.1 Diagrama de flujo general obtención de carbón activado de cáscara de nuez



2.4.1 Recepción de la materia prima.

La Nuez (*Juglans regia*) es proveniente de Sella Méndez de la provincia Eustaquio Méndez del departamento de Tarija. Básicamente se realizó una clasificación por tamaños, separando las cáscaras más delgadas con la finalidad de contar con cáscaras más fuertes que resistan mejor las etapas de preparación del carbón activado. La figura II-2 muestra la cáscara de nuez (materia prima) antes de la preparación en las demás etapas.

Figura II-2. Recepción de nuez.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.4.2 Caracterización de la materia prima

2.4.2.1 Determinación del contenido de humedad.

Para determinar el porcentaje de humedad de la materia prima, se utilizó el secador infrarrojo sartorius perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias.

2.4.2.1.1 Procedimiento.

- Se encendió el equipo y se colocó el platillo del secador llevándose a peso a cero para tarar.
- Se pesó 5 g de cáscara de nuez triturada en el platillo receptor.
- Se inició el análisis una vez puesto el platillo en el secador infrarrojos.

- Una vez finalizado el análisis se anotó el dato requerido, como se muestra en la figura II-3.

Figura II-3. Secador infrarrojo



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.4.2.1.2 Determinación del contenido de cenizas.

Para el análisis del contenido de cenizas de la cáscara de nuez se recurrió al laboratorio del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología perteneciente a la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS) Tarija – Bolivia, para esto se llevó una muestra de alrededor de 300 gramos en un recipiente de plástico con tapa para realizar el análisis.

2.4.3. Limpieza

Las cáscaras seleccionadas se sometieron al lavado con agua de grifo para eliminar impurezas, como se muestra en la Figura II-4.

Figura II-4. Lavado.



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.4 Secado

La preparación de la materia prima incluyó el secado de las cáscaras a una temperatura de 110 °C durante 5 horas, con el fin de obtener partículas más sólidas que facilitaron la carbonización, La figura II-5 muestra el secado de la cáscara de nuez.

Figura II-5. Secado de la cáscara de nuez



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-6. Cáscara de nuez seca



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.5 Trituración

Para obtener un tamaño de partícula adecuado para la carbonización, las muestras secadas en la etapa anterior fueron trituradas en un molino de discos, reduciendo la cáscara a pequeños fragmentos. El molino de discos utilizado pertenece al laboratorio de operaciones unitarias. La figura II-7 y III-8, muestra la molienda de la cáscara de nuez.

figura II-7. Molino de discos



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-8. Molienda de la cáscara de nuez.



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.5.1 Procedimiento.

- Se trituró la cáscara de nuez en el molino de discos previamente seca.

- Se recolectó lo triturado en una bandeja.
- Posteriormente se colocó otra vez la cáscara triturada en el molino, para obtener cáscaras en trozos más pequeños.

2.4.6 Tamizado de la cáscara de nuez

Posterior a la trituración, se realizó un tamizado utilizando el tamizador vibratorio ORTO-ALRESA del laboratorio de operaciones unitarias, para seleccionar las partículas trituradas de cáscara de nuez. El tamiz empleado cuenta con mallas de aberturas de 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm y 0,063 mm.

Figura II-9. Tamiz ORTO-ALRESA



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.6.1 Procedimiento

- Se colocó la cáscara de nuez triturada, en la primera malla del tamiz.
- Se programó el equipo a una velocidad de 4 rpm en un tiempo de 15 minutos y se encendió.

- Se seleccionó la malla de 2 mm para el siguiente proceso de impregnación.

Figura II-10. Tamizado de la cáscara de nuez molida



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.7 Pruebas preliminares de concentración y temperatura

Para optimizar la obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez, se llevaron a cabo pruebas preliminares con el objetivo de definir las condiciones más adecuadas de concentración de ácido fosfórico y temperatura de carbonización.

2.4.7.1 Determinación de la Concentración de Ácido Fosfórico

Inicialmente, se probó una concentración de ácido fosfórico al 85% sin diluir. Sin embargo, este ensayo resultó en un carbón que se adhirió por completo a la cápsula de reacción, dificultando su separación y manejo, lo que llevó a descartar inmediatamente esta alta concentración.

Figura II.11. Prueba de concentración al 85%



Fuente: Elaboración propia, 2025

Posteriormente, se exploró una concentración del 60%, la cual produjo un carbón carbonizado sin aglomeración en la cápsula, como se muestra en la figura II-12.

Figura II.12. Prueba de concentración al 60 %



Fuente: Elaboración propia, 2025

Tras una exhaustiva revisión de la bibliografía especializada y trabajos previos en el campo, se consideró que una concentración del 40% también es adecuada. Por lo tanto, se decidió que los experimentos posteriores se realizarían con concentraciones de ácido fosfórico del 40% y 60%.

En cuanto a la temperatura se inició con una temperatura de 200 °C, sin embargo, se observó que a esta temperatura se requiere un tiempo más prolongado para lograr una carbonización completa, por lo cual se descartó.

Se decidió entonces emplear una temperatura mínima a 300 °C, en la cual la cáscara de nuez impregnada carbonizo en menor tiempo que la anterior.

Posteriormente se utilizó una temperatura de 700 °C para la carbonización. Si bien se obtuvo una carbonización completa, se detectó una ligera presencia de cenizas lo que se llevó a descartar esta temperatura.

Por lo tanto, se decidió trabajar a 300 °C y 500 °C, ya que según pruebas preliminares estas condiciones resultaron apropiadas óptimas para la obtención de carbón activado de cáscara de nuez.

2.4.8 Impregnación

Se aplicó el proceso de activación química, donde permite que el agente activante reaccione con la cáscara de nuez. Se utilizó como agente activador el ácido fosfórico con una concentración del 85%, posteriormente se preparó diferentes

concentraciones al 40% y 60% que por pruebas preliminares se vio conveniente diluir el agente activante a tales concentraciones.

La impregnación se realizó a una relación 1: 3, ya que se concluyó que es la mejor relación de impregnación para obtener carbón activado a partir de cáscara de nuez.

La figura II-13 y II-14, muestra la impregnación de la cáscara de nuez

Figura II-13. Impregnación



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura II-14. Cáscara de nuez impregnada



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.8.1 Procedimiento

- Se pesó 10 g de cáscara de nuez molida.

- Se adicionó el ácido fosfórico al 40 % y 60 %, en una relación 1:3 p/v respectivamente, es decir 30 ml de H₃PO₄ para los 10 g de cáscara de nuez molida.
- Se dejó reposar la mezcla durante 24 h para que el agente activante penetre en la cáscara de nuez.
- Se separó el exceso del agente activante de la cáscara de nuez, para posteriormente introducir la muestra en los crisoles.

2.4.9 Carbonización- Activación.

Se colocó la cáscara de nuez impregnada en crisoles, como se muestra en la figura II-15, los mismos que luego fueron colocados en la mufla, a una temperatura de 300 y 500 °C durante 1 y 2 horas.

En esta operación se realizó la carbonización de la cáscara impregnada y su activación de manera simultánea.

Figura II-15. Cáscara de nuez impregnada



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-16. Carbonización



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.9.1 Procedimiento

- Se colocó la cáscara de nuez dentro del recipiente de cerámica, una vez ya tarados y pesados.
- Se colocó los recipientes de cerámica dentro de la mufla con ayuda de una pinza y se inició la programación de la temperatura (calentamiento). Las temperaturas de operación fueron de: 300 y 500 °C, durante un tiempo de 1 y 2 horas.
- Se empezó a controlar el tiempo de calcinación una vez que este llegó a la temperatura programada.
- Se apagó la mufla una vez que terminó la calcinación y con ayuda de una pinza se colocó los recipientes 10 min afuera de la mufla, para que se enfríen.
- Se colocó los recipientes de cerámica en el desecador hasta que alcanzó la temperatura ambiente.
- Se pesó el crisol en una balanza y se registró el dato.

Figura II-17. Cáscara de nuez carbonizada



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.10 lavado

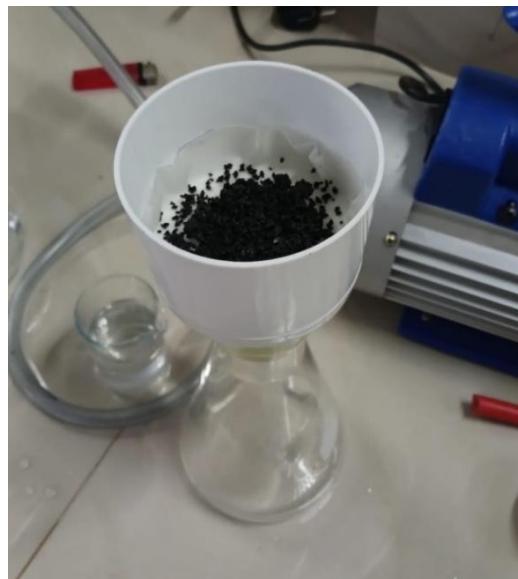
Fue necesario remover el agente activante que existe en exceso en el carbón activado obtenido, para lo cual se sometió el carbón activado a lavados con Hidróxido de sodio 1N, hasta que se logró un pH neutro.

2.4.10.1 Procedimiento

- Se cortó papel filtro Whatman 42 según el tamaño del embudo que se utilizó.
- Se colocó el carbón activado al embudo y se comenzó a lavar con agua destilada, con ayuda de una bomba de vacío se filtró, como se aprecia en la figura II-18.
- Se procedió a medir el pH del agua de lavado donde éste debía alcanzar un pH próximo a la neutralidad, como no llegó a la neutralidad se lavó con Hidróxido de sodio.
- Se lavó con hidróxido de sodio 1N ya que según pruebas preliminares se vio conveniente, para lo cual se dejó reposando el carbón activado con hidróxido de sodio durante 2 min y se transcurrido este tiempo se lavó finalmente con agua destilada

- Se midió el pH del agua de lavado, como se muestra en la figura II-19.

Figura II-18. Lavado



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-19. Lectura de pH



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.11 Secado

El secado del carbón activado se realizó en la estufa a una temperatura de 110 °C por un lapso de 24 horas, como se muestra la figura II-20. Una vez transcurrido este

tiempo se pesó el producto final, como se muestra en la figura II-21.

Figura II-20. Secado del Carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura II-21. Pesado del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5 Caracterización del Producto Obtenido

Para evaluar la eficacia del carbón activado obtenido a partir de cáscara de nuez, se realizaron dos análisis: la determinación del índice de yodo, que permite calcular el área superficial, y la determinación del índice de azul de metileno, que cuantifica el

porcentaje de remoción de este colorante.

2.5.1 Determinación del Índice de azul de metileno

En la determinación del índice de azul metílico se determina la capacidad de adsorción del carbón activado sobre el azul de metílico en solución haciendo uso de un espectrofotómetro.

El análisis del índice de azul de metílico se realizó de acuerdo a los procedimientos establecidos por Zenteno, 2009; Mamani, 2021 y Test methods for activated carbon, 1986 (Anexo 6).

2.5.1.1 Curva de calibración de la solución de azul de metílico

Se preparó un blanco de agua destilada de 50 ml y una serie de estándares de A.M. de concentraciones variables de (1-6) mg/l, como se observa en la figura III-22.

Figura II-22. Curva de calibración



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.1.1.1 Procedimiento

- Se encendió el espectrofotómetro 30 min antes de ser usado.
- Se seleccionó la longitud de onda de 665 nm para medir la absorbancia del azul de metílico en el espectrofotómetro porque esta es la longitud de onda

de máxima absorción (λ_{max}) para esta sustancia en el espectro visible, y se lee el blanco (agua destilada).

- Se midió la absorbancia de las soluciones preparadas de azul de metileno en el espectrofotómetro, para ello se transfiere la muestra a la celda y se lee la absorbancia a 665 nm y se repite este paso hasta terminar todas las muestras.

Figura II-23. Espectrofotómetro



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Se realizo una gráfica con los valores de la curva de calibración.

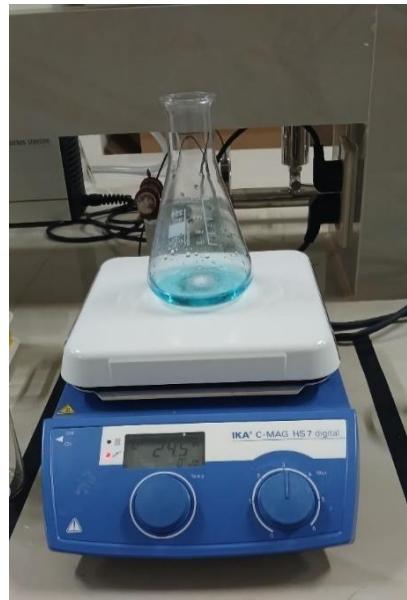
2.5.1.2 Decoloración de la solución de azul de metileno

Para la decoloración del azul de metileno se usó la solución de 4 mg/l que se preparó anteriormente para la curva de calibración.

Procedimiento

- Se pesó 2 g de carbón activado a partir de cáscara de nuez.
- Se secó 2 g de carbón activado a 150 °C por 1 h
- Se enfrió a temperatura ambiente en un desecador el carbón por el lapso de 1 hora.
- Se pesó 0,1 g de carbón activado en polvo.
- Se agregó 0,1 g de carbón activado en 25 ml de solución de azul de metileno, como se muestra en la figura II-21.
- Se agitó durante 15 min en un agitador el Erlenmeyer con la muestra, como se muestra en la figura II-24.

Figura II-24. Agitación



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se filtró la muestra con ayuda de un papel filtro Whatman 42 y un embudo como se muestra en la Figura II-25.

Figura II-25. Filtrado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura II-26. Decoloración del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia, 2025.

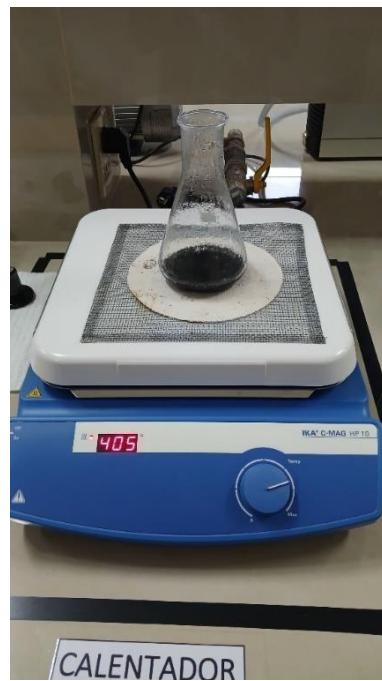
2.5.2 Determinación del índice de yodo

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

2.5.2.1 Procedimiento

- Se secó 2 g de carbón activado a 150 °C por 1 h.
- Se enfrió el carbón a temperatura ambiente en un desecador.
- Se pesó 1,5 g de carbón activado en polvo.
- Se adicionó 10 ml de HCl al 5 % al matraz Erlenmeyer.
- Se colocó el Erlenmeyer en un calentador, y se esperó a que ebulla, una vez llegado a la ebullición se lo mantuvo así durante 30 segundos.

Figura II-27. Ebullición del HCl con carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se dejó enfriar el matraz hasta temperatura ambiente.
- Se añadió 100 ml de la solución estándar de yodo 0,1 N al Erlenmeyer y agito vigorosamente durante 30 segundos.
- Se colocó un papel filtro Whatman 42 en el embudo y se filtró la solución, como se muestra en la figura II-28.

Figura II-28. filtración



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se descartó los primeros 20 ml a 30 ml del filtrado y se recogió el resto del filtrado en un Erlenmeyer.
- Se agitó el filtrado en el Erlenmeyer y se pipeteó 50 ml a un nuevo matraz Erlenmeyer.
- Se llenó la bureta con tiosulfato de sodio 0,1 N, como se muestra en la figura II-29.

Figura II-29. Llenado de Bureta con tiosulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia, 2025

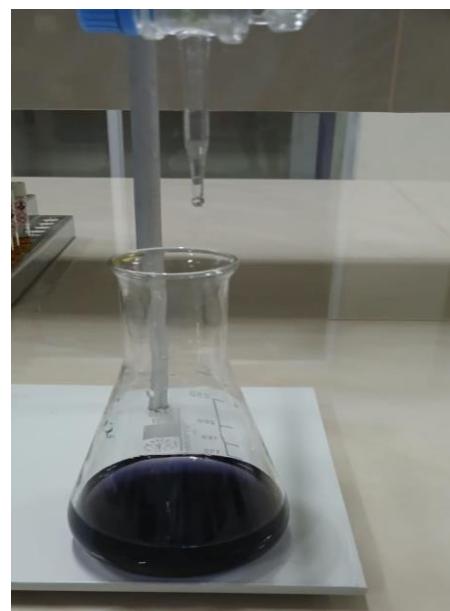
- Se inició la titulación del filtrado, hasta que el color amarillo rojizo intenso haya desaparecido.
- Se colocó 1 ml de la solución de almidón a la muestra, la misma que se tornó de coloración azul como se observa en la Figura III-30.

Figura II-30. Solución de almidón



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-31. Tonalidad de color azul



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se tituló hasta que el color azul desapareció, como se observa en figura III-32 y se anotó el volumen de titulación.

Figura II-32. Titulación



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.6 Aplicación del carbón activado en una muestra de agua.

2.6.1 Determinación de conductividad eléctrica.

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación , por tanto cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas ,en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia , implica un cambio en la conductividad , por esta razón el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimado rápido de del contenido de solidos disueltos.

La experiencia indica que el producto del valor de la conductividad en ($\mu\text{mho}/\text{cm}$) por un factor que oscila entre 0,55 y 0,7 es igual al contenido de solidos disueltos en mg/l ; dicho factor depende de los iones en solución en el agua y de la temperatura en general es alto mayor de 0,7 en aguas salinas o de calderas y bajo, menor de 0,55 en aguas con alcalinidad caustica o acidez mineral.

La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de medición. Por tanto, el

valor de la medida de la conductividad es usado como un parámetro sustituto de la concentración de los sólidos disueltos. (Rojas, 2002)

2.6.1.1 Principio del método.

El método consistió en la medida directa de la conductividad utilizando una celda de conductividad previamente estandarizada con una solución de KCl.

Los resultados se determinan mediante lectura directa, expresándose en micromhos por centímetro ($\mu\text{mho}/\text{cm}$) en unidades del sistema inglés o bien, en microsiemens por metro ($\mu\text{S}/\text{m}$), en unidades del SI.

2.6.1.2 Preparación de la muestra

- Se dejó acondicionar la muestra de agua que fue almacenada en el refrigerador, hasta alcanzar la temperatura ambiente, como se observa en la Figura II-33.

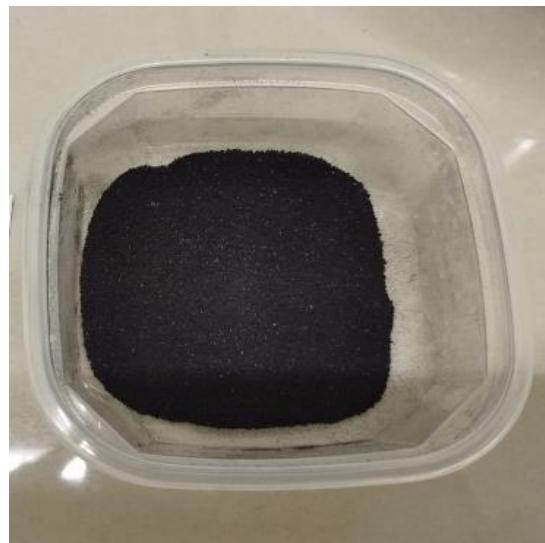
Figura II-33. Acondicionamiento de la muestra



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se pesó la mejor muestra de carbón activado de nuez la cual fue preparada a 60% y a una temperatura de 500 C Como se observa en la figura II-34.

Figura II-34. Carbón activado de cáscara de nuez



Fuente: Elaboración propia, 2025

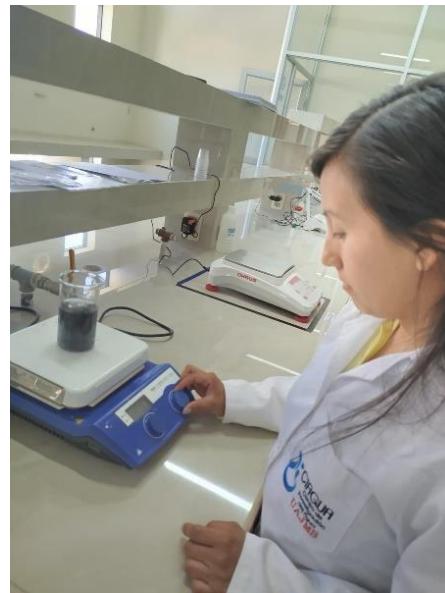
- Se agregó el carbón activado a un vaso precipitado con la muestra de agua, y se puso a agitar en el agitador magnético, Como se ve en la Figura II-35 y Figura II-36.

Figura II- 35. Carbón activado en la muestra de agua.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura II-36. Agitación del carbón



Fuente: Elaboración propia, 2025

- Se filtró la muestra de agua para separar el carbón del agua.
- Se procedió a la lectura de la conductividad del agua, como se observa en la Figura II-37.

Figura II-37. Medida de la Conductividad



Fuente: Elaboración propia, 2025

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la caracterización de la cáscara de nuez

3.1.1. Resultados del % humedad de la cáscara de nuez

La determinación del porcentaje de humedad de cáscara de nuez, se realizó utilizando el secador infrarrojo, una técnica precisa y crucial.

La medición de este parámetro es fundamental, ya que su valor tiene un impacto significativo en la calidad y la eficiencia del proceso de producción de carbón activado.

Los valores presentados en la tabla III-1 reflejan el porcentaje de humedad de cada una de las seis muestras de cáscara de nuez analizadas.

Tabla III-1. Determinación del % humedad de cáscara de nuez

Muestra	% Humedad
1	9,73
2	9,18
3	9,49
4	9,65
5	9,81
6	9,77

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para obtener resultados óptimos en el cálculo del porcentaje de humedad, se analizaron seis muestras de cáscara de nuez.

Los datos obtenidos fueron ingresados en Minitab, y el promedio resultante se muestra en la tabla III-2.

Tabla III-2. Determinación del % promedio de humedad

Variable	N	Media	Error estandar	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Q3	Máximo
% Humedad	6	9,605	0,0967	0,237	9,18	9,4125	9,78	9,81

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La tabla III-2 presenta los resultados del análisis de humedad de la cáscara de nuez, donde se determinó un porcentaje de humedad promedio del 9,605% a partir de seis muestras.

Este valor es respaldado por una baja desviación estándar de 0,237, lo que indica una alta consistencia en las mediciones. El rango de humedad observado en las muestras, que va desde un mínimo de 9,18% hasta un máximo de 9,81%, reafirma la homogeneidad de los datos.

Un porcentaje de humedad bajo como el encontrado 9,605 % se considera favorable para procesos posteriores como la carbonización, ya que una menor humedad reduce los requisitos energéticos y mejora la calidad del carbón activado resultante.

3.1.2 Resultados de la determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas es un parámetro importante en la caracterización de la cáscara de nuez, ya que indica la cantidad de material inorgánico presente en la muestra.

Un bajo contenido de cenizas es deseable para la producción de carbón activado, ya que reduce la cantidad de residuos no combustibles y mejora la calidad del producto final. Los resultados del análisis, realizados por el (CEANID) laboratorio del Centro de Análisis Investigación y Desarrollo, dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología perteneciente a la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS) Tarija – Bolivia muestran que la cáscara de nuez tiene un contenido de cenizas de 0,77%. Este valor se considera bajo y es indicativo de la pureza del material. El documento escaneado con los resultados detallados del análisis se encuentra disponible

en el (ANEXO 7).

3.2. Resultados del índice de azul de metileno

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

La determinación precisa del índice de azul de metileno requiere la construcción de una curva de calibración. Esta curva relaciona la absorbancia de soluciones de azul de metileno de concentraciones conocidas con sus respectivas concentraciones. Para construir la curva de calibración, se prepararon soluciones de azul de metileno se preparó las concentraciones mostradas en la tabla III-3.

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

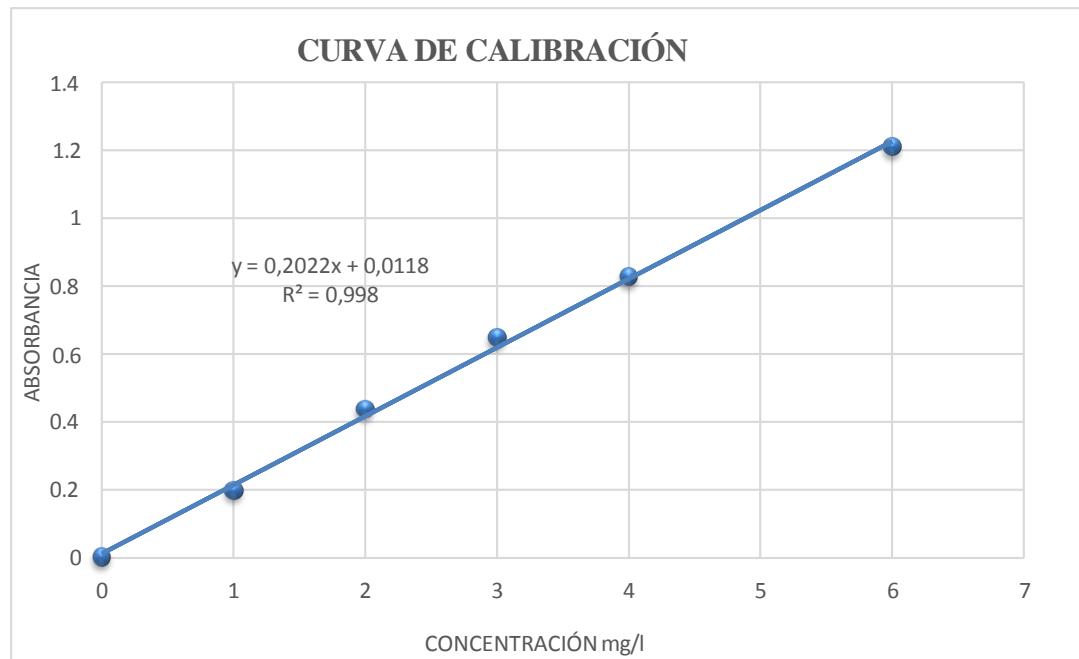
Concentración (mg/l)	Absorbancia (nm)
0	0
1	0,196
2	0,436
3	0,646
4	0,825
6	1,208

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.2.1.1 Procedimiento

- A partir de la solución madre, se prepararon diluciones para obtener las concentraciones deseadas para la curva de calibración.
- Se midió la absorbancia de cada solución utilizando un espectrofotómetro a una longitud de onda específica (665 nm, la longitud de onda de máxima absorción del azul de metileno).
- Se graficó la absorbancia en función de la concentración, obteniendo la curva de calibración.

Figura. III-1. Curva de Calibración y ecuación de concentración



Fuente: Elaboración propia, 2025

La curva de calibración mostrada en la Figura III-1 se generó utilizando el software Excel. Esta curva relaciona la absorbancia de soluciones de azul de metileno con sus respectivas concentraciones.

La ecuación de la recta obtenida, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,998, indica una excelente linealidad ya que el coeficiente de R^2 cercano a 1 indica una excelente correlación lineal entre la absorbancia y la concentración, por lo tanto, la fiabilidad de la curva para determinar la concentración de azul de metileno en las muestras.

La ecuación de la concentración es:

$$y = 0,2022x + 0,0118 \quad (\text{Ecuación 3-1})$$

$$x = \frac{y - 0,0118}{0,2022} \quad (\text{Ecuación 3-2})$$

Donde:

x = Concentración de azul de metileno expresada en mg/l.

y = Absorbancia expresada en nm.

3.2.2 Ecuaciones para el cálculo del índice de azul de metileno

Para determinar la capacidad de adsorción del carbón activado, se calculó la cantidad de azul de metileno adsorbido utilizando una solución inicial de 4 mg/L.

Este cálculo se basa en la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final de azul de metileno después del contacto con el carbón activado. Para determinar la masa adsorbida se usa la siguiente ecuación.

$$q_e = \frac{(C_o - C_f) \times V}{m} \quad (\text{Ecuación 3-3})$$

Donde:

q_e = Masa adsorbida (mg/g).

C_o = 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).

V = Volumen en (l) de la solución de azul de metileno preparado.

m = Masa del carbón activado en (g).

Para determinar la concentración inicial de la solución de azul de metileno se usa la ecuación 3-3, donde la variable “x” que se obtiene de la curva de calibración es la concentración inicial del azul de metileno. Para determinar el porcentaje de masa absorbida de azul de metileno se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100 \% \quad (\text{Ecuación 3-4})$$

Donde:

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

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

3.2.3. Resultados de análisis del índice de azul de metileno

Ejemplo de la muestra M₇

Con la ecuación 3-2 se calcula la concentración inicial de la solución de azul de metileno, después de haber obtenido la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro.

La absorbancia del azul de metileno al inicio es de: y = 0,825

Cálculo:

$$x = \frac{y - 0,0118}{0,2022}$$

$$x = \frac{0,825 - 0,0118}{0,2022}$$

$$C_o = x = 4,022 \text{ mg/l}$$

Una vez calculado la concentración inicial, se calcula la concentración final de la misma manera con la ecuación 3-2.

Donde la absorbancia de la muestra M₇ es: y = 0,0150

$$C_o = x = 4,022 \text{ mg/l}$$

Una vez calculado la concentración inicial, se calcula la concentración final de la misma manera con la ecuación 3-2.

Donde la absorbancia de la muestra M₇ es: y = 0,0150

Cálculo:

$$x = \frac{y - 0,0118}{0,2022}$$

$$x = \frac{0,0150 - 0,0118}{0,2022}$$

$$C_f = x = 0,0158 \text{ mg/l}$$

Una vez obtenido la concentración inicial y final se calcula la masa adsorbida (qe) de la muestra M₇ con la ecuación 3-3.

$$qe = \frac{(4,022 \text{ mg/l} - 0,0158 \text{ mg/l}) \times 0,025 \text{ l}}{0,1021 \text{ g}} =$$

$$qe = 0,9849 \text{ mg/g}$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de remoción del azul de metileno de la muestra M₇ con la ecuación 3-4.

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

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(4,022 \text{ mg/g} - 0,0158 \text{ mg/g})}{4,022 \text{ mg/g}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Remoción} = 99,6065$$

A continuación, en las tablas III-4 y III-5 se muestran los resultados del análisis de azul de metileno realizados a los carbones activados obtenidos en la réplica 1 y la réplica 2.

Tabla III-4. Resultados del % de remoción del azul de metileno, réplica 1

Muestra	Masa de carbón activado (g)	Masa de carbón activado (g)	Masa de carbón activado promedio	Abs. 1	Abs.2	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	Masa adsorbida "qe" (mg/g)	% Remoción
M₁	0,1161	0,1101	0,1131	0,0280	0,0300	0,0290	0,0851	0,8702	97,8850
M₂	0,1080	0,1032	0,1056	0,0290	0,0270	0,0280	0,0801	0,9332	98,0080
M₃	0,1043	0,1019	0,1031	0,0240	0,0200	0,0220	0,0504	0,9630	98,7458
M₄	0,1196	0,1128	0,1162	0,0270	0,0300	0,0285	0,0826	0,8475	97,9465
M₅	0,1033	0,1029	0,1031	0,0220	0,0200	0,0210	0,0455	0,9642	98,8687
M₆	0,1094	0,1085	0,1090	0,0250	0,0200	0,0225	0,0529	0,9108	98,6843
M₇	0,1011	0,1030	0,1021	0,0140	0,0160	0,0150	0,0158	0,9814	99,6065
M₈	0,1031	0,1028	0,1030	0,0190	0,0180	0,0185	0,0331	0,9686	99,1761

Fuente: Elaboración propia, 2025.

De acuerdo a la tabla III-4 con los resultados obtenidos, la muestra M₇ presenta el mejor rendimiento de adsorción, con una masa adsorbida (qe) de 0,9814 mg/g y un porcentaje de remoción de 99,6065%.

Esto indica que el carbón activado de la muestra M₇ tiene una alta capacidad para remover el azul de metileno de la solución. La muestra M₇ fue preparada utilizando una concentración de ácido fosfórico al 60%, a una temperatura de 500°C y un tiempo de

activación de una hora. Estas condiciones de preparación son óptimas para obtener un carbón activado con alta capacidad de adsorción.

Tabla III-5. Resultados del % de remoción del azul de metileno, réplica 2

Muestra	Masa de carbón activado (g)	Masa de carbón activado (g)	Masa de carbón activado promedio	Abs. 1	Abs.2	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	Masa adsorbida "qe" (mg/g)	% Remoción
M_{1-R}	0,1139	0,1110	0,11245	0,028	0,029	0,0285	0,0826	0,8758	97,9465
M_{2-R}	0,1095	0,1033	0,1064	0,026	0,029	0,0275	0,0776	0,9268	98,0695
M_{3-R}	0,1040	0,1008	0,1024	0,025	0,022	0,0235	0,0579	0,9678	98,5613
M_{4-R}	0,1125	0,1113	0,1119	0,03	0,028	0,029	0,0851	0,8796	97,8850
M_{5-R}	0,1022	0,1025	0,10235	0,020	0,024	0,022	0,0504	0,9701	98,7458
M_{6-R}	0,1095	0,1087	0,1091	0,023	0,0220	0,0225	0,0529	0,9095	98,6843
M_{7-R}	0,1112	0,1033	0,10725	0,015	0,014	0,0145	0,0134	0,9344	99,6680
M_{8-R}	0,1027	0,1025	0,1026	0,017	0,019	0,018	0,0307	0,9725	99,2376

Fuente: Elaboración propia, 2025.

De acuerdo a la tabla III-5 se observa que la mejor muestra de obtención de carbón activado es “M_{7-R}” con un valor de masa adsorbida de 0,9344 mg/g y con un porcentaje de remoción del 99,6680 %.

A continuación, en la tabla III-6 el promedio de la masa adsorbida y el porcentaje de remoción de azul de metileno de los carbones activados de cáscara de nuez.

Tabla III-6. Resultados promedio de remoción del azul de metileno

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)	% Remoción Replica 1	% Remoción Replica 2	Promedio %remoción
M ₁	1	40	300	97,8850	97,9465	97,9158
M ₂	2	40	300	98,0080	98,0695	98,0387
M ₃	1	60	300	98,7458	98,5613	98,6535
M ₄	2	60	300	97,9465	97,8850	97,9158
M ₅	1	40	500	98,8687	98,7458	98,8073
M ₆	2	40	500	98,6843	98,6843	98,6843
M ₇	1	60	500	99,6065	99,6680	99,6373
M ₈	2	60	500	99,1761	99,2376	99,2069

Fuente: Elaboración propia, 2025.

la combinación de una alta temperatura de activación, un tiempo de activación corto y una alta concentración de ácido fosfórico resulta en la producción de un carbón activado de cáscara de nuez con una excelente capacidad de adsorción.

La muestra M₇, preparada bajo estas condiciones, demuestra el potencial de la cáscara de nuez como materia prima para la producción de carbón activado de alta calidad para diversas aplicaciones. La muestra M₇ tiene el mayor promedio de % de remoción del azul de metileno, con un valor de 99,6373 %.

3.3 Resultados de la determinación de índice de yodo

Para determinar el índice de yodo se utilizó la norma ASTM D 4607-14 (Anexo 2), la norma NTE INEN 1988:2013 (Anexo 3) y los procedimientos de Test methods for activated carbon, 1986 (Anexo 4) como guía para realizar el cálculo de la determinación del índice de yodo de los carbones activados.

3.3.1 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del índice de yodo

Para la realización del cálculo del índice de yodo se usó las siguientes ecuaciones:

- **Determinación del Índice de Yodo**

$$\text{Índice de Yodo} = \frac{V}{m} \times f \quad (\text{Ecuación 3-5})$$

- **Cálculo de relación V/m**

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2,2 \times B \times V_1)}{mc} \quad (\text{Ecuación 3-6})$$

- **Cálculo de las constantes del Índice de Yodo A y B**

$$A = N_1 \times 12693 \quad (\text{Ecuación 3-7})$$

$$B = N_2 \times 126,93 \quad (\text{Ecuación 3-8})$$

- **Cálculo del valor C para determinar factor “ $\frac{V}{m}$ ” del Índice de Yodo**

$$C = \frac{N_2 \times V_1}{50} \quad (\text{Ecuación 3-9})$$

Donde:

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

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

f = Factor de corrección (ver Anexo 5).

V_1 = Volumen utilizado de tiosulfato de sodio 0,1 N en ml.

N_1 = Normalidad de la solución estándar de yodo 0,1 N.

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

mc = Masa del carbón activado.

3.3.2. Resultados de análisis del índice de yodo

A continuación, se realiza un ejemplo del procedimiento de cómo se realizó el cálculo para la obtención de resultados de las tablas III-6 y III-7.

Ejemplo de la muestra M₇

Primeramente, se calculó las constantes del índice de yodo A y B, con las ecuaciones 3-7 y 3-8.

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

$$A = 1269,3$$

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

$$B = 12,693$$

Posteriormente se calcula V/m con los valores de las constantes A y B utilizando la ecuación 3-6.

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

$$\frac{V}{m} = \frac{1269,3 - (2,2 \times 12,693 \times 12,90)}{1,500}$$

$$\frac{V}{m} = 605,2415$$

Luego se calculó el valor C con la ecuación 3-9.

$$C = \frac{N_2 \times V_1}{50}$$

$$C = \frac{0,1 \times 12,90}{50}$$

$$C = 0,0258$$

Una vez calculado la normalidad del filtrado residual $C = 0,0258$, con su valor de este buscamos en el (Anexo 5) el factor de corrección del índice de yodo obteniendo así el valor de “ f ” que va ser $f = 0,9613$

Una vez obtenido el valor del factor de corrección y la relación V/m, se procedió a calcular el índice de yodo de carbón activado de cáscara de nuez con la ecuación 3-5.

$$\text{Índice de yodo} = 605,2415 \times 0,9613$$

$$\text{Índice de yodo} = 581,8186 \text{ mg/g}$$

En las tablas III-7 y III-8 se muestran los resultados del análisis del índice de yodo realizados a los carbones activados obtenidos en la réplica 1 y la réplica 2

Tabla III-7. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1

Muestra	Masa de CA	(Na ₂ S ₂ O ₃) N	(Yodo) N	Volumen HCl % 5 (ml)	Volumen (Na ₂ S ₂ O ₃) (ml)	V/m	C	f	Índice de yodo (mg/g)
M ₁	1,5033	0,1	0,1	10	16,70	534,1310	0,03340	0,9250	494,0712
M ₂	1,5041	0,1	0,1	10	16,68	534,2183	0,03336	0,9257	494,5258
M ₃	1,5031	0,1	0,1	10	15,40	558,3535	0,03080	0,9350	522,0605
M ₄	1,5012	0,1	0,1	10	16,20	544,1790	0,03240	0,9288	505,4334
M ₅	1,5022	0,1	0,1	10	14,09	583,0398	0,02818	0,9488	553,1882
M ₆	1,5042	0,1	0,1	10	14,55	573,7250	0,02910	0,9425	540,7358
M ₇	1,5020	0,1	0,1	10	12,90	605,2415	0,02580	0,9613	581,8186
M ₈	1,5004	0,1	0,1	10	14,07	584,1115	0,02814	0,9488	554,2050

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla III-7 se observa que el mejor carbón activado es la muestra M₇ con un valor de índice de yodo de 581,8186 mg/g dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico al 60% una temperatura de activación de 500 °C por un lapso de una hora, lo que indica que este carbón activado tiene la mayor capacidad de adsorción entre las muestras analizada.

Tabla III-8. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2

Muestra	Masa de CA	(Na ₂ S ₂ O ₃) N	(Yodo) N	Volumen HCl % 5 (ml)	Volumen (Na ₂ S ₂ O ₃) (ml)	V/m	C	f	Índice de yodo (mg/g)
M _{1-R}	1,5029	0,1	0,1	10	16,69	534,4590	0,03338	0,9257	494,7487
M _{2-R}	1,5028	0,1	0,1	10	16,7	534,3087	0,03340	0,9250	494,2356
M _{3-R}	1,5042	0,1	0,1	10	15,5	556,0888	0,03100	0,9333	518,9976
M _{4-R}	1,5011	0,1	0,1	10	16,1	546,0755	0,03220	0,9294	507,5226
M _{5-R}	1,5025	0,1	0,1	10	14,1	582,7375	0,02820	0,9475	552,1438
M _{6-R}	1,5039	0,1	0,1	10	14,44	575,8819	0,02888	0,9450	544,2084
M _{7-R}	1,5019	0,1	0,1	10	12,88	605,6536	0,02576	0,9613	582,2148
M _{8-R}	1,5008	0,1	0,1	10	14,09	583,5837	0,02818	0,9488	553,7042

Fuente: Elaboración propia, 2025

En la tabla III-8, se puede observar que la muestra “M_{7-R}” destaca con el valor más alto de índice de yodo, alcanzando 582,2148 mg/g. Este resultado indica que el carbón activado de la muestra “M_{7-R}” posee la mayor capacidad de adsorción entre las muestras.

A continuación, en la tabla III-9, se muestran los promedios de los resultados del cálculo de índice de yodo de la réplica 1 y réplica 2.

Tabla III-9. Resultados promedio del índice de yodo

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)	Índice de yodo (mg/g) Replica 1	Índice de yodo (mg/g) Replica 2	Promedio índice de yodo (mg/g)
M ₁	1	40	300	494,0712	494,7487	494,4099
M ₂	2	40	300	494,5258	494,2356	494,3807
M ₃	1	60	300	522,0605	518,9976	520,5291
M ₄	2	60	300	505,4334	507,5226	506,4780
M ₅	1	40	500	553,1882	552,1438	552,6660
M ₆	2	40	500	540,7358	544,2084	542,4721
M ₇	1	60	500	581,8186	582,2148	582,0167
M ₈	2	60	500	554,2050	553,7042	553,9546

Fuente: Elaboración propia, 2025

La tabla III-9 presenta los resultados del índice de yodo para diversas muestras de carbón activado. El índice de yodo promedio obtenido es de 582,0167 mg/g. Este valor representa la capacidad promedio de adsorción de yodo del carbón activado producido a partir de cáscara de nuez en este experimento.

La norma ASTM D 4607-14 establece un rango de índice de yodo aceptable para carbón activado, que oscila entre 500 y 1200 mg/g. Al comparar el índice de yodo promedio obtenido (582,0167 mg/g) con este rango normativo, se observa que la muestra M₇ cumple con los requisitos de la norma.

Esto indica que el carbón activado producido a partir de cáscara de nuez en este experimento tiene una capacidad de adsorción de yodo adecuada y, por lo tanto, una calidad aceptable según los estándares de la norma ASTM D 4607-14.

3.3.3 Resultados de área superficial

El área superficial equivale a más o menos el número de yodo (índice de yodo) más 100 y el resultado se expresa en m²/g.

Este se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Área superficial} = \text{índice de yodo} + 100 \quad (\text{Ecuación 3-10})$$

A continuación, se realiza un ejemplo del procedimiento de cómo se realizó el cálculo.

Ejemplo de la muestra M₇

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

$$\text{Área superficial} = 581,8186 + 100 = 681,8186 \text{ m}^2/\text{g}$$

En la tabla III-10 y III-11 se muestra el área superficial del carbón activado obtenido de las demás muestras de la réplica 1 y réplica 2.

Tabla III-10. Área superficial del carbón activado replica 1

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
M ₁	494,0712	594,0712
M ₂	492,9498	592,9498
M ₃	522,0605	622,0605
M ₄	505,4334	605,4334
M ₅	553,1882	653,1882
M ₆	540,7358	640,7358
M ₇	581,8186	681,8186
M ₈	554,205	654,205

Fuente: Elaboración propia, 2025

La muestra M₇ presenta el mayor índice de yodo (581,8186 mg/g) y, por lo tanto, la mayor área superficial (681,8186 m²/g) entre todas las muestras. Esto indica que la muestra M₇ tiene la mayor capacidad de adsorción y la mayor cantidad de poros disponibles para la adsorción.

A continuación, se muestra la tabla III-11 (Área superficial del carbón activado) para la réplica 2

Tabla III-11. Área superficial del carbón activado replica 2

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
M _{1-R}	492,8277	592,8277
M _{2-R}	493,3762	593,3762
M _{3-R}	518,9976	618,9976
M _{4-R}	507,5226	607,5226
M _{5-R}	552,1438	652,1438
M _{6-R}	544,2084	644,2084
M _{7-R}	582,2148	682,2148
M _{8-R}	553,7042	653,7042

Fuente: Elaboración propia, 2025

La muestra M_{7-R} presenta el mayor índice de yodo (582,2148 mg/g) y, por lo tanto, la mayor área superficial (682,2148 m²/g) entre todas las muestras de la réplica 2. Esto indica que la muestra M_{7-R} tiene la mayor capacidad de adsorción y la mayor cantidad de poros disponibles para la adsorción.

A continuación, en la tabla III-12 se muestran los promedios de los resultados del cálculo del área superficial de la réplica 1 y replica 2, la tabla III-12, tiene como objetivo presentar los promedios de los resultados del área superficial calculados en las réplicas 1 y 2. Esto es crucial para obtener una visión más robusta y representativa de las propiedades del carbón activado.

Tabla III-12. Promedio área superficial

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H₃PO₄) (%)	Temperatura (°C)	Área superficial	Área superficial	Promedio área superficial
				Replica 1	Replica 2	
M₁	1	40	300	594,0712	592,8277	593,4495
M₂	2	40	300	592,9498	593,3762	593,1630
M₃	1	60	300	622,0605	618,9976	620,5291
M₄	2	60	300	605,4334	607,5226	606,4780
M₅	1	40	500	653,1882	652,1438	652,6660
M₆	2	40	500	640,7358	644,2084	642,4721
M₇	1	60	500	681,8186	682,2148	682,0167
M₈	2	60	500	654,2050	653,7042	653,9546

Fuente: Elaboración propia 2025.

la tabla III-12 indica que la muestra M₇ presenta el mayor promedio de área superficial (682,0167 m²/g). Esto sugiere que las condiciones de preparación utilizadas para esta muestra (1 hora, 60% de H₃PO₄ y 500 °C) fueron las más efectivas para generar un carbón activado con alta capacidad de adsorción.

3.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

Los balances de materia y energía se realizaron según los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto además de la discusión de los mismos.

3.4.1. Balance de materia

En la tabla III-13 y tabla III-14 se puede observar todas las corrientes de todos las etapas o procesos realizados en la obtención experimental de carbón activado de cáscara nuez, tanto de la réplica 1 como de la réplica 2.

Donde:

A cas. nuez + imp = Masa de cáscara de nuez húmeda e impurezas.

B mas. Agua = Masa de agua de lavado.

C cas + agua + perdidas = Masa de cáscara de nuez húmeda más aguas más perdidas.

D cas.nuez.lav = Masa de cáscara de nuez lavada.

E cas. nuez. Seca = Masa de cáscara de nuez seca.

F vap. agua = Masa de vapor de agua.

G cas. nuez. Molida = Masa de cáscara de nuez seca y molida.

H perd = Rechazo en la molienda.

I rechazo tam = Cantidad de rechazo de la cáscara de nuez tamizada.

J perd.tam = Pérdidas en el tamizado.

K cas.nuez.tam = Masa de cáscara de nuez seca tamizada.

L activante = Masa de agente activante (H_3PO_4).

M evap = Masa evaporada de agua y algunos materiales volátiles.

N c. impre = Masa de cáscara de nuez impregnada con exceso de agente activante

$\tilde{N}_{exc + perd}$ = Masa en exceso de agente activante (H_3PO_4) y perdidas.

$O_{cas. impre}$ = Masa de cáscara de nuez impregnada

$P_{agua + Ac + alqui + m.v}$ = Masa de agua, ácido, alquitranes y materiales volátiles.

$Q_{c.act}$ = Masa de carbón activado.

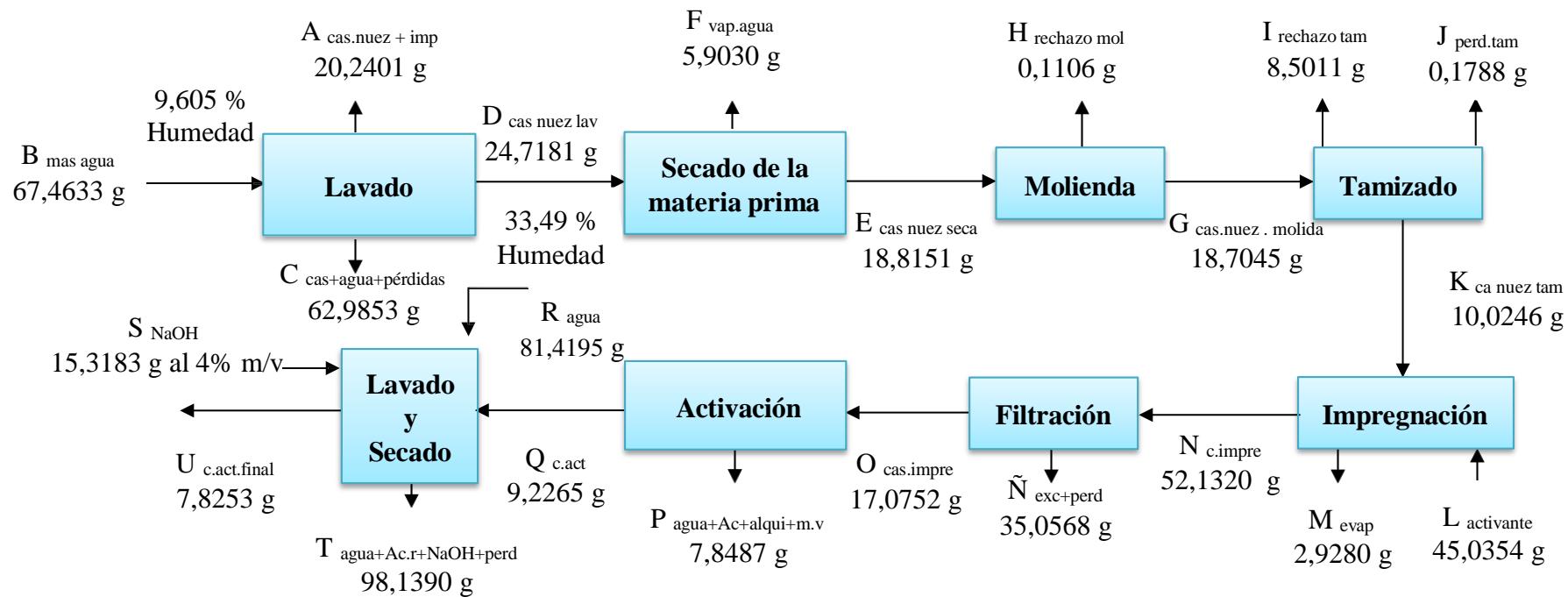
R_{agua} = Agua destilada para realizar el lavado del carbón activado.

S_{NaOH} = Masa de hidróxido de sodio para neutralizar el exceso de ácido en la etapa de lavado del carbón activado.

$T_{agua + Ac. r + NaOH + perd}$ = Masa de agua, ácido residual, hidróxido de sodio y perdidas.

$U_{c.act. final}$ = Masa de carbón activado final.

Figura III-2. Diagrama de flujo del balance de materia general para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de nuez



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla III-13. Corrientes del balance de materia y replica

Muestra	A (g)	B(g)	C (g)	D (g)	E (g)	F (g)	G (g)	H (g)	I (g)	J (g)
M ₁	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1981
M ₂	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1358
M ₃	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1955
M ₄	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1761
M ₅	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1692
M ₆	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1967
M ₇	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1788
M ₈	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1526
M _{1-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1960
M _{2-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1087
M _{3-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1995
M _{4-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1993
M _{5-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1942
M _{6-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1989
M _{7-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1964
M _{8-R}	20,2401	67,4633	24,7181	62,9853	18,8151	5,9030	18,7045	0,1106	8,5011	0,1143

Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla III-14. Corrientes del balance de materia y replica

Muestra	K (g)	L (g)	N (g)	Ñ (g)	O (g)	P (g)	Q (g)	R (g)	S (g)	T (g)	U (g)
M 1	10,0053	40,0235	1,1789	48,8499	33,8446	15,0053	6,274	8,7313	70,4567	15,3183	88,3313
M 2	10,0676	40,0235	1,2539	48,8372	33,6382	15,1990	7,289	7,9102	70,4567	15,3183	87,5537
M 3	10,0079	45,0354	2,9888	52,0545	34,2377	17,8168	8,185	9,6316	81,4321	15,3183	98,6840
M 4	10,0273	45,0354	3,3940	51,6687	33,8515	17,8172	8,475	9,3425	85,3565	15,3183	102,313
M 5	10,0342	40,0235	1,2791	48,7786	33,1778	15,6008	7,369	8,2315	71,4213	15,3183	88,5625
M 6	10,0067	40,0235	1,1653	48,8649	33,7273	15,1376	7,739	7,3987	71,4678	15,3183	87,8751
M 7	10,0246	45,0354	2,9280	52,1320	35,0568	17,0752	7,8487	9,2265	81,4195	15,3183	98,1390
M 8	10,0508	45,0354	2,9159	52,1703	34,7438	17,4265	7,9614	9,4651	81,3215	15,3183	98,3172
M 1-R	10,0074	40,0235	1,9694	48,0615	31,1298	16,9317	9,522	7,4102	72,4567	15,3183	88,7745
M 2-R	10,0947	40,0235	0,9274	49,1908	32,2582	16,9326	8,511	8,4219	71,2815	15,3183	88,8196
M 3-R	10,0039	45,0354	3,3049	51,7344	34,6594	17,0750	7,318	9,7573	81,4432	15,3183	98,7806
M 4-R	10,0041	45,0354	2,3596	52,6799	35,2527	17,4272	7,781	9,6465	85,6765	15,3183	102,8973
M 5-R	10,0092	40,0235	2,1724	47,8603	32,8550	15,0053	6,611	8,3945	72,5067	15,3183	89,8192
M 6-R	10,0045	40,0235	1,2076	48,8204	33,7470	15,0734	6,677	8,3966	71,3321	15,3183	88,6505
M 7-R	10,0070	45,0354	3,0684	51,9740	34,6585	17,3155	7,877	9,4388	83,9057	15,3183	100,8545
M 8-R	10,0891	45,0354	2,8776	52,2469	35,0511	17,1958	7,9681	9,2277	81,3649	15,3183	98,1529

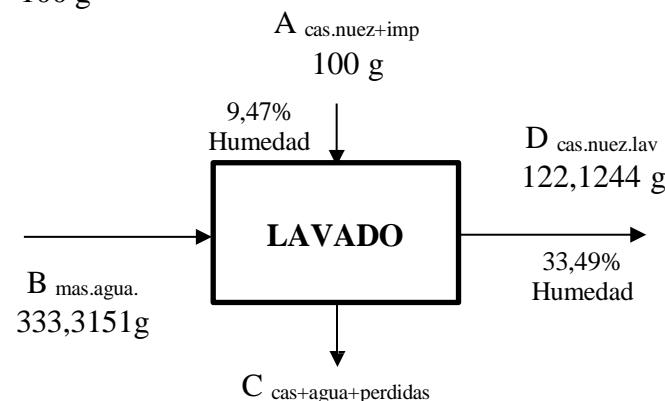
Fuente: Elaboración propia, 2025

3.4.1.1 Balance de materia en la etapa de lavado.

El lavado a la cáscara de nuez se realizó con agua de grifo, para eliminar las impurezas presentes.

Figura III-3. Diagrama de flujo en la etapa de selección de la materia prima

Base de cálculo = 100 g



Fuente: Elaboración propia, 2025

El balance global en la etapa de selección de la materia prima es:

$$A_{\text{cas.nuez+imp}} + B_{\text{mas.agua.}} = C_{\text{cas+agua+perdidas}} + D_{\text{cas.nuez.lav.}} \quad (\text{Ecuación 3-11})$$

Donde:

$A_{\text{cas. nuez+imp}}$ = Masa de cáscara de nuez y impurezas.

$B_{\text{mas. agua}}$ = Masa de agua de lavado.

$C_{\text{cas+agua+perdidas}}$ = Masa de cáscara de nuez húmeda más perdidas.

$D_{\text{cas.nuez.lav}}$ = Masa de cáscara de nuez lavada.

De la ecuación 3-11 despejamos $C_{\text{cas+agua+perdidas}}$

$$A_{\text{cas.nuez+imp}} + B_{\text{mas.agua.}} = C_{\text{cas+agua+perdidas}} + D_{\text{cas.nuez.lav.}}$$

$$C_{\text{cas+agua+perdidas}} = A_{\text{cas.m.h+imp}} + B_{\text{mas.agua}} - D_{\text{cas.nuez.lav}}$$

$$C_{\text{cas+agua+perdidas}} = 100 \text{ g} + 333,3151 - 122,1244 \text{ g}$$

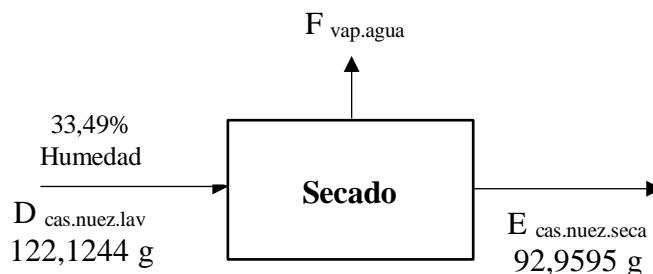
$$C_{\text{cas.m.h}} = 311,1907 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de lavado de la materia prima se detallan en la tabla III-13.

3.4.1.2 Balance de materia en la etapa de secado.

El secado de la cáscara de nuez para eliminar el contenido de humedad se realizó en una estufa (ver Anexo 1) a una temperatura de 110 °C por un tiempo de 5 horas.

Figura III-4. Diagrama de flujo en la etapa de secado



Fuente: Elaboración propia, 2025

El balance global en la etapa de secado es:

$$D_{cas.nuez.lav} = F_{vap.agua} + E_{cas.nuez.seca} \quad (\text{Ecuación 3-12})$$

Donde:

$D_{cas.nuez.lav}$ = Masa de cáscara de nuez lavada.

$F_{vap.agua}$ = Masa de vapor de agua.

$E_{cas.nuez.seca}$ = Masa de cáscara de nuez seca.

De la ecuación 3-12, despejamos $F_{vap.agua}$.

$$F_{vap.agua} = D_{cas.nuez.lav} - E_{cas.nuez.seca}$$

$$F_{vap.agua} = 122,1244 \text{ g} - 92,9595 \text{ g}$$

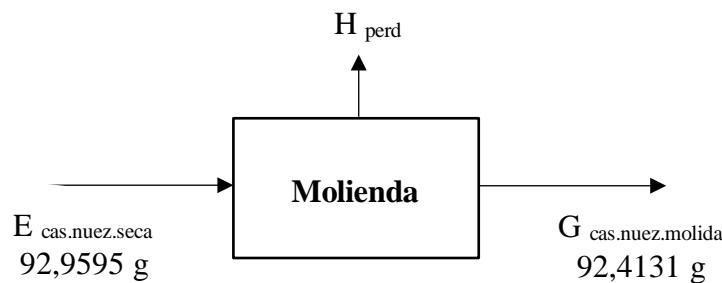
$$F_{vap.agua} = 29,1649 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de secado de la materia prima se detallan en la tabla III-13.

3.4.1.3 Balance de materia en la etapa de molienda

La molienda de la cáscara de nuez se realizó en el molino de discos, para reducir el tamaño de la cáscara de nuez.

Figura III-5. Diagrama de flujo en la etapa de molienda



Fuente: Elaboración propia, 2025

El balance global en la etapa de molienda es:

$$E_{\text{cas.nuez.seca}} = H_{\text{perd}} + G_{\text{cas.nuez.molida}} \quad (\text{Ecuación 3-13})$$

Donde:

$E_{\text{cas.nuez.seca}}$ = Masa de cáscara de nuez seca.

H_{perd} = Perdidas en la molienda.

$G_{\text{cas.nuez..molida}}$ = Masa de cáscara de nuez seca y molida.

De la ecuación 3-13, despejamos H_{perd} .

$$H_{\text{perd}} = E_{\text{cas.nuez.seca}} - G_{\text{cas.nuez.molida}}$$

$$H_{\text{perd}} = 92,9595 \text{ g} - 92,4131 \text{ g}$$

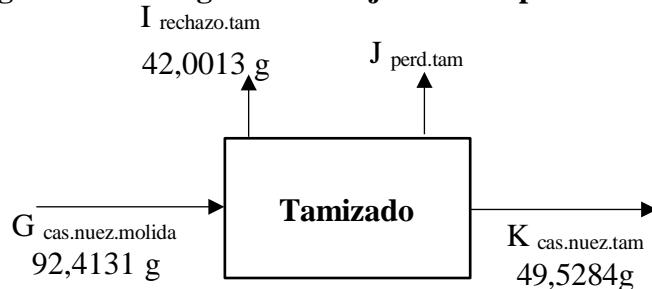
$$H_{\text{perd}} = 0,5464 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-13.

3.4.1.4 Balance de materia en la etapa de tamizado

En la etapa de tamizado se seleccionó la granulometría de 2 mm, ya que fue la más adecuada que pasó por el tamiz.

Figura III-6. Diagrama de flujo en la etapa de tamizado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El balance global en la etapa de tamizado es:

$$G_{\text{cas.nuez.molida}} = I_{\text{rechazo.tam}} + J_{\text{perd.tam}} + K_{\text{cas.nuez.tam}} \quad (\text{Ecuación 3-14})$$

Donde:

$G_{\text{cas.nuez.molida}}$ = Masa de cáscara de nuez seca y molida.

$I_{\text{rechazo.tam}}$ = Cantidad de rechazo de la cáscara de nuez tamizada.

$J_{\text{perd.tam}}$ = Pérdidas en el tamizado.

$K_{\text{cas.nuez.tam}}$ = Masa de cáscara de nuez seca tamizada.

De la ecuación 3-14, despejamos $J_{\text{perd.tam}}$.

$$J_{\text{perd.tam}} = G_{\text{cas.m.s.molida}} - I_{\text{rechazo tam}} - K_{\text{cas.nuez.tam}}$$

$$J_{\text{perd.tam}} = 92,4131 \text{ g} - 42,0013 \text{ g} - 49,5284 \text{ g}$$

$$J_{\text{perd.tam}} = 0,8834 \text{ g}$$

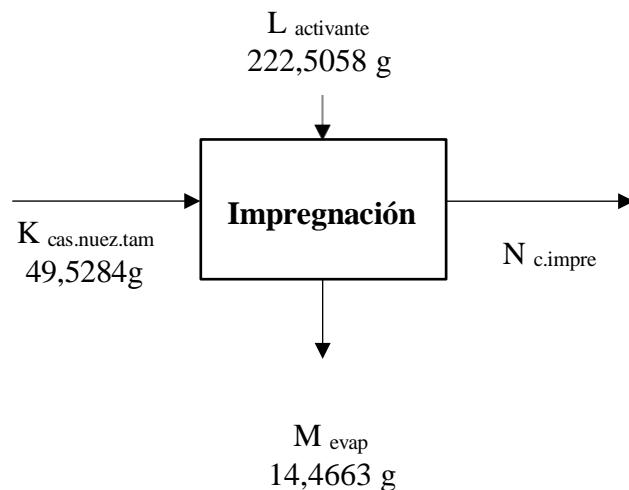
Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-14.

3.4.1.5 Balance de materia en la etapa de impregnación

En la impregnación se utilizó como agente activante el ácido fosfórico en dos diferentes

concentraciones al 40% y 60 % con una relación de impregnación de 1:3. La impregnación se realizó por 24 horas en reposo el precursor con el agente activante, pasado ese tiempo se quitó el exceso de ácido fosfórico, para quitar el exceso se realizó una filtración al vacío para poder extraer la mayor cantidad posible de ácido fosfórico. A continuación, en la figura III-7, se muestran los flujos del proceso de impregnación.

Figura III-7. Diagrama de flujo en la etapa de impregnación



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El balance global en la etapa de impregnación es:

$$K_{\text{cas.nuez.tam}} + L_{\text{activante}} = M_{\text{evap}} + N_{\text{c.impre}} \quad (\text{Ecuación 3-15})$$

Donde:

$K_{\text{cas.nuez..tam}}$ = Masa de cáscara de nuez seca.

$L_{\text{activante}}$ = Masa de agente activante.

M_{evap} = Masa evaporada de agua y algunos materiales volátiles.

$N_{\text{c.impre}}$ = Masa de cáscara de nuez impregnada con exceso de agente activante

De la ecuación 3-15, despejamos $N_{\text{c.impre}}$

$$N_{\text{c.impre}} = k_{\text{cas.nuez.tam}} + L_{\text{activante}} - M_{\text{evap}}$$

$$N_{\text{c.impre}} = 49,5284 \text{ g} + 222,5058 \text{ g} - 14,4663 \text{ g}$$

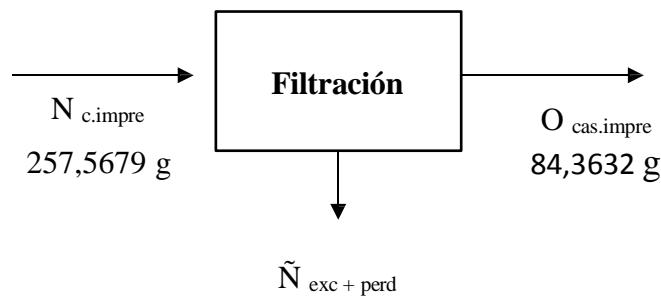
$$N_{c.impre} = 257,5679 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-14.

3.4.1.6 Balance de materia en la etapa de filtración

En la etapa de filtración se realizó una filtración al vacío para quitar al exceso de agente activante (ácido fosfórico) de la cáscara de nuez impregnada. Existen pequeñas perdidas de la cáscara de nuez impregnada.

Figura III-8. Diagrama de flujo en la etapa de filtración



Fuente: Elaboración propia, 2025

$$N_{c.impre} = \tilde{N}_{exc+perd} + O_{cas.impre} \quad (\text{Ecuación 3-16})$$

Donde:

$N_{c.impre}$ = Masa de cáscara de nuez impregnada con exceso de agente activante.

$\tilde{N}_{exc+perd}$ = Masa en exceso de agente activante y perdidas.

$O_{cas.impre}$ = Masa de cáscara de nuez impregnada.

De la ecuación 3-16, despejamos $\tilde{N}_{exc+perd}$.

$$\tilde{N}_{exc+perd} = N_{c.impre} - O_{cas.impre}$$

$$\tilde{N}_{exc+perd} = 257,5679 \text{ g} - 84,3632 \text{ g}$$

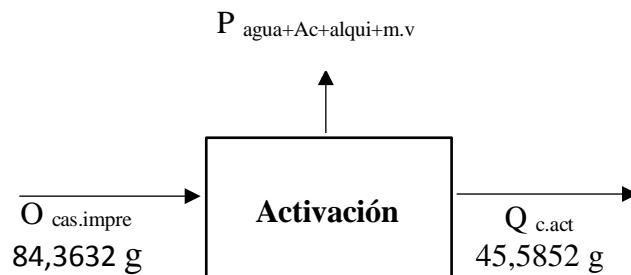
$$\tilde{N}_{exc+perd} = 173,2047 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-14.

3.4.1.7 Balance de materia en la etapa de activación

El proceso de activación química es el más importante, ya que en esta etapa la materia prima se convierte en carbón activado. La activación química se realizó en una mufla a las temperaturas de (300 °C y 500 °C) durante 1 y 2 horas.

Figura III-9. Diagrama de flujo en la etapa de activación



Fuente: Elaboración propia, 2025

El balance global en la etapa de activación es:

$$O_{cas.impre} = P_{agua+Ac+alqui+m.v} + Q_{c.act} \quad (\text{Ecuación 3-17})$$

Donde:

$O_{cas.impre}$ = Masa de cáscara de nuez impregnada.

$P_{agua+Ac+alqui+m.v}$ = Masa de agua, ácido, alquitranes y materiales volátiles.

$Q_{c.act}$ = Masa de carbón activado.

De la ecuación 3-17, despejamos $P_{agua+Ac+alqui+m.v}$.

$$P_{agua+Ac+alqui+m.v} = O_{cas.impre} - Q_{c.act}$$

$$P_{agua+Ac+alqui+m.v} = 84,3632 \text{ g} - 45,5852 \text{ g}$$

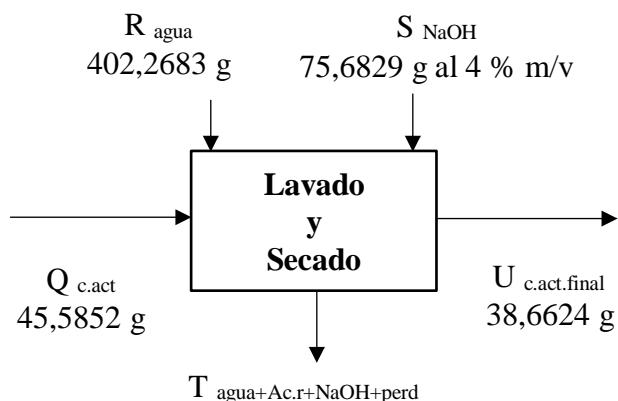
$$P_{agua+Ac+alqui+m.v} = 38,7780 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-14.

3.4.1.8 Balance de materia en la etapa de lavado y secado

El lavado del carbón activado se realizó para eliminar todas las impurezas que quedan presentes luego de la carbonización (cenizas, etc.). Luego del lavado se secó el carbón activado en una estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C por un tiempo de 24 horas.

Figura III-10. Diagrama de flujo en la etapa de lavado y secado del carbón activado de cáscara de nuez



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El balance global en la etapa de lavado y secado es:

$$Q_{c.act} + R_{agua} + S_{NaOH} = T_{agua+Ac.r+NaOH+perd} + U_{c.act.final} \quad (\text{Ecuación 3-18})$$

Donde:

$Q_{c.act}$ = Masa de carbón activado.

R_{agua} = Agua destilada para realizar el lavado del carbón activado.

S_{NaOH} = Masa de hidróxido de sodio para neutralizar el exceso de ácido en la etapa de lavado del carbón activado.

$T_{agua+Ac.r+NaOH+perd}$ = Masa de agua, ácido residual, hidróxido de sodio y perdidas.

$U_{c.act.final}$ = Masa de carbón activado final.

De la ecuación 3-18, despejamos $T_{agua+Ac.r+NaOH+perd}$.

$$T_{\text{agua+Ac.r+NaOH+perd}} = Q_{\text{c.act}} + R_{\text{agua}} + S_{\text{NaOH}} - U_{\text{c.act.final}}$$

$$T_{\text{agua+Ac.r+NaOH+perd}} = 45,5822 \text{ g} + 402,2683 \text{ g} + 75,6829 \text{ g} - 38,6624 \text{ g}$$

$$T_{\text{agua+Ac.r+NaOH+perd}} = 484,8741 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-14.

3.5. BALANCE DE ENERGÍA

Se realizó un análisis del balance de energía en las etapas del proceso que involucraron el consumo de electricidad. Este análisis se enfocó en la muestra “M₇”, la cual fue identificada como la de mejor rendimiento en la obtención de carbón activado. Dicha muestra se preparó mediante la impregnación de cáscara de nuez con ácido fosfórico al 60 %, seguida de una activación térmica a 500 °C durante una hora.

3.5.1 Balance de energía en la etapa de secado de la materia prima

La cáscara de nuez, materia prima utilizada, fue sometida a un proceso de secado en una estufa (ver Anexo 1). El equipo utilizado para el secado tiene un factor de consumo energético de 0,5. El proceso de secado se realizó a una temperatura de 110 °C durante un período de 5 horas.

Datos

Tiempo t = 5 h

Temperatura = 110 °C

Factor f = 0,5

Potencia de la estufa P_{estufa} = 2 kW

Energía consumida por la estufa E_{estufa} = ?

Para calcular la energía consumida en la etapa de secado de la materia prima se utiliza la ecuación 3-19.

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} \times t \times f \quad (\text{Ecuación 3-19})$$

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

$$E_{\text{estufa}} = 5 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 5 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 18000 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de secado de la materia prima es 18000 kJ.

3.5.2. Balance de energía en la etapa de molienda

La molienda de cáscara de nuez se realizó en el molino de discos.

Molino de discos

Datos

$$\text{Tiempo } t = 2,506 \text{ min} = 0,0417 \text{ h}$$

$$\text{Potencia del molino de discos } P_{\text{m.discos}} = 1,4 \text{ kW}$$

$$\text{Energía consumida por el molino de discos } E_{\text{m.discos}} = ?$$

Para calcular la energía consumida en la molienda se utiliza la ecuación 3-20.

$$E_{\text{m.discos}} = P_{\text{m.discos}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-20})$$

$$E_{\text{m.discos}} = 1,4 \text{ kW} \times 0,0417 \text{ h}$$

$$E_{\text{m.discos}} = 0,05838 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{m.discos}} = 0,05838 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 210,1680 \text{ kJ}$$

La energía consumida por el molino de discos es 210,1680 kJ.

3.5.3. Balance de energía en la etapa de tamizado

Se realizó un tamizado para seleccionar la granulometría óptima de la cáscara de nuez molida (2 mm) destinada a la producción de carbón activado. El proceso de tamizado tuvo una duración de 15 minutos.

Datos

$$\text{Tiempo } t = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ h}$$

Potencia del tamizador $P_{\text{tamizador}} = 0,08 \text{ kW}$

Energía consumida por el tamizador $E_{\text{tamizador}} = ?$

Para calcular la energía consumida en la etapa de tamizado se utiliza la siguiente ecuación 3-21.

$$\mathbf{E}_{\text{tamizador}} = \mathbf{P}_{\text{tamizador}} \times \mathbf{t} \quad (\text{Ecuación 3-21})$$

$$E_{\text{tamizador}} = 0,08 \text{ kW} \times 0,25 \text{ h}$$

$$E_{\text{tamizador}} = 0,02 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{tamizador}} = 0,02 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 72 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de tamizado es 72 kJ.

3.5.4. Balance de energía en la etapa filtración

Se realizaron dos etapas de filtración durante el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de nuez. La primera filtración se llevó a cabo para eliminar el exceso del agente activante residual en la cáscara de nuez. La segunda filtración se realizó después del lavado del carbón activado obtenido. Ambas filtraciones se realizaron utilizando una bomba de vacío. La primera filtración tuvo una duración de 4 minutos, mientras que la segunda tomó 9 minutos.

Datos

Sumando el tiempo del primer y segundo filtrado se tiene que es 13 minutos.

$$\text{Tiempo } t = 13 \text{ min} = 0,21667 \text{ h}$$

Potencia de la bomba de vacío $P_{\text{bomba de vacío}} = 0,13 \text{ kW}$

Energía consumida por la bomba de vacío $E_{\text{bomba de vacío}} = ?$

Para calcular la energía consumida en la filtración se utiliza la ecuación 3-22.

$$\mathbf{E}_{\text{bomba de vacío}} = \mathbf{P}_{\text{bomba de vacío}} \times \mathbf{t} \quad (\text{Ecuación 3-22})$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,13 \text{ kW} \times 0,2167 \text{ h}$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,0282 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,0282 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 101,4156 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de filtración por la bomba de vacío es 101,4156 kJ.

3.5.5 Balance de energía en la etapa de activación

La activación química se llevó a cabo en una mufla. Se introdujo la muestra impregnada con ácido fosfórico en la mufla, donde se sometió a una temperatura de 500 °C durante un período de 1 hora dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 60 %.

Datos

Tiempo $t = 2 \text{ h}$

Temperatura = 500 °C

Potencia de la mufla $P_{\text{mufla}} = 1,52 \text{ kW}$

Energía consumida por la mufla $E_{\text{mufla}} = ?$

Para calcular la energía consumida en la etapa de activación se utiliza la ecuación 3-23.

$$E_{\text{mufla}} = P_{\text{mufla}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-23})$$

$$E_{\text{mufla}} = 1,52 \text{ kW} \times 1 \text{ h}$$

$$E_{\text{mufla}} = 1.52 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{mufla}} = 1,52 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 5472 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de activación es 5472 kJ.

3.5.6 Balance de energía en la etapa de secado

El secado del carbón activado se hizo luego del lavado del carbón activado, este se realizó en una estufa a una temperatura de $105 \pm 5 \text{ °C}$ por un tiempo de 24 horas, para eliminar toda cantidad de agua que tenía el carbón activado.

Datos

Tiempo $t = 24 \text{ h}$

Temperatura $= 105 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Factor $f = 0,5$

Potencia de la estufa $P_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW}$

Energía consumida por la estufa $E_{\text{estufa}} = ?$

Para calcular la energía consumida en la etapa de secado del carbón activado se utiliza la ecuación 3-24.

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} \times t \times f \quad (\text{Ecuación 3-24})$$

$$E_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 0,5$$

$$E_{\text{estufa}} = 24 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 24 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 86,400 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de secado del carbón activado es 86400 kJ.

3.5.7 Balance de energía en la etapa de agitación

Esta etapa se realizó en un tiempo de 15 min

Donde:

Tiempo $t = 15 \text{ min} = 0,25 \text{ horas}$

Potencia del calentador – agitador magnético $= 1 \text{ kW}$

Para calcular la energía consumida en la etapa de agitación del carbón activado se utiliza la ecuación 3-25

$$E_{\text{calentador}} = P_{\text{calentador}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-25})$$

$$E_{\text{cal}} = 1 \text{ kW} \times 0,25 \text{ h}$$

$$E_{\text{cal}} = 0,25 \text{ kWh}$$

$$E_{cal} = 0,25 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 900 \text{ kJ}$$

La energía consumida es de 900 kJ.

3.6 Determinación del Rendimiento del Proceso

El rendimiento de las diferentes muestras obtenidas de carbón activado se define como la relación entre la masa del producto obtenido (carbón activado) y la masa de la materia prima utilizada (cáscara de nuez), por lo tanto, el porcentaje del rendimiento en masa será calculada con la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{\text{Masa final del carbón activado}}{\text{Masa inicial de la cáscara de nuez}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3-26})$$

Donde:

Masa inicial de la cáscara de nuez húmeda e impurezas. = $m_{cas.n.h+imp}$

Masa final del carbón activado obtenido = $m_{c.act.Final}$

Porcentaje de rendimiento = % R

Tabla III-15. Rendimiento en masa, réplica 1

Muestra	$m_{cas.+imp}$ (g)	$m_{c.act.final}$ (g)	% Rendimiento
M₁	20,2401	6,175	30,5087
M₂	20,2401	6,1315	30,2938
M₃	20,2401	7,698	38,0334
M₄	20,2401	7,704	38,0631
M₅	20,2401	6,4086	31,6629
M₆	20,2401	6,3097	31,1743
M₇	20,2401	7,8253	38,6624
M₈	20,2401	7,7877	38,4766

Fuente: Elaboración propia,2025.

Tabla III-16. Rendimiento en masa, réplica 2

Muestra	m_{cas.+imp} (g)	m_{c.act.final} (g)	% Rendimiento
M_{1-R}	20,2401	6,4107	31,6733
M_{2-R}	20,2401	6,2021	30,6426
M_{3-R}	20,2401	7,7382	38,232
M_{4-R}	20,2401	7,744	38,2607
M_{5-R}	20,2401	6,4003	31,6219
M_{6-R}	20,2401	6,3965	31,6031
M_{7-R}	20,2401	7,8083	38,5784
M_{8-R}	20,2401	7,758	38,3299

Fuente: Elaboración propia,2025.

El promedio del porcentaje de rendimiento en masa de todas las réplicas se muestra en la tabla III-17.

Tabla III-17. Promedio del carbón activado obtenido

Muestra	Promedio %
M₁	31,0910
M₂	30,4682
M₃	38,1327
M₄	38,1619
M₅	31,6424
M₆	31,3887
M₇	38,6204
M₈	38,40325

Fuente: Elaboración propia,2025.

El promedio del porcentaje de rendimiento en masa del mejor carbón activado obtenido de cáscara de nuez es la muestra M₇.

3.7 Expresión de los resultados en la aplicación del carbón activado.

3.7.1 Resultados de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de la lluvia, medida en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$), indica la cantidad de iones disueltos en el agua.

El valor de la conductividad de agua medida fue de 45,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo cual indica que la muestra de agua de lluvia contenía una cantidad moderada de sales y otros iones disueltos. (Bicarbonato HCO_3^- : Este ion casi siempre está presente en el agua de lluvia debido a la disolución del dióxido de carbono atmosférico. Incluso en agua de lluvia relativamente pura, suele ser uno de los iones predominantes, Calcio (Ca^{2+}): Dada la presencia de formaciones sedimentarias en la región, pequeñas cantidades de calcio podrían disolverse en el agua de lluvia al entrar en contacto con el polvo del suelo.

Esto se debe a que a diferencia del agua pura la lluvia al caer, recoge partículas y gases de la atmósfera, como dióxido de carbono, sales y contaminantes, que se disuelven y aumentan su conductividad.

Figura III-11 Tabla de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

Solución	μ/cm	Ms/cm	ppm	$\text{M}\Omega \times \text{cm}$
Agua Pura	0,055			18.16
Agua DI Tipica	0,1			10
Agua destilada	0,5			2
Agua de lluvia	50-100		25-50	0.01-0.01
Agua potable	500-800	0.5-0.8	250-400	2.0-125($\text{K}\Omega \times \text{cm}$)
Agua potable(max)	1.055	1.055	528	0.95($\text{K}\Omega \times \text{cm}$)
Agua de mar	56.000	56	28.000	
1mol /1 de Nacl	85.000	85	42.5(ppt)	
1 mol/1 de HCL	332.000	332	166 (ppt)	

Fuente: Hanna instruments

Como se puede ver en la figura III-11, El agua de lluvia tiene una conductividad de entre 50 y 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este rango va a variar un poco de acuerdo a la región donde nos encontremos, pero tiene que estar en un rango cercano, 45,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es un valor

cercano, por lo cual la medida de conductividad fue correcta. Una disminución de la conductividad de $45.55 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $0.079 \mu\text{S}/\text{cm}$ después de aplicar carbón activado indica que este material fue muy efectivo para remover los iones disueltos presentes en el agua de lluvia. La figura III-12, muestra el resultado de la conductividad.

Figura III-12 Resultado de la conductividad eléctrica



Fuente: Elaboración propia 2025.

El carbón activado es conocido por su alta capacidad de adsorción, lo que significa que puede atraer y retener una amplia variedad de sustancias en su superficie porosa. En el contexto de la conductividad, esto sugiere que los iones que estaban contribuyendo a la lectura inicial fueron adsorbidos por el carbón activado. Este resultado demuestra la eficiencia del carbón activado de nuez como un material adsorbente.

Dado que la conductividad también nos ayuda a tener una estimación de los sólidos disueltos totales en el agua, podemos ver que el rango de sólidos disueltos totales de acuerdo a la figura III-11, el agua de lluvia es de (25 -50 mg/L) realizando cálculos los sólidos disueltos iniciales son de 22,775 mg/l, lo cual corrobora que la lectura de la conductividad fue correcta.

Al disminuir la conductividad del agua también se estima que la cantidad de sólidos disueltos totales disminuye, al hablar de sólidos disueltos totales nos referimos a las sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos)

y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua. Conociendo el valor de la conductividad se puede hacer una estimación de los sólidos disueltos totales.

3.7.1.1 Solidos disueltos totales de la muestra de agua antes de tratar

$$\mathbf{SDT = V_{medido} \times Factor}$$

$$\mathbf{SDT = 45,55 \times 0,55}$$

$$\mathbf{SDT = 25,0525 \text{ mg/L}}$$

El resultado de 25,0525 mg/L significa que, en cada litro de la muestra de agua, se estima que hay disueltos 22,775 miligramos de sólidos totales.

3.7.1.2 Solidos disueltos totales de la muestra de agua tratada

$$\mathbf{SDT = V_{medido} \times Factor}$$

$$\mathbf{SDT = 0,079 \times 0,55}$$

$$\mathbf{SDT = 0,04345 \text{ mg/L}}$$

El resultado de 0,04345 mg/L significa que, en cada litro de la muestra de agua, se estima que hay disueltos 0,0215 miligramos de sólidos totales.

3.8 Análisis Estadístico del Diseño Factorial

El diseño de experimentos puede definirse como un proceso que consiste en plantear los pasos necesarios que se deben seguir, así como el orden de estos, para una recolección y posterior análisis de la información que requiere estudiar un problema de investigación. Su objetivo es el de obtener el máximo de información requerida por el experimento con el mínimo coste y la máxima eficiencia. (Bao, 2020)

El análisis estadístico se llevó a cabo con el programa MINITAB versión 19, el cual facilita un tratamiento integral de todas las etapas del análisis de datos, asegurando así la obtención de resultados significativos y confiables.

Específicamente, se empleó el análisis de varianza (Anova) para determinar la influencia de los factores tiempo, concentración, temperatura y sus interacciones sobre las variables de respuesta: área superficial (medida a través del índice de yodo) y

porcentaje de remoción del azul de metileno.

3.8.1. Análisis del área superficial en función al índice de yodo.

La tabla III-18, presenta los datos que se ingresaron al programa Minitab, siguiendo la estructura del diseño factorial propuesto.

Tabla III-18. Datos para el cálculo del Área superficial

Muestra	Tiempo	Concentración	Temperatura	Área Superficial
1	-1	-1	-1	594,0712
2	+1	-1	-1	592,9498
3	-1	+1	-1	622,0605
4	+1	+1	-1	605,4334
5	-1	-1	+1	653,1882
6	+1	-1	+1	640,7358
7	-1	+1	+1	681,8186
8	+1	+1	+1	654,2050
9	-1	-1	-1	592,8277
10	+1	-1	-1	593,3762
11	-1	+1	-1	618,9976
12	+1	+1	-1	607,5226
13	-1	-1	+1	652,1438
14	+1	-1	+1	644,2084
15	-1	+1	+1	682,2148
16	+1	+1	+1	653,7042

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la tabla III-18, se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta que es el área superficial, tomando en cuenta los factores de tiempo, concentración y temperatura, así como sus interacciones.

3.8.1.1 Análisis estadístico del área superficial

Como parte fundamental del análisis de los resultados, se procedió con la evaluación estadística de los datos.

Específicamente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un diseño factorial, utilizando el software Minitab para tal fin.

Este ANOVA se aplicó para estudiar la variable respuesta de interés: el área superficial del carbón activado de cáscara de nuez, basándose en los valores presentados en la tabla III-19.

Tabla III-19. Resumen del diseño factorial

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

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

En la tabla III-19, se muestra el resumen del diseño factorial variable de la respuesta área superficial.

Este es un diseño experimental factorial con 3 factores (tiempo, concentración, temperatura), cada uno con dos niveles, con un total de 16 experimentos, en dos repeticiones de cada una de las 8 combinaciones únicas de los niveles de los factores. El experimento se realizó en un solo bloque y no se incluyeron puntos centrales.

3.8.1.2. Análisis de varianza para el área superficial

Tabla III-20. Análisis de varianza, respuesta área superficial

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valo r p
Modelo	7	14563,9	2080,6	1146,65	0
Lineal	3	14166,5	4722,2	2602,51	0
Tiempo	1	691,5	691,5	381,12	0
Concentración	1	1649,5	1649,5	909,08	0
Temperatura	1	11825,5	11825,5	6517,33	0
Interacciones de 2 términos	3	393,2	131,1	72,24	0
Tiempo*Concentración	1	250,2	250,2	137,87	0
Tiempo*Temperatura	1	143	143	78,82	0
Concentración*Temperatura	1	0	0	0,03	0,875
Interacciones de 3 términos	1	4,2	4,2	2,32	0,166
Tiempo*Concentración*Temp	1	4,2	4,2	2,32	0,166
Error	8	14,5	1,8		
Total	15	14578,4			

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

A partir del análisis estadístico presentado en la tabla III-20, se observa que los factores Tiempo, Concentración y Temperatura tienen un efecto significativo sobre el área superficial en función del índice de yodo, dado que sus valores p (0,000) son inferiores al umbral de significancia de 0,05. Las interacciones Tiempo*Concentración y Tiempo*Temperatura también son significativas ($p = 0,000$), lo que indica que el efecto de un factor depende del nivel del otro en estas combinaciones.

Por otro lado, la interacción Concentración*Temperatura ($p = 0,875$) y la interacción de tercer orden Tiempo Concentración Temperatura ($p = 0,166$) no se consideran significativas, ya que sus valores p son superiores a 0,05. En resumen, las variables tiempo, concentración y temperatura, así como las interacciones tiempo*concentración

y tiempo*Temperatura, son estadísticamente significativas en su efecto sobre el área superficial.

Tabla III-21. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,34702	99,90%	99,81%	99,60%

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La tabla III-21, Resumen del modelo variable respuesta área superficial, nos muestra un modelo con un ajuste sobresaliente a los datos. Los altos valores de R-cuadrado (99,90%), R-cuadrado ajustado (99,81%) y R-cuadrado predicho (99,60%) indican que el modelo de regresión presenta un ajuste excelente a los datos, sin sobreajuste significativo, esto quiere decir que el modelo posee una sólida capacidad para predecir la variable de respuesta que en este caso es el (área superficial).

Tabla III-22. Coeficientes codificados variable respuesta área superficial

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		630,591	0,337	1872,5	0,000	
Tiempo	-13,148	-6,574	0,337	-19,52	0,000	1,00
Concentración	20,307	10,153	0,337	30,15	0,000	1,00
Temperatura	54,372	27,186	0,337	80,73	0,000	1,00
Tiempo*Concentración	-7,908	-3,954	0,337	-11,74	0,000	1,00
Tiempo*Temperatura	-5,980	-2,990	0,337	-8,88	0,000	1,00
Concentración*Temp	0,110	0,055	0,337	0,16	0,875	1,00
Tiempo*Concentración*Temp	-1,026	-0,513	0,337	-1,52	0,166	1,00

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La tabla III-22 representa los coeficientes codificados de un modelo de regresión lineal múltiple, donde la variable de respuesta es el "área superficial". Los coeficientes codificados se utilizan para entender la magnitud y la dirección del efecto de cada variable predictora sobre la variable de respuesta.

3.8.1.3 Ecuación de regresión lineal variable área superficial

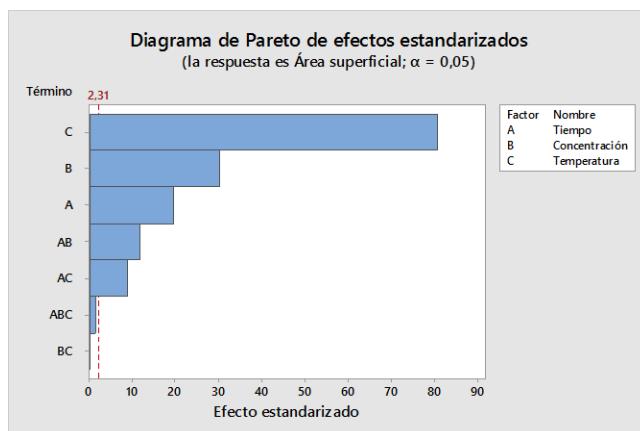
El modelo matemático para variable respuesta área superficial responde a la ecuación:

$$\begin{aligned}\text{Área sup} = & 427,5 + 29,8 t + 1,564 C + 0,2819 T - 0,380 t \cdot C - 0,0085 t \cdot T + 0,00159 \\ & C \cdot T - 0,001026 t \cdot C \cdot T\end{aligned}$$

Donde t = Tiempo; T= Temperatura; C= Concentración

3.8.1.4 Diagrama de Pareto para el área superficial

Figura III-13. Diagrama de Pareto



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

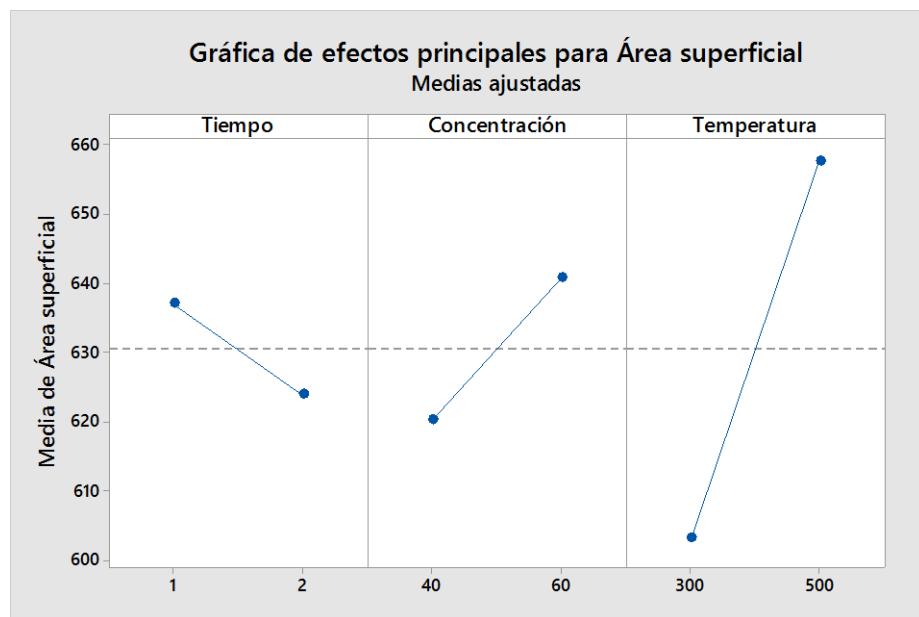
La figura III-13 el diagrama de pareto de efectos estandarizados para el área superficial muestra visualmente la magnitud y significancia estadística de los diferentes factores (Tiempo, Concentración, Temperatura) y sus interacciones en el modelo.

Las barras que se extienden más allá de la línea vertical roja (representa el umbral de significancia estadística, $\alpha = 0,05$) indican efectos que son estadísticamente significativos. En esta figura se observa que el factor C (Temperatura) tiene el efecto estandarizado más grande y significativo sobre el área superficial, seguido por el factor B (Concentración) y el factor A (Tiempo).

Además, las interacciones de B y A (Concentración*Tiempo) A y C (Tiempo*Temperatura) también muestra un efecto significativo, aunque menor que los efectos principales de los factores individuales. Las interacciones de tercer orden (ABC) y la interacción de B y C (Concentración*Temperatura) no superan el umbral de significancia, lo que sugiere que sus efectos estandarizados son relativamente pequeños y no estadísticamente significativos al nivel de $\alpha = 0,05$.

3.8.1.5. Graficas factoriales para el área superficial.

figura III-14. Diagrama de efectos principales de área superficial

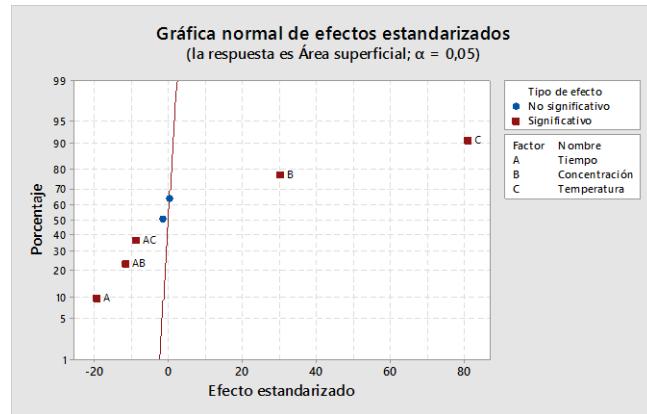


Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la figura III-14. Diagrama de efectos principales del área superficial se observa que la concentración y la temperatura son los factores más significativos e importantes que influyen en el área superficial. La temperatura tiene el efecto más fuerte ya que es fundamental en la carbonización: Asegurando la eliminación eficiente de componentes no carbonáceos y la formación de una estructura de carbono y en la activación donde proporciona la energía necesaria para la reacción con el agente activante que es el proceso que realmente desarrolla la microestructura porosa y la enorme área superficial del carbón activado. El tiempo tiene un efecto negativo ligero, pero su impacto es

mucho menor en comparación con la concentración y la temperatura. A temperaturas altas el área superficial es mayor. Con respecto a la concentración de ácido fosfórico alto (60%) se obtiene mayor área superficial. Con el tiempo en el nivel bajo (1 h) tiene efecto mayor sobre el área superficial.

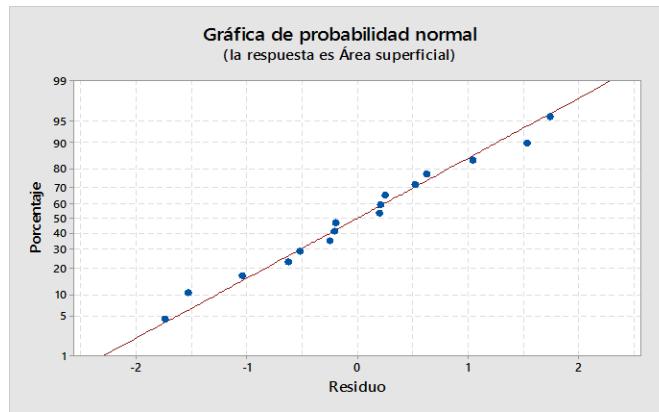
Figura III-15. Gráfica normal de efectos estandarizados para área superficial



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la figura III-15 Gráfica normal de efectos estandarizados se observa los factores más importantes que afectan a la variable respuesta, siendo la Temperatura y la Concentración las que tienen el mayor efecto sobre el área superficial.

Figura III-16. Probabilidad normal variable respuesta área superficial



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la Figura III-16 grafica de probabilidad normal, nos muestra el análisis de la normalidad de los residuos para el modelo que predice el "área superficial". Si los

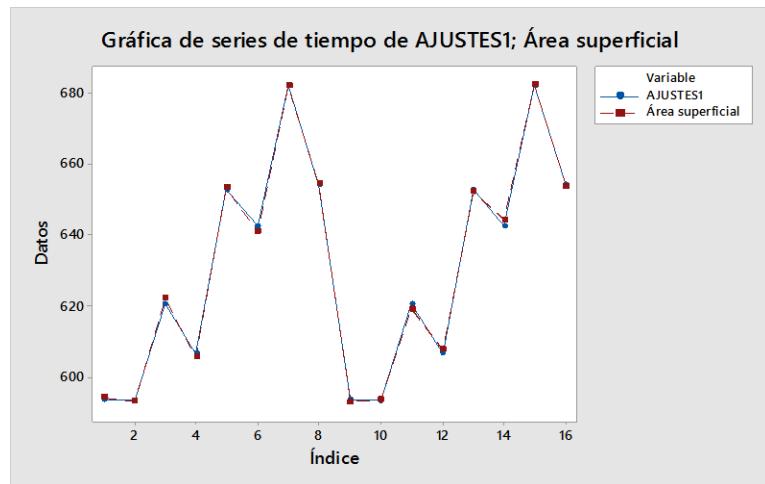
puntos se ajustas aproximadamente a la línea roja, se considera que los residuos siguen una distribución normal. En este caso, los puntos se ajustan bastante bien a la línea roja, lo que sugiere que los residuos del modelo para predecir el área superficial son aproximadamente normales motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Tabla III-23. Resultados de la variable respuesta área superficial

Muestras	Área Superficial (m^2/g)	Ajustes	Residuos
1	594,0712	593,449	0,62173
2	592,9498	593,163	-0,21321
3	622,0605	620,529	1,53145
4	605,4334	606,478	-1,04457
5	653,1882	652,666	0,52218
6	640,7358	642,472	-1,73631
7	681,8186	682,017	-0,1981
8	654,205	653,955	0,25039
9	592,8277	593,449	-0,62173
10	593,3762	593,163	0,21321
11	618,9976	620,529	-1,53145
12	607,5226	606,478	1,04457
13	652,1438	652,666	-0,52218
14	644,2084	642,472	1,73631
15	682,2148	682,017	0,1981
16	653,7042	653,955	-0,25039

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

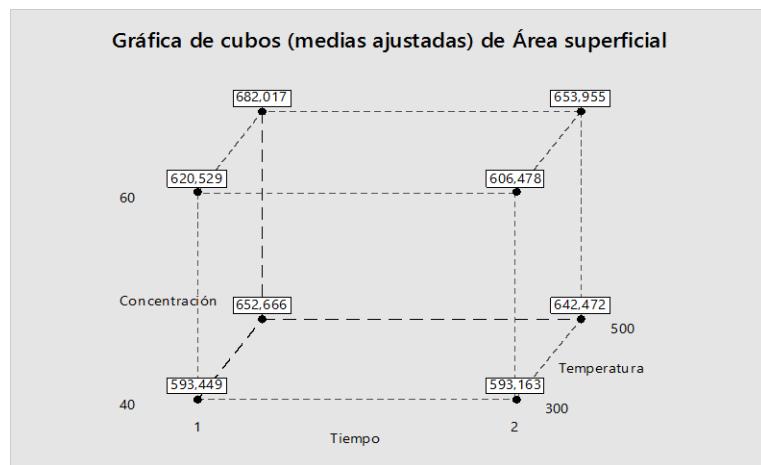
Figura III-17. Grafica de series de tiempo de ajustes



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La figura III-17 muestra como el modelo de regresión (representado por "ajustes") se ajusta a los datos observados, las líneas azul y roja se superponen estrechamente, significando que el modelo está haciendo un buen trabajo al predecir el área superficial, el modelo tiene un buen ajuste para predecir el área superficial en función de las variables predictoras incluidas en el modelo.

Figura III-18. Gráfica de cubos (medias ajustadas) del área superficial



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la figura III-18 grafica de cubos, se observa cómo el área superficial varía en función de los niveles del Tiempo, la Concentración y la Temperatura. El cubo en la esquina inferior izquierda representa la combinación de Tiempo = 1, Concentración = 40 y Temperatura = 300. La media ajustada del área superficial para esta combinación es 593,449. El cubo en la esquina superior derecha representa la combinación de Tiempo = 1, Concentración = 60 y Temperatura = 500. La media ajustada del área superficial para esta combinación es 682,017. Con lo cual podemos ver que la mejor concentración, temperatura y tiempo es el de 60%, 500 C y 1 hora.

3.8.2. Análisis estadístico del % de remoción del azul de metileno.

Tabla III-24. Análisis de varianza variable respuesta % de remoción del azul de metileno

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	5,49614	0,78516	184,63	0
Lineal	3	4,94143	1,64714	387,33	0
Tiempo	1	0,34115	0,34115	80,22	0
Concentración	1	0,96768	0,96768	227,56	0
Temperatura	1	3,63259	3,63259	854,22	0
Interacciones de 2 términos	3	0,47817	0,15939	37,48	0
Tiempo*Concentración	1	0,34115	0,34115	80,22	0
Tiempo*Temperatura	1	0,00095	0,00095	0,22	0,65
Concentración*Temperatura	1	0,13608	0,13608	32	0
Interacciones de 3 términos	1	0,07655	0,07655	18	0,003
Tiempo*Concentración*Temp	1	0,07655	0,07655	18	0,003
Error	8	0,03402	0,00425		
Total	15	5,53016			

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La tabla III-24 muestra que los factores Tiempo, Concentración y Temperatura tienen valores p de 0,000, lo que indica que tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Las interacciones Tiempo Concentración, Concentración Temperatura (valor p = 0,000) Tiempo Concentración Temperatura (valor p = 0,003) también son significativas. Esto significa que el efecto de un factor depende del nivel del otro factor.

Tabla III-25. Modelo variable respuesta % de remoción del azul de metileno

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0652113	99,38%	98,85%	97,54%

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

En la tabla III-25, el modelo tiene un excelente ajuste a los datos, ya que el R-cuadrado es alto (99,38%). Esto indica que el modelo de regresión tiene una buena capacidad de predicción.

Tabla III-26. Coeficientes codificados del % de remoción del azul de metileno

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		98,6074	0,0163	6048,49	0	
Tiempo	-0,292	-0,146	0,0163	-8,96	0	1
Concentración	0,4919	0,2459	0,0163	15,08	0	1
Temperatura	0,953	0,4765	0,0163	29,23	0	1
Tiempo*Concentración	-0,292	-0,146	0,0163	-8,96	0	1
Tiempo*Temperatura	0,0154	0,0077	0,0163	0,47	0,65	1
Concentración*Temperatura	0,1844	0,0922	0,0163	5,66	0	1
Tiempo*Concentración*Temperatura	0,1383	0,0692	0,0163	4,24	0,003	1

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

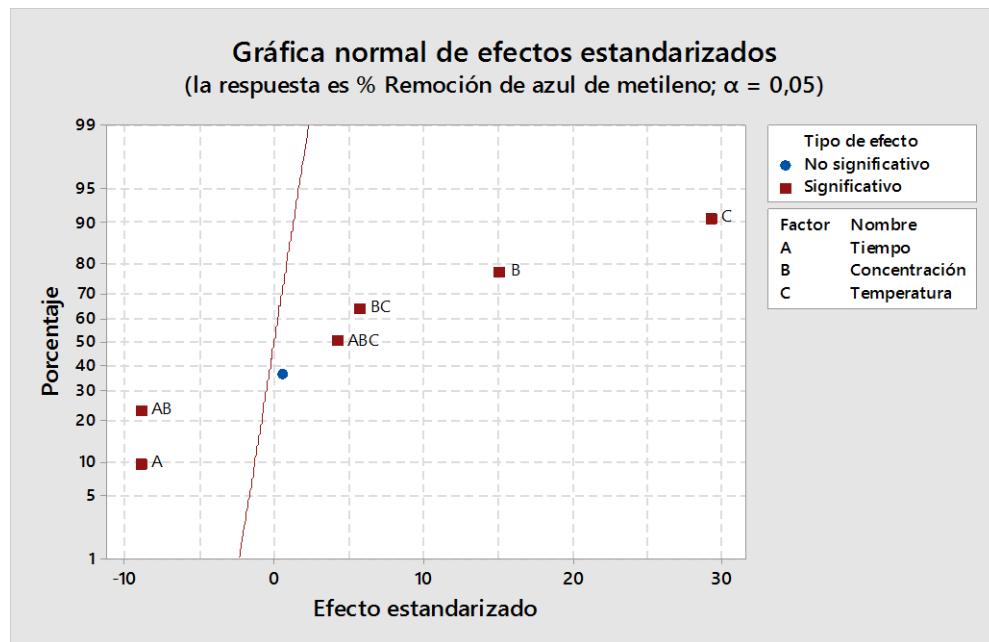
3.8.2.1 Ecuación de regresión lineal del % de remoción del azul de metileno

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoción de azul de metileno} &= 91,51 + 3,873 t + 0,1145 C + 0,01030 T - 0,0845 \\ &t*C - 0,00676 t*T - 0,000115 C*T + 0,000138 t*C*T. \end{aligned}$$

Donde t = Tiempo; T= Temperatura; C= Concentración

Esta ecuación proporciona un modelo matemático que permite estimar y comprender cómo las condiciones experimentales (tiempo, concentración, temperatura) influyen en la eficiencia de la remoción del azul de metileno.

Figura III-19. Gráfica normal para él % de remoción del azul de metileno



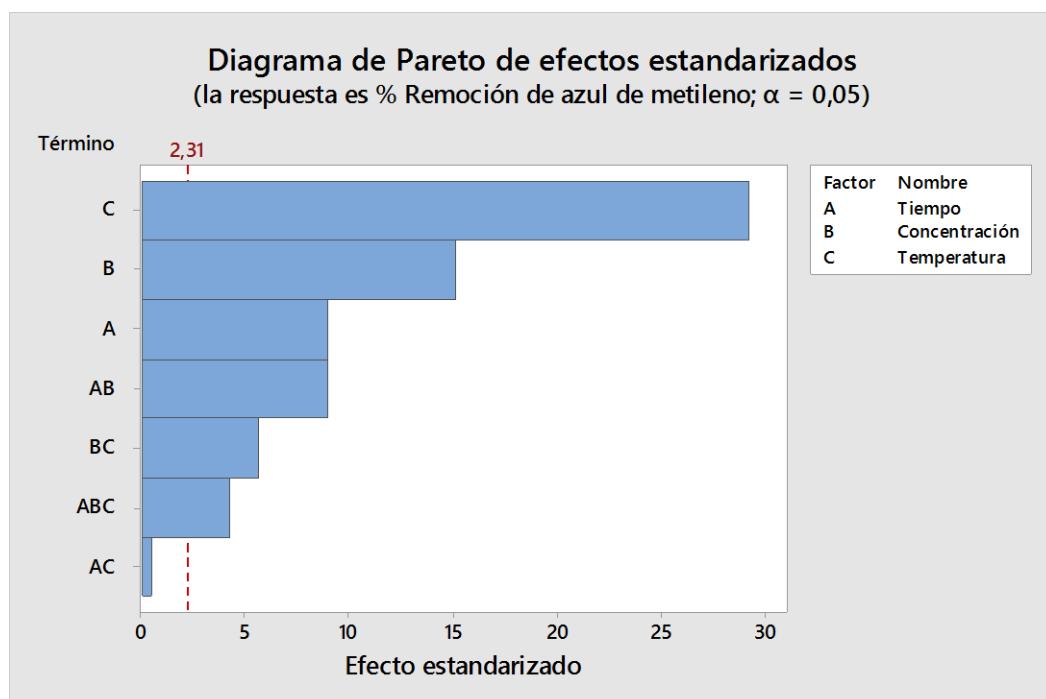
Fuente: Elaboración propia, Minitab 19

La figura III-19 Gráfica normal de efectos estandarizados para él % de remoción del azul de metileno indica en qué porcentaje son significativos los factores e interacciones. La "Concentración" y la "Temperatura" son los factores que tienen un impacto significativo en la "% Remoción de azul de metileno". La interacción entre la concentración y la temperatura, y la interacción de los 3 factores, también son significativos, mientras que el "Tiempo" y la interacción "Tiempo*Concentración" no tienen un efecto significativo en el rango de valores estudiados.

Esta gráfica proporciona una forma visual rápida de identificar los factores más importantes que influyen en la variable de respuesta.

3.8.2.2 Diagrama de Pareto para el % de remoción del azul de metileno

Figura III-20. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



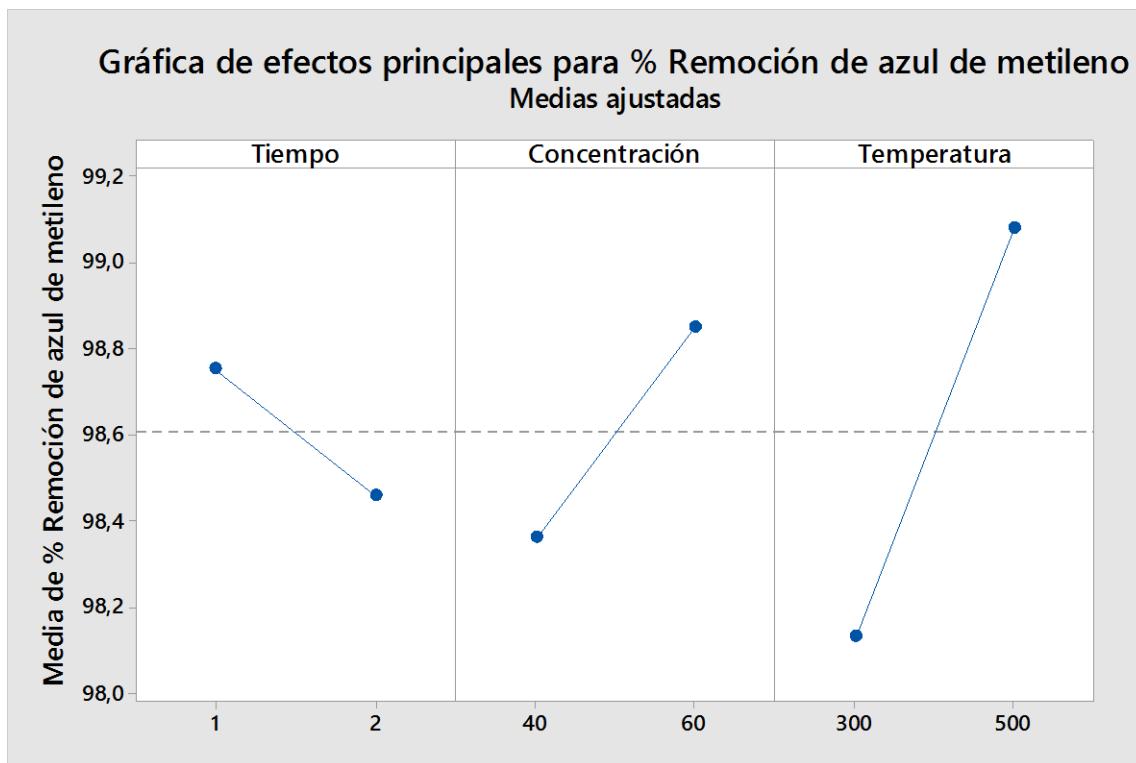
En la figura III-20 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados nos indica que la línea vertical roja representa el umbral de significancia estadística.

Los efectos cuyas barras se extienden más allá de esta línea se consideran estadísticamente significativos.

En la figura se observa que los factores como la "Temperatura" (C) y la "Concentración" (B) son los factores más importantes que influyen en la % Remoción de azul de metileno, siendo el tiempo el tercer factor que tiene significancia, pero no más que la temperatura y concentración.

3.8.2.3. Graficas factoriales % remoción del azul de metileno

Figura III-21. Efectos principales del % de remoción del azul de metileno

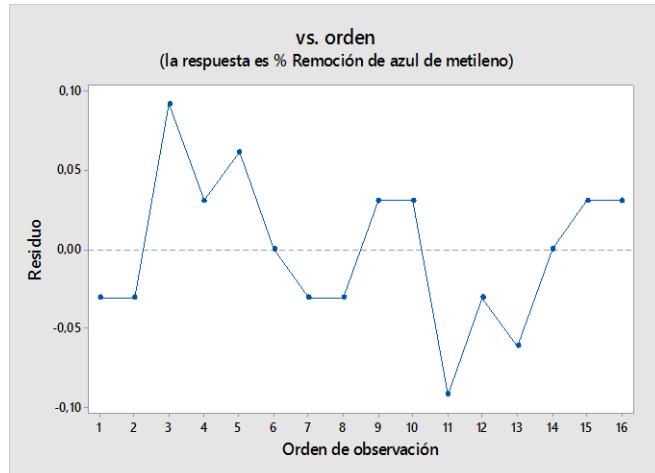


Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La Figura III-21 Grafica de efectos principales del % de remoción del azul de metileno se ve los factores más importantes, siendo estos la concentración, la temperatura y tiempo. La temperatura (correspondiente al nivel alto 500 °C) tiene el efecto más fuerte ya que es muy importante en el proceso de carbonización. El tiempo tiene un efecto negativo ligero, pero su impacto es mucho menor en comparación con la concentración y la temperatura.

Con respecto a la concentración de ácido fosfórico alto (60%) se obtiene un leve aumento del % de remoción del azul de metileno del carbón activado con respecto al nivel alto de la temperatura. Para maximizar la remoción, se recomienda utilizar una concentración de 60% y una temperatura de 500. El tiempo tiene un impacto menor, pero se podría considerar el tiempo 1 si es relevante en el contexto del proceso.

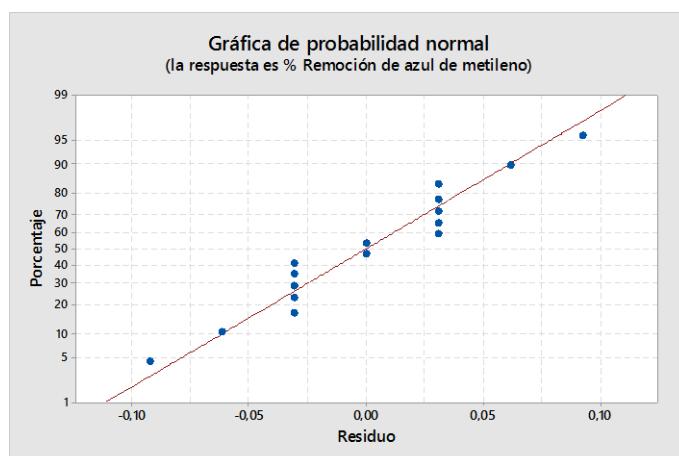
Figura III-22. Residuo vs orden



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La Figura III-22 gráfica de residuos vs. orden de observación sugiere que no hay problemas con el modelo en relación con el orden en que se tomaron las observaciones. Esto respalda la validez del modelo de regresión y sugiere que no hay factores no considerados importantes relacionados con el orden de las observaciones. En resumen, esta gráfica proporciona evidencia de que los residuos del modelo son aleatorios en relación con el orden de observación, lo que respalda la validez del modelo.

Figura III-23. Grafica de probabilidad normal



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La figura III-23 grafica de probabilidad normal nos indica que, si los puntos azules siguen la línea roja de cerca, se considera que los residuos siguen una distribución normal. En este caso, los puntos se ajustan bastante bien a la línea roja, lo que sugiere que los residuos del modelo siguen una distribución normal. Esto es un buen indicio de que el modelo es adecuado y que las pruebas estadísticas y las predicciones basadas en el modelo son fiables.

Tabla III-27. Resultados del % remoción del azul de metileno

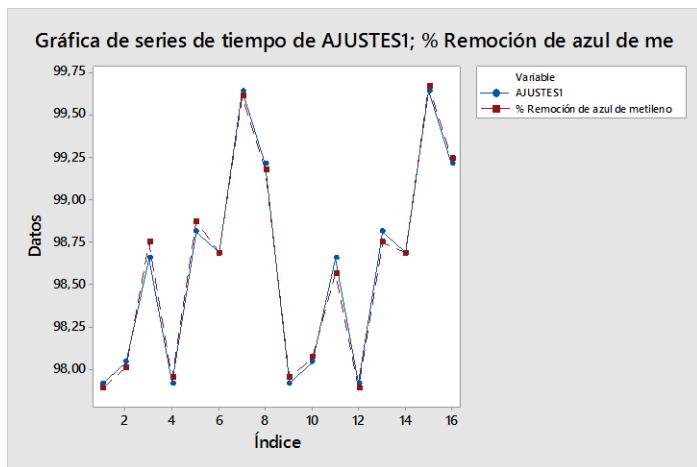
Muestra	% de remoción del azul de metileno	Ajustes	Residuos
1	97,8850	97,9158	-0,0307
2	98,0080	98,0387	-0,0307
3	98,7458	98,6535	0,0922
4	97,9465	97,9158	0,0307
5	98,8687	98,8073	0,0615
6	98,6843	98,6843	0,0000
7	99,6065	99,6373	-0,0307
8	99,1761	99,2069	-0,0307
9	97,9465	97,9158	0,0307
10	98,0695	98,0387	0,0307
11	98,5613	98,6535	-0,0922
12	97,8850	97,9158	-0,0307
13	98,7458	98,8073	-0,0615
14	98,6843	98,6843	0,0000
15	99,6680	99,6373	0,0307
16	99,2376	99,2069	0,0307

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La tabla III-27, se muestra gráficamente la comparación de % de remoción del azul de metileno observado y el % de remoción del azul de metileno del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no

muy significativo.

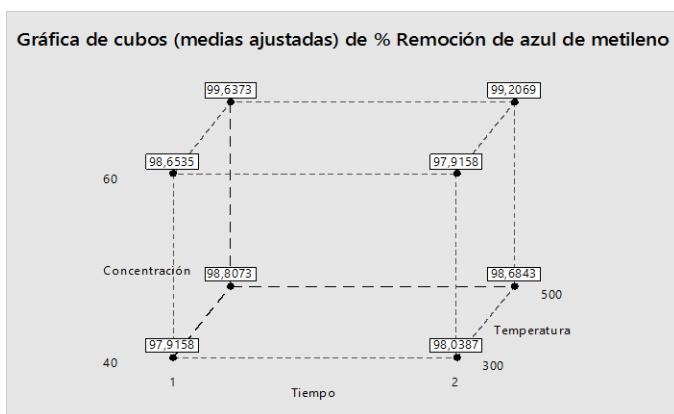
Figura III-24. % de remoción del azul de metileno vs ajustes



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La figura III-24 los valores ajustados por el modelo (ajustes1) siguen de cerca los valores observados del porcentaje de remoción del azul de metileno. Indicando que el modelo de regresión es adecuado y que proporciona una buena representación de los datos. No se observan discrepancias significativas entre los valores ajustados y observados, lo que respalda la validez del modelo.

Figura III-25. Gráfica de cubos



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

En La figura III-25, Grafica de cubos nos proporciona una representación visual útil de cómo los factores tiempo, concentración y temperatura afectan el porcentaje de remoción del azul de metileno permitiéndonos identificar los efectos principales y las interacciones entre los factores, lo que puede ser útil para optimizar el proceso de remoción. Se observa que la mayor remoción (9,6373) se obtiene con la combinación de tiempo 1 hora, concentración 60% y temperatura 500 C.

3.9 Análisis de la determinación de humedad de cáscara de nuez

Tabla III- 28 Estadística del % de humedad

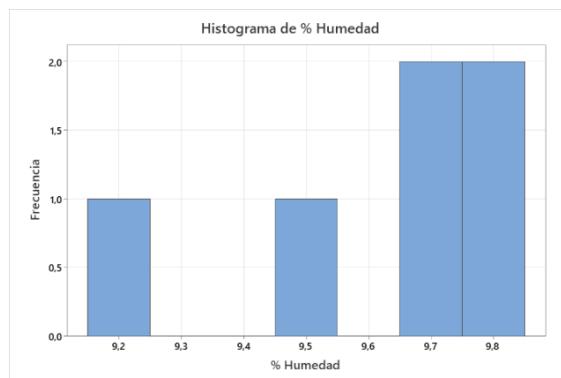
Variable	N	Media	Error estandar	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Q3	Máximo
% Humedad	6	9,605	0,0967	0,237	9,18	9,4125	9,78	9,81

Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

La Tabla III-28, tiene un conjunto de datos de 6 muestras., donde el porcentaje promedio de humedad la cáscara de nuez es de aproximadamente 9,605%.

Los valores de humedad están relativamente cercanos entre sí, como lo indica la desviación estándar baja de 0,2370. Los porcentajes de humedad en las muestras varían desde un mínimo de 9,18% hasta un máximo de 9,81%.

Figura III- 26. Histograma del % humedad



Fuente: Elaboración propia, Minitab 19.

CAPÍTULO IV

COSTOS DEL PROYECTO

4. COSTOS DEL PROYECTO

4.1. Evaluación de Costos

Para determinar los costos del presente proyecto de investigación, se realizó la evaluación de los gastos de la elaboración de todo el proyecto. En las siguientes tablas se muestran los detalles de los costos directos e indirectos del proyecto.

Tabla IV-1. Detalle de costos de reactivos utilizados en la parte experimental y análisis del proceso de obtención de carbón activado a partir de la cáscara de nuez

Nº	Reactivos	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Ácido fosfórico al 85 %	120	l.	1	120
2	Hidróxido de sodio	130	kg.	0,05	6,5
3	Agua destilada	1,5	l.	25	37,5
4	Ácido clorhídrico al 5 %	300	l.	0,5	150
5	Azul de metileno al 1 %	448	l.	0,05	22,4
6	Tiosulfato de sodio 0,1 N	300	l.	0,5	150
7	Yodo 0,1 N	260	l.	2	520
8	Almidón	150	l.	0,1	15
Total					1021,40

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-2. Detalle de costos de materiales.

Nº	Descripción	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Papel filtro Whatman 42	8	Pliegue	4	24
2	Cáscara de nuez	400	arroba	1/2	200
10	Bolsa hermética	2	Pza.	6	12
Total					236

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El resto de los materiales necesarios para la realización de la parte experimental y análisis, fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química, de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla IV-3. Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos

Nº	Actividad	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Investigación en internet	200	Mes	5	1000
2	Impresión	0,50	Hoja	1700	850
3	Anillados	5	Anillado	12	60
4	Empastados	50	Empastado	3	150
5	Transporte diario	2	Pasaje	80	160
6	Mano de obra	15	h	500	7500
Total					9720

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la siguiente tabla IV-6 se observan los valores de costos de energía consumida que se obtuvieron en el balance de energía que se encuentra en el capítulo III.

Tabla IV-6. Detalle de costos energéticos

Nº	Etapa	Energía consumida (kWh)	Costo de kWh (Bs)	Costo (Bs)
1	Secado de la cáscara de nuez	5	0,90	4,5000
2	Molienda	0,0584	0,90	0,0526
3	Tamizado	0,02	0,90	0,0180
4	Filtración	0,0282	0,90	0,0254
5	Activación	1,52	0,90	1,3680
6	Agitación	0,25	0,90	0,2250
7	Secado del carbón activado	24	0,90	21,6000
Total				27,7890

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-7. Detalle de costos totales

Nº	Descripción	Costo (Bs)
1	Costos de reactivos utilizados en la parte experimental y análisis	1021,40
2	Costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental	236
3	Costo de análisis fisicoquímicos	40
4	Costos de servicios y materiales directos e indirectos	9720
5	Detalle de costos energéticos	27,7890
Total		11045,189

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo total de la investigación es de 11045,189 Bs.

4.2. Costos de elaboración del carbón activado de cáscara de nuez

Mediante balances de materia y energía, se estimó el costo de producción de 1 kg de carbón activado a partir de cáscara de nuez. Para esta determinación, se tomó como referencia la muestra M₇, la cual presentó las mejores características en cuanto al % de remoción de azul metileno y el área superficial. Esta muestra se obtuvo mediante la activación con ácido fosfórico al 60%, a una temperatura de 500°C durante 1 hora y con una relación peso/volumen (p/v) de 1:3.

Tabla IV-8. Detalle de costo de elaboración de 1 kg de carbón activado

Nº	Descripción	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Cáscara de nuez	17,39	1 kg	17,39
2	Ácido fosfórico	120	1 L	120
3	Energía eléctrica	0,9	15,4242 kWh	13,8818
4	Mano de obra	5 h	15	75
Total				226,2718

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo base de un kg de carbón activado de manera experimental a escala de laboratorio es de 226,2718 b

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Tras la ejecución completa del proyecto de investigación enfocado en la producción de carbón activado a partir de cáscara de nuez, y una vez analizados los resultados obtenidos en relación con los objetivos planteados, se llega a las siguientes conclusiones.

- Se caracterizó la cáscara de nuez en base húmeda y en base seca, el resultado en base húmeda fue de humedad 9,605% y en base seca de 0,77 %.

La caracterización de la cáscara de nuez reveló un contenido de humedad del 9,605 %, indicando la necesidad de secado previo para su procesamiento, y un bajo contenido de cenizas del 0,77 %, lo cual es favorable para la producción de carbón activado de alta pureza.

- Al comparar las técnicas de activación física y química para la producción de carbón activado, se optó por la activación química ya que el carbón activado obtenido se preparó a escala laboratorio.

La decisión de emplear activación química no implica que sea superior en términos absolutos, sino que es la opción más adecuada para los objetivos de obtención a escala laboratorio (simplicidad, costo y rendimiento). Por otro lado, la activación física, aunque menos práctica a pequeña escala, sigue siendo la técnica dominante en aplicaciones industriales por sus ventajas técnicas y ambientales.

- La cáscara de nuez demostró ser un precursor efectivo para la producción de carbón activado mediante activación química, alcanzando un rendimiento destacable del 38,6204 % en las mejores condiciones evaluadas. Este resultado valida su potencial como materia prima sostenible para la síntesis de adsorbentes, destacando la eficiencia del proceso de activación química en la optimización de su aprovechamiento.
- Para determinar la eficacia del carbón activado obtenido de cáscaras de nuez se

analizaron el área superficial y la capacidad de adsorción mediante pruebas de índice de yodo y remoción de azul de metileno.

El índice de yodo de 682,0167 mg/g indica una alta capacidad de adsorción de moléculas pequeñas, lo que sugiere que este carbón activado es adecuado para la remoción de contaminantes específicos en soluciones acuosas.

El área superficial de 582,0167 m²/g es significativa y contribuye a la alta eficiencia de adsorción observada. Este valor permite una mayor interacción entre el carbón activado y los contaminantes.

La remoción de azul de metileno del 99,6373% demuestra una excelente capacidad para adsorber moléculas orgánicas grandes, lo que es crucial para la purificación de aguas contaminadas con materia orgánica.

- Se determinó que el mejor carbón activado obtenido experimentalmente fue el de la muestra M₇, lo cual de dicha muestra sus parámetros fueron la impregnación de cáscara de nuez con ácido fosfórico a una concentración de 60% con una relación p/v de 1:3, y con una temperatura en la etapa de activación de 500 °C por un tiempo de una hora.
- Se determinó el carbón activado de cáscara de nuez como un excelente adsorbente, Los resultados demostraron una eficacia del carbón activado de cáscara de nuez para remover los iones presentes inicialmente en el agua de lluvia, evidenciado por la reducción de la conductividad de 45,55 µS/cm a 0.079 µS/cm. Esta significativa disminución en la conductividad sugiere una remoción sustancial de los sólidos disueltos totales (SDT).

El carbón activado de cáscara de nuez actuó a nivel molecular de manera similar a una esponja, atrayendo y reteniendo en su superficie las partículas disueltas en el agua de lluvia. Esta reducción de conductividad y sólidos disueltos en el agua de lluvia, comprobaron la eficacia de adsorción del carbón.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que la granulometría de la materia prima sea la adecuada para

realizar la impregnación, no tan grande ni tan pequeña para evitar pérdidas o usar más agente activante.

- Se recomienda después del lavado de la materia prima realizar un secado para que la materia prima no contenga humedad y así se podrá realizar una impregnación adecuada.
- Se recomienda lavar con hidróxido de sodio 1 N, en el caso que las concentraciones utilizadas sean altas ya que si se realiza el lavado con una concentración menor ocasiona que haya perdidas del carbón por el motivo que es difícil llegar a un pH neutro de manera rápida.
- Se recomienda dejar en reposo el carbón en la etapa de lavado, por 2 minutos con agua destilada ya que esto igual facilita el proceso de lavado y hace que se utilice una menor cantidad de agua destilada.
- Mantener el carbón activado protegido de la humedad y de los malos olores, ya que este es un material muy adsorbente y puede ser contaminado, disminuyendo su capacidad de adsorción.
- Se recomienda realizar un análisis de pre factibilidad para la implementación de una planta de producción industrial del carbón activado de cáscara de nuez en el departamento de Tarija.
- Se recomienda la incorporación de sistemas de purificación con carbón activado de cáscara de nuez en los laboratorios de análisis de agua. Priorizar la investigación y el uso de carbón activado para potenciar la eficiencia de los análisis y promover la sostenibilidad.