

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Generalidades

El uso de los materiales de carbón se pierde en la historia, de forma que es prácticamente imposible determinar con exactitud cuando el hombre comenzó a utilizarlos. Lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad denominamos carbones activados, es decir carbones con una estructura porosa altamente desarrollada, ya se empleaban como adsorbentes el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente quemadas (Sevillano y Torres, 2013).

Los primeros usos de carbones activos, fueron preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal), parecen haber tenido aplicaciones médicas. 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. Con posterioridad, en el año 400 a.C., Hipócrates recomienda filtrar el agua con carbón vegetal para eliminar malos olores y sabores y para prevenir enfermedades. Esta práctica se continuó hasta el siglo XVIII como medio para prolongar el suministro de agua en los viajes transoceánicos (Menendez y Gullon, 2006).

La primera aplicación industrial del carbón activo se dio en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorante en la industria del azúcar. Esta aplicación permaneció en secreto por 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas. En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio (Menendez y Gullon, 2006).

En el año 1881 Kayser introduce el término adsorción para describir como los materiales carbonizados atrapaban a los gases. En esta fecha cercana, Von Raphael Ostrejko, quien se considera como el inventor del carbón activado, desarrolló varios

métodos para producir carbón activado tal y como se conoce hoy en día (Grisales y Rojas, 2016).

La primera producción de carbón activado en Estados Unidos se realizó en 1913, en la que los empacadores de carne en Chicago utilizaron por primera vez carbón activado para controlar olores.

En la actualidad el empleo de carbón activo está en diversos campos de industria tales como la industria de los azúcares, la industria química, la industria farmacéutica, en tratamiento de aguas residuales, potables, etc.

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”**. Concluyo que es posible obtener carbón activado de bagazo de azúcar del ingenio de Bermejo, con un proceso de activación química con ácido fosfórico.

En el año 2014 Sánchez, Bravo y Soriano trabajó en la **“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLA DE CACAHUATE (*Arachis hypogaea L.*)”** concluyo que es posible obtener carbón activado de cascarilla de cacahuete, con un proceso de activación química con agente activante KOH y H₃PO₄, en la que las mejores condiciones de activación se dieron con ácido fosfórico.

Descripción General del Producto

El carbón activado es una serie de carbón poroso, amorfo y preparado químicamente para que tengan un elevado grado de porosidad y una alta superficie específica interna. Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo componen, le dan la propiedad de atraer y atrapar ciertas moléculas del fluido que rodea

al carbón. A esta propiedad se le llama “adsorción”; al sólido que adsorbe se le denomina adsorbente y a la molécula atrapada, adsorbato. La unión entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de London, que son una de las clases de fuerzas de Van der Waals. Éstas son relativamente débiles y, por lo tanto, reversibles. Los carbones activados comerciales son preparados a partir de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente materiales orgánicos como madera, carozos o semillas de frutos, cascaras, carbón mineral, breas, turba y coque. La elección del precursor es función fundamental su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final se deben tener en cuenta (Sevillano y Torres, 2013).

El carbón activado es considerado un adsorbente muy versátil debido a que el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa, pueden ser determinados mediante el control de algunas variables involucradas en la producción para satisfacer necesidades en diferentes aplicaciones.

Aplicaciones del carbón activado

El carbón activado tiene una amplia variedad de aplicaciones tanto en medio líquido y gaseoso. En medio líquido abarca la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, decoloración de aguas para su uso en la fabricación de bebidas refrescantes, decoloración y mejora de bebidas alcohólicas (vinos, rones)), entre otras. En medio gaseoso se encuentra sus aplicaciones en el almacenamiento y separación de gases, en máscaras antigás, entre otras (Grisales y Rojas, 2016).

Los contaminantes presentes que son retenidos por el carbón activado de manera más eficaz son:

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

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

En general, el carbón activado pulverizado se aplica en medio líquido mientras el granulado puede ser aplicado en medio líquido y gaseoso.

En el cuadro 1 se puede ver algunas más de las aplicaciones del carbón activado.

Cuadro 1. Aplicaciones del carbón activado

Tipo de carbón activado	Aplicación
Carbón activado granular y extruido o peletizado	Se utiliza principalmente para purificación de gases.
Carbón activado granular y en polvo	Eliminación de cloro del agua y para 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).
Carbón activado granular y en polvo	Clarificación de jarabes en industrias como Coca Cola.
Carbón activado granular	Desodorización de olores en drenajes, plantas de tratamiento de agua, lugares de aplicación de pinturas, lugares que almacenan y aplican solventes.
Carbón activado en polvo	Eliminación de pesticidas, compuestos orgánicos en general y reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).
Carbón activado granular y en polvo	Remoción de grasas, sabores indeseables, aldehídos y fenoles de brandy y la cerveza, como también la decoloración y desodorización de bebidas alcohólicas vinos, rones, etc.

Carbón activado granular	Permite la eliminación de gases ácidos en los laboratorios.
Carbón activado granular	Las industrias refinadoras de aceites y mantecas comestibles son consumidores de carbón activado para usarlo en el proceso de purificación de elementos contaminantes y mejoramiento del color.
Carbón activado granular y en polvo	Se usa en el proceso de producción de azúcar para la decoloración, en la que se adsorben y eliminan impurezas como proteínas, pigmentos y compuestos con olores desagradables.
Carbón activado granular y en polvo	Se usa para tratamiento de aguas residuales, purificando el agua hasta límites aceptables antes de liberarla.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Mercado

Mercado consumidor

El carbón activado posee diversas aplicaciones, lo cual permite tener una amplia gama de potenciales clientes, en especial las industrias que tratan de reducir su índice de contaminación. En el 2021, Bolivia importó \$2,55M en carbón activado, convirtiéndose en el importador número 88 de carbón activado en el mundo. En el mismo año, el carbón activado fue el producto número 359 más importado en Bolivia. Bolivia importa carbón activado principalmente de: Perú, Chile, México, Brasil y Argentina (OEC, 2023).

En el cuadro 2 se muestra los potenciales consumidores de carbón activado en Bolivia.

Cuadro 2. 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.

Fuente: Mamani, 2021.

El precio de carbón activado en polvo en Tarija es de 80 Bs el kg y el carbón activado granular lo mismo 80 Bs.

En el cuadro 3 se muestra los 5 países más importadores de carbón activado en el 2021.

Cuadro 3. Importadores de Carbón activado

Países	Millones USD
Estados Unidos	229
Alemania	180
China	162
Corea de Sur	146
Japón	145

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Mercado competidor

En Bolivia actualmente 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 Carbotecnia. Por otra parte, desde 1997 Ecuador posee una planta perteneciente a la compañía Ekokarbones, cuya capacidad es de 800 toneladas anuales, la cual actualmente produce principalmente carbones activados granulares utilizando como materia prima la cáscara de coco. En Chile, desde 1993 Petrochil posee la única planta existente en el país, cuya capacidad es de 500 toneladas anuales (Sevillano y Torres, 2013).

Bolivia realiza sus importaciones de carbón activado de distintos países, en el cuadro 4 se muestra.

Cuadro 4. Importaciones de carbón activado en Bolivia

Países	Valor (miles USD) Importada en 2018	Valor (miles USD) Importada en 2019	Valor (miles USD) Importada en 2020	Valor (miles USD) Importada en 2021	Valor (miles USD) Importada en 2022
Total	2032	2414	3266	2879	4094
Perú	791	906	1585	940	1240
Estados Unidos de América	62	189	137	108	929
Chile	434	331	358	502	653
México	206	280	342	466	436
Brasil	79	97	322	270	341
Argentina	233	294	279	319	207
China	42	181	88	68	143
India	96	32	59	150	86
Portugal	6	0	0	0	20
Países Bajos	28	12	33	18	15
Paraguay	0	8	9	5	7
Tailandia	0	0	0	0	6
Italia	0	0	1	3	3
Australia	0	0	0	0	2
Francia	0	0	0	0	2
Bélgica	0	0	5	0	1
Canadá	0	0	0	0	1
Alemania	13	30	2	4	1
Eslovenia	0	0	0	0	1
Bulgaria	0	43	0	0	0
Sri Lanka	0	1	0	0	0
Ecuador	0	0	0	3	0
Indonesia	11	0	4	18	0
Japón	0	6	42	0	0
Taipei Chino	0	0	0	4	0
Filipinas	30	0	0	0	0
Otros	1	4	0	1	0

Fuente: ITC, 2023.

Materia Prima

El carbón activado puede ser producido a partir de cualquier material rico en carbono, por ejemplo, la madera, huesos y cáscaras de frutas, entre otros.

La producción de carbón activado se debe partir de una materia prima con propiedades bien definidas tales como abundancia, dureza, estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización. (Bastidas, et al., 2009)

La materia prima que se va usar para realizar el carbón activado es la cáscara de maní, ya que este se genera en grandes cantidades de desecho. La cáscara de maní lo acumulan para diferentes usos, en forma molida o no, es utilizada en alimentación animal principalmente en rumiantes (toros, vacas, ovejas y cabras). También lo utiliza como abono, ya que este no debería ser así, porque la cáscara de maní podría tener hongos (*Aspergillus flavus* y el *Aspergillus parasiticus*) y bacterias, las cuales son dañinas a las plantas. Estos hongos producen aflatoxinas que son conocidas por causar cáncer en los seres humanos, y también causar daños a los animales. Para evitar el acumulamiento de la cáscara de maní, y se generen hongos, como también evitar la quema de estos, se propuso realizar carbón activado a base de esta materia prima cáscara de maní, dándole un valor agregado a este desecho.

Bolivia es el cuarto exportador de maní en América Latina, con 25951 toneladas producidas el 2016. Los cultivos se concentran principalmente en los valles de Chuquisaca, Tarija y Santa Cruz, aunque también está presentes en La Paz, Cochabamba, Pando, Beni y Potosí (San Martín, et al., 2017).

En 2021 la producción nacional de maní superó las 26000 toneladas, siendo los departamentos con mayor producción: Tarija con el 52 %, seguido de Santa Cruz con el 23 % y Chuquisaca con 19 %. Solo Santa Cruz representó casi el 90 % del total de las exportaciones bolivianas de maní. Bolivia exporta maní, el cual es pelado antes de ser enviado, generando grandes cantidades de desecho (IBCE, 2022).

Objetivos

Objetivo general

Obtener experimentalmente carbón activado, a partir de cáscara de maní, variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), cultivada en la comunidad de Sachapera de Yacuiba de la provincia Gran Chaco.

Objetivos específicos

- Caracterizar la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), utilizada como materia prima para la obtención de carbón activado.
- Analizar y seleccionar el proceso tecnológico industrial de obtención de carbón activado de cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).
- Obtener carbón activado granular a nivel laboratorio.
- Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de obtención de carbón activado de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).
- Determinar el rendimiento de la parte experimental de obtención de carbón activado de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).
- Seleccionar los parámetros óptimos para la obtención del carbón activado a partir de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).

Justificación

Justificación Tecnológica

En el presente trabajo de investigación se pretende aprovechar las cáscaras de maní para la obtención de carbón activado ya que actualmente existe un aprovechamiento deficiente de estos residuos sólidos. Este subproducto que es la cáscara de maní se lo usa para alimentos de animales como: toros, vacas, ovejas y cabras, también lo usan como abono. Esto demuestra que es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan aprovechar la cáscara de maní, para darle un valor agregado. Por lo cual en este trabajo de investigación se llevará a cabo el proceso de elaboración de carbón

activado a partir de la cáscara de maní en condiciones determinadas para su posterior aplicación.

Justificación Económica

Con el presente trabajo de investigación se quiere dar un valor agregado a la cáscara de maní, ya que este material tiene un gran potencial de aprovechamiento, el cual generará ingresos económicos adicionales para los productores de maní y a su vez contribuirá a la disposición adecuada de los residuos generados. Además, generara posibilidades económicas para la producción a media y gran escala de carbón activado.

Justificación Social

Mediante esta investigación se plantea generar un impacto social con la producción de carbón activado a partir de la cáscara de maní, cuyo producto obtenido puede ser utilizado para tratamientos de aguas entre otros. Además, debido a la alta demanda que tiene el carbón activado en otros países, se ha convertido en una buena opción de mercado, ya que la producción de carbón activado puede fortalecer y ayudar al desarrollo de la industria del país, generando fuentes de empleos directos e indirectos.

Justificación Ambiental

El aprovechamiento de la cáscara de maní para la obtención de carbón activado ayudaría a disminuir el impacto ambiental que provocaría este subproducto al no darle un tratamiento adecuado. La cáscara de maní generalmente se lo acumula para diferentes usos, en forma molida o no, es utilizada en alimentación animal, también se utiliza como abono y algunos casos lo queman. Al usar la cáscara de maní como abono y alimento animal, se debe tener en cuenta que este podría tener hongos y bacterias, lo cual es dañino para las plantas y animales, como también la quema de la cáscara a cielo abierto producen grandes cantidades de CO₂ y micro partículas en suspensión (humos), como también la degradación del área destinada a la quema. Para evitar la contaminación y los posibles riesgos para el ser vivo, se propuso realizar carbón activado a base de esta materia prima cáscara de maní, dándole un valor agregado a este desecho.

El impacto ambiental que generaría por la producción de carbón activado a nivel industrial son: emisiones de gases con alto contenido de CO₂ y generación de aguas residuales.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

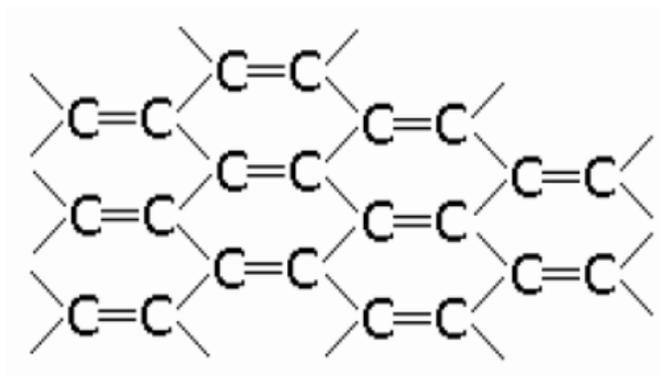
1.1. Carbón Activado

El carbón activado es un producto que está constituido por microcristales elementales, y lo componen estructuras bidimensionales de planos hexagonales de átomos de carbono, como se muestra en la (Figura 1-1), pero que carecen de orden cristalográfico, 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. Los carbones activados pueden adsorber una amplia variedad de sustancias, es decir, que son capaces de atraer moléculas a su superficie interna y por lo tanto actuar como adsorbente (Grisales y Rojas, 2016).

El carbón activado puede ser producido a partir de cualquier material rico en carbono elemental; sin embargo, en la práctica, el carbón y los materiales lignocelulósicos son las dos fuentes principales para la producción de carbones activados comerciales. Los materiales lignocelulósicos son la lignina, hemicelulosa y celulosa. La celulosa es el más importante para la formación del carbón activado y, junto con la lignina permite la elaboración de carbón activado de mayor calidad. La composición, estructura, cualidades y características de los carbones activados dependen de las propiedades físicas y químicas de los precursores, el agente activante, y el procedimiento de preparación (Valencia, 2019).

La adsorción en el carbón se debe a un desequilibrio de fuerzas que se genera en toda superficie formada por átomos de carbono. Este desequilibrio se debe a que los átomos de carbono tienden a formar sus cuatro enlaces perfectamente distribuidos en las tres coordenadas en el espacio. Ya que esto no sucede en los átomos de carbono que forman parte de la superficie sólida, éstos tienden a formar enlaces del tipo de Van der Waals, con las moléculas del fluido adyacente. De manera más específica, los enlaces entre el carbón y el adsorbato se llaman Fuerzas de London, que son las más comunes entre las seis fuerzas de Van der Waals que existen en la naturaleza. Los carbonos del carbón activo, se encuentran combinados en forma de placas graníticas (Pilamonta, 2013).

Figura 1-1. Carbón activado en forma de placas graníticas



Fuente: Pilamonta, 2013.

Estas placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denominan como poros. El área de la mayoría de los carbones activados comerciales está entre 500 – 1500 m²/g (Pilamonta, 2013).

1.1.1. Carbón activado a partir de residuos agroindustriales

La producción de carbón activado se puede realizar con residuos de la agricultura y la industria de la madera, como también de las actividades industriales y municipales, los cuales son competitivos con carbones activados comerciales, esto se logra sobre todo cuando los procesos de activación se optimizan teniendo en cuenta tanto la materia prima utilizada para la producción de carbón como los factores que afectan directamente el proceso de activación. En el cuadro I-1 se puede ver las diferentes aplicaciones de los carbones activados, dependiendo de la naturaleza de los diferentes precursores (Sepúlveda, 2014).

Cuadro I-1. Usos del carbón activado obtenido a partir de residuos agroindustriales

Precursor	Usos
Cáscaras de almendra	Tratamiento de gas industrial (control de la contaminación atmosférica).
Cáscaras de cacahuete, paja de arroz	Adsorción de azul de metileno (purificación de líquidos).
Cáscara de nuez	Trazas de metales.
Cáscara de arroz, cáscara de naranja	Adsorción de colorantes ácidos.
Fibra de palma kernel	Eliminación de iones.
Cáscaras de coco	Eliminación de arsénico.
Paja de trigo	Eliminación de nitratos y plaguicidas.
Cáscara de arroz	Tratamiento de aguas residuales.
Huesos de oliva de Jordania	Tratamiento de agua subterránea.
Cáscara de arroz, cáscara de cacahuete	Eliminación de metales pesados.
Residuo de la producción de azúcar de remolacha	Eliminación de fenoles y compuestos fenólicos.

Fuente: Sepúlveda, 2014.

1.2. Propiedades del Carbón Activado

El carbón activado posee diversas aplicaciones lo cual se puede caracterizar según su elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención.

La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, pero la porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido (Terrazas, 2008).

El carbón activado de baja selectividad de retención tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorante, etc.), mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente (Gonzales y Villalobo, 2020).

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

1.2.1. Los centros activos o zonas de activación

Los centros activos son aquellos que durante la adsorción solo participan las áreas con capacidad de adsorción. Los sitios o centros activos son aquellos átomos de carbono situados en las esquinas y los filos de los cristalitas elementales, y a aquellos situados en lugares defectivos del cristal enrejado que son más reactivos, es decir sus valencias son incompletamente saturadas por interacciones con los átomos de carbono próximo (Ing. Gonzales y Ing. Teruya, 2004).

1.2.2. La porosidad

Durante el proceso de activación, los espacios que existen en la materia prima, originalmente entre los cristalitas primarios, se van quedando libres de diferentes compuestos carbonosos y el carbono es removido parcialmente desde las capas gráficas de los cristalitas elementales. Los espacios entre los cristalitas elementales resultantes son denominados poros, que es la porosidad del carbón activado (Ing. Gonzales y Ing. Teruya, 2004).

1.2.3. Superficie específica

La superficie específica del carbón activado corresponde al área libre, o expuesta, que puede reaccionar con capacidad de adsorción. La superficie específica, cuantificada en m^2 por gramo de carbón (también m^2/kg) es el valor más representativo que indica la calidad de un carbón activado. En la práctica, mientras mayor es la superficie libre del carbón, mayor es su capacidad de adsorción (Ing. Gonzales y Ing. Teruya, 2004).

1.3. Composición Química y Física del Carbón Activado

1.3.1. Composición química

El carbón activado está compuesto aproximadamente de un 70-80% de carbono, del 5 al 10% de cenizas, del 60% de oxígeno y 0,5% en hidrógeno. Dicha composición química del carbón activo tiene un elevado contenido de carbono, al igual que el grafito y los diversos carbones minerales o de leña, todos ellos tienen la propiedad de adsorber, la misma que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que se encuentran contenidas en un medio líquido o gaseoso (López, 2022).

1.3.2. Composición física

1.3.2.1. Tamaño de poros

Los tamaños de poros pueden clasificarse según su función, en poros de adsorción y poros de transporte. Los primeros consisten en espacios entre placas graníticas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.

Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaño, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0,1mm. En esta clase de poros, sólo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la

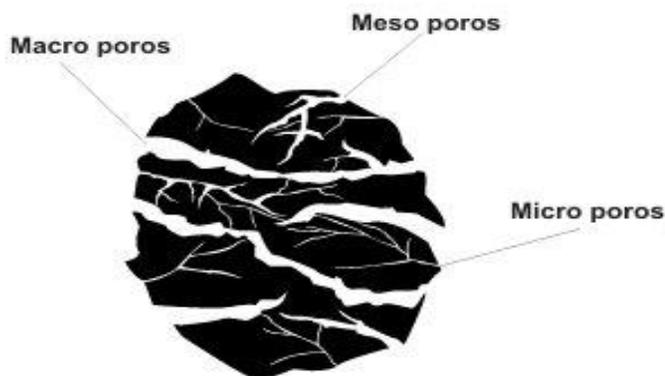
molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor (Cancino, 2011).

1.3.2.1.1. Clasificación de los poros

Los poros se pueden clasificar según la nomenclatura IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), según el diámetro de los mismos, éstos son:

- Microporos. - Menores a 2 nm.
- Mesoporos. - Entre 2 y 50 nm.
- Macroporos. - Mayores a 50 nm (típicamente de 200 a 2000 nm).

Figura 1-2. Gránulo de carbón activado



Fuente: Grisales y Rojas, 2016.

Los microporos retienen moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes. Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son cloradas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica. Los mesoporos retienen moléculas intermedias entre las anteriores. La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación, y la duración del proceso de activación (Pilamonta, 2013). Por lo cual la capacidad del carbón activado para retener una sustancia determinada no solo está dada por su área superficial, sino también por la proporción de poros (Cancino, 2011).

1.4. Tipos de Carbones Activados

El carbón activado se sitúa en tres formas: polvo, granular y extruido o peletizado.

1.4.1. Carbón activado granular

Figura 1-3. Carbón activado granular



Fuente: Céliz y Forneris, 2018.

El carbón activado granular posee una forma irregular que se instalan dentro de un recipiente por el que se hace circular el líquido o gas que va a tratarse. El carbón activado granular se fabrica en diversos rangos de tamaños. Por ejemplo, un 8 x 30 es un carbón cuyas partículas pasan por la malla 8 pero no por la 30. Es decir, un carbón 8 x 30 tiene partículas de entre 0,595 y 2,38 mm (Sevillano y Torres, 2013).

El carbón activado presenta área superficial elevada y a la vez amplitud de poro menor (Carrasco y Londa, 2018).

1.4.2. Carbón activado en polvo

Figura 1-4. Carbón activado en polvo



Fuente: Céliz y Forneris, 2018.

El carbón activado en polvo tiene como principal característica su tamaño. Por definición, es aquél cuyas partículas son capaces de atravesar un tamiz de malla 80, según la norma ASTM E11:95, que forma parte de las American Standard Test Sieve Series (ASTM). En unidades de longitud, esto se traduce en todas aquellas partículas con un diámetro medio de 180 micrómetros (0,18 mm) o menos (Céliz y Forneris, 2018).

Esta variedad de carbón se prefiere en tratamientos en los que se requiere un íntimo contacto entre el adsorbente y el fluido a tratar. Para esto, se lo debe inyectar directamente en el medio, y luego recogerlo mediante algún sistema de separación de partículas. La principal ventaja de este carbón radica en que trabaja a una velocidad mayor que el carbón granular (Céliz y Forneris, 2018). Este tipo de carbón presenta área superficial elevada y a la vez amplitud de poro mayor, además no se utiliza en el tratamiento de gases debido a su tamaño.

1.4.3. Carbón activado extruido o peletizado

Figura 1-5. Carbón activado extruido



Fuente: Céliz y Forneris, 2018.

Esta variedad de carbón se obtiene a través de una pulverización del producto y posterior extrusión a través de presión, o bien con la ayuda de agentes ligantes como brea, alquitrán o glucosa. A diferencia del carbón granular, poseen una forma cilíndrica, es decir que no tienen puntas o bordes filosos, lo cual es una ventaja teniendo en cuenta que se pueden prevenir erosiones o dificultades en las operaciones de lavado. Sus

dimensiones rondan los 4 mm de diámetro y oscilan entre 0,5 y 1,0 cm de longitud (Céliz y Forneris, 2018).

1.5. Métodos de Activación

El carbón activado a nivel comercial es obtenido a partir de materiales orgánicos ricos en carbono, especialmente carbón mineral, madera, huesos, cáscaras de frutas (como, por ejemplo, cáscaras de coco, de nuez y de maní). Los procesos de fabricación se pueden dividir en dos tipos: activación física y activación química.

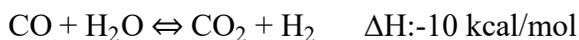
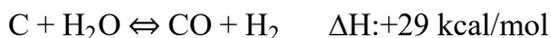
1.5.1. Activación física

Este proceso se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización 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, para dar lugar a un esqueleto carbonoso. 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 °C y 1000 °C, eliminando productos volátiles, y aumentando el volumen de los 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 (Cubillos, 2019).

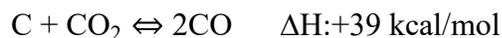
Entre los agentes activantes, el más reactivo es el oxígeno, mientras que el menos reactivo es el dióxido de carbono.

Las agentes activantes dan lugar a las siguientes reacciones químicas donde se eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad.

Activación con H₂O:



Activación con CO₂:



Activación con O₂:

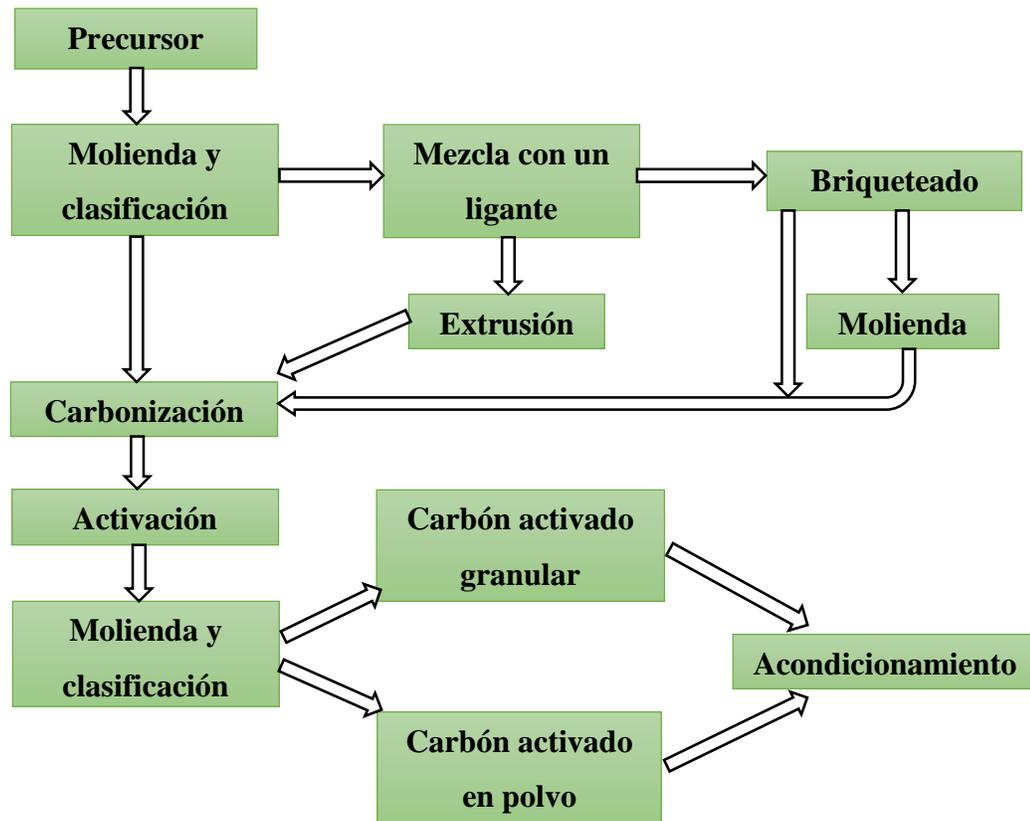


La activación con H₂O y CO₂ forman reacciones endotérmicas lo cual trae consigo que el control del proceso en el horno se pueda realizar con cierta precisión. Mientras que, el balance global de la activación con O₂ indica que la reacción en su conjunto es exotérmica, por lo que es más difícilmente controlable, no limitándose la oxidación a los poros, sino que también se ve afectada la propia superficie de los granos, produciéndose una excesiva pérdida de masa, además de un producto poco uniforme. Por ello, este último método raramente se utiliza (González, 2017).

Las características del carbón resultante están fuertemente influenciadas por el grado de activación, por la naturaleza del agente activante y por el tiempo y temperatura de activación. Dependiendo del tiempo y temperatura del proceso el régimen de control de la reacción de activación puede ser químico o difusional. Durante el régimen químico se produce un mayor quemado de la superficie externa del material, debido a que en el interior de la partícula hay una menor concentración de agente gasificante, pues no da tiempo a que los gases difundan por el interior del material. Por lo tanto, se forman carbones de baja área específica ya que predominan los macroporos. Este comportamiento se produce a elevadas temperaturas. Sin embargo, al disminuir la temperatura y aumentar el tiempo de reacción, el proceso tiene lugar bajo control difusional, optimizándose así la formación de la porosidad (González, 2017).

La carbonización y la activación (gasificación) a escala industrial se realizan principalmente en hornos rotatorios construidos en acero inoxidable y materiales refractarios para soportar las altas temperaturas de activación, cercanas a 1000 °C.

Figura 1-6. Diagrama de activación física del carbón activado



Fuente: Cancino, 2011.

1.5.2. Activación química

La activación química es utilizada generalmente cuando se trabaja con materiales lignocelulíticos.

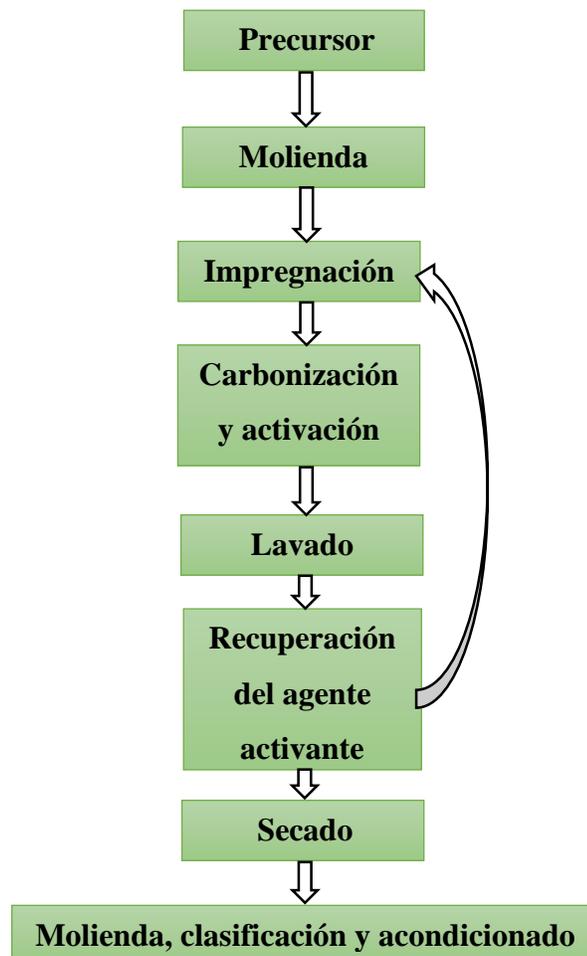
La activación química consiste en la reacción entre el sólido precursor de carbón activado y el agente químico activante, en donde la concentración de los reactivos, la temperatura y el tiempo de activación determinan la extensión de la reacción. Es un proceso que transcurre generalmente en dos etapas. La primera etapa consiste en una impregnación química del material precursor con una disolución concentrada de un agente químico activante. La segunda etapa consiste en someter a la mezcla resultante a un proceso pirolítico, en el cual se produce la carbonización y la activación del material.

El agente químico activante altera el curso de la pirólisis. Promueve la deshidratación del material con el aumento de la temperatura, induciendo a la aromatización del carbón. El material adopta estructura tridimensional rígida en la que comienza a formarse una porosidad incipiente. Al deshidratar el material precursor se generan menos alquitranes durante el proceso de pirolisis. El rango de temperaturas empleado es inferior al empleado en los procesos de activación física, pudiendo variar entre 400 y 900 °C. El carbón activado obtenido se lava para eliminar restos del agente activante, por lo que la porosidad resulta accesible (González, 2017).

Los agentes químicos utilizados para el proceso de activación química (ZnCl_2 , H_3PO_4 , AlCl_3 , MgCl_2 , KOH , NaOH , etc.), los más empleados son: ZnCl_2 , H_3PO_4 y KOH . Una de las principales funciones del agente activante es facilitar la deshidratación del esqueleto macromolecular carbonoso, lo cual influenciará en la subsiguiente descomposición pirolítica del material, reduciéndose con ello la producción de alquitranes y volátiles, incrementado con ello el rendimiento. Asimismo, durante la carbonización del material, el agente activante penetra en el interior de los canales de la estructura botánica, produciendo su hinchamiento, lo cual repercutirá en el desarrollo de una estructura porosa más desarrollada. Es por esto que el grado de impregnación (expresada normalmente como la relación en peso entre agente activante y precursor) es uno de los factores más importantes que determinan el rendimiento final y la porosidad desarrollada. Así, a mayor grado de impregnación mayor superficie específica y tamaño de porosidad se desarrolla en el carbón activado (Plaza, 2015).

Los tres agentes químicos más empleados producen un gran desarrollo de la microporosidad, existe una diferencia entre ellos: el agente KOH produce un ensanchamiento del tamaño de los microporos, el agente ZnCl_2 una produce una microporosidad de tamaño uniforme y genera un pequeño desarrollo de la mesoporosidad, y el agente H_3PO_4 conduce a una distribución de tamaño de poros más heterogénea (González, 2017).

Figura 1-7. Diagrama de activación química del carbón activado



Fuente: Cancino, 2011.

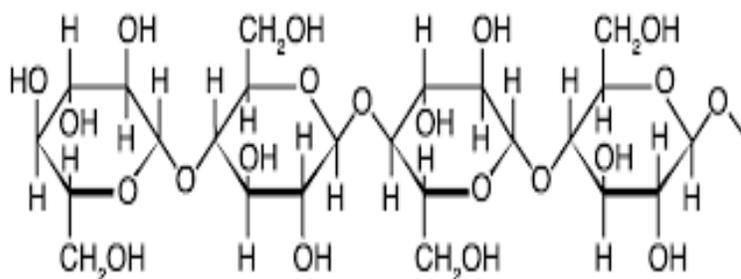
1.5.2.1. Activación química con $ZnCl_2$

Este método fue más usado hasta 1970, especialmente para la activación de residuos de madera. Su uso, sin embargo, se ha restringido mucho en la actualidad, debido a los problemas medioambientales que conlleva el uso del $ZnCl_2$. no obstante, algunos países como China aún siguen usando este método para producir carbón activado (García y Granillo, 2017).

1.5.2.2. Activación química con H_3PO_4

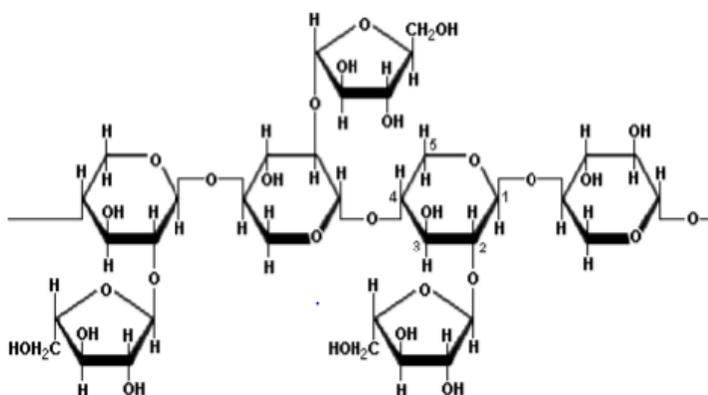
En la activación química con ácido fosfórico, el mecanismo está poco desarrollado, pero se ha realizado investigación realizando un análisis de la química superficial de los carbones activados mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), comparando los espectros generados de distintos radicales antes y después de la activación química en el carbón activado. Se tiene que tener presente los grupos funcionales en los biopolímeros para determinar la formación de los grupos funcionales durante la activación química debido a que algunas estructuras no sufren transformaciones y otras se oxidan, es así que las estructuras de los biopolímeros inicialmente son (García y Granillo, 2017):

Figura 1-8. Esquema de la macromolécula de la celulosa



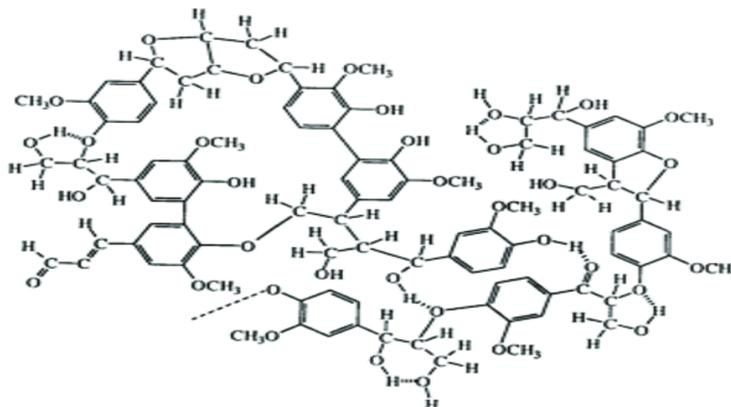
Fuente: García y Granillo, 2017.

Figura 1-9. Esquema de la macromolécula de la hemicelulosa



Fuente: García y Granillo, 2017.

Figura 1-10. Esquema de la macromolécula la lignina



Fuente: García y Granillo, 2017.

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

Los carbones comerciales con bajo contenido de cenizas se preparan ya sea por lavado ácido o por una adecuada selección de la materia prima entre las que se encuentran los materiales lignocelulósicos. Estos lavados se realizan con ácido clorhídrico, ácido fosfórico, esperando que los componentes inorgánicos que contiene dicho material se solubilicen y puedan ser removidos, eliminando compuestos de Na, K, Ca, Mg y Fe (García y Granillo, 2017).

1.5.3. Ventajas y desventajas de los métodos de activación

En el cuadro I-2 se presenta las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de activación.

Cuadro I-2. Ventajas y desventajas de los métodos de activación

Activación química		Activación física	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Rendimientos mayores a los de activación térmica y mayor desarrollo de la porosidad.	Se emplean agentes químicos de alto precio.	Bajo costo	Bajo rendimiento en la etapa de activación.
Se lleva acabo a temperaturas más bajas y menor tiempo de activación.	Es necesario el lavado exhaustivo del carbonizado.	No requiere etapa de lavado.	Mayor temperatura (800-1000°C) y mayor tiempo de activación.

Fuentes: González y Villalobo, 2020.

Las características y propiedades que tiene los carbones activados dependen del material que se usa para producirlo y el método de activación.

La activación física de materiales lignocelulósicos se sigue empleando a escala industrial para la preparación de carbones activados debido a que, al no requerir agentes químicos para la activación, está resulta más económica y menos contaminante.

1.5.4. Importancia de la química superficial de los carbones

Las características químicas superficiales son importantes debido al dominio que se cuenta sobre las propiedades adsorbentes; estas propiedades son escasas por los grupos superficiales que se originan en el proceso de carbonización, que son producidos a partir de los radicales libres insaturados de la superficie del carbón que pueden quimisorber oxígeno (Peña, et al., 2012).

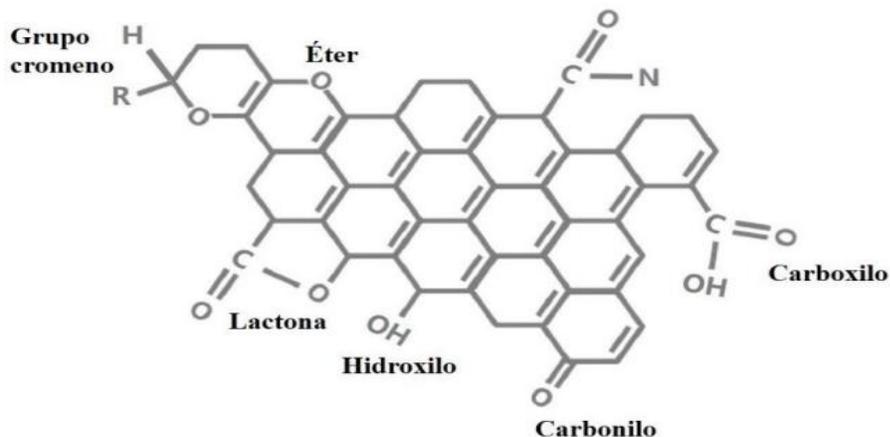
Lo sitios activos específicos se producen por medio de la activación química dando paso a la creación de diferentes grupos funcionales que actúan como adsorbentes para las especies iónicas (Silva, 2017).

Los átomos de carbono de los planos basales contienen orbitales π , que cuentan con electrones más o menos deslocalizados dentro de estos planos basales. Los grupos funcionales creados afectan a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos (Grisales y Rojas, 2016).

Otra parte fundamental de la química superficial de un carbón activo es que durante el proceso de activación le proporciona ciertos grupos funcionales al carbón activado. Estos grupos dependen directamente del método de activación o de la utilización de alguna modificación como una oxidación química que se realice sobre el material. Durante el proceso de activación, el carbón activado cuenta con un carácter hidrófilo y al oxidarse toma un carácter anfótero; esto es lo que permite que el carbón activado cuente con sitios ácidos o básicos, lo cual influye en su adsorción debido a la capacidad que estos grupos le generan al momento de interaccionar con cierta clase de moléculas.

Los grupos funcionales que pueden presentarse en el carbón activado son el hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), carbonilo (-C=O), éter (-O-), amina (-NH₂), lactona (-O=C=O), quinona (-C=O-), cromeno (2H-cromeno, 4H-cromeno, cromenonas, benzocromenos y naftocromenos), pirona, etc.; estos grupos pueden beneficiar en cierta medida la adsorción del material. Estos mencionados grupos funcionales en el carbón activado también se conocen como sitios ácidos o básicos; los principales sitios ácidos son los carboxílicos, lactónicos y fenólicos, de manera inversa los principales sitios básicos son los carbonilos, éteres y quinonas; por lo tanto, un carbón activado con sitios ácidos adsorberá compuestos básicos y uno básico absorberá compuestos ácidos, dependiendo del pH con el que se trabaje (Moreno, Ríos y Flores, 2021).

Figura 1-11. Algunos grupos funcionales en el carbón activado



Fuente: Moreno, Ríos y Flores, 2021.

1.6. Adsorción

La adsorción es una operación unitaria que consiste en la separación de un componente (adsorbato) disuelto en una corriente, gas o líquida, estos se acumulan sobre un sólido (adsorbente) y son removidas. Los sólidos adsorbentes requieren de grandes áreas superficiales y una estructura porosa para que el adsorbato ingrese a la superficie. La adsorción de adsorbatos por el adsorbente se debe a las fuerzas de atracción intermoleculares en sitios específicos del sólido llamados centros activos.

La adsorción se da cuando los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otro compuesto, fuerzas conocidas como “fuerzas de Van Der Waals”, por lo tanto, este fenómeno ocurre en la superficie de un sólido lo que nos indica que a mayor área superficial mejor será la adsorción de otros compuestos.

La propiedad de adsorción de los carbones activados está determinada por su estructura porosa y por su naturaleza química, ya que su estructura posee pequeñas cantidades de heteroátomos como oxígeno, hidrogeno o nitrógeno. Esto permite que el carbón activado retenga las sustancias polares sobre su superficie, ya que los átomos de carbono ubicados en los bordes de los planos presentan una alta actividad disponible, ya que no están saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres (Parejo, et al., 2015).

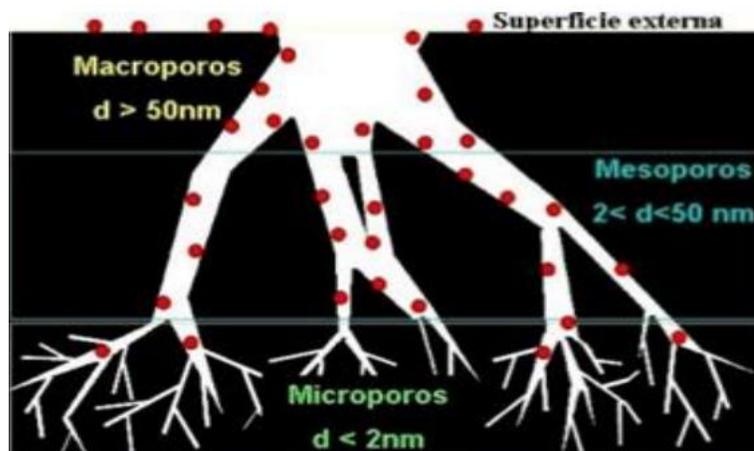
En la actualidad, la adsorción es considerada como una de las mejores técnicas de remoción de contaminantes y entre los adsorbente el carbón activado es el más usado debido a su capacidad para adsorber numerosos compuestos, lo cual se debe a sus propiedades físicas y químicas (García y Granillo, 2017).

1.6.1. Mecanismo de adsorción

Las moléculas en fase de gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en ese caso la superficie es de carbón activado. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macro transporte: Movimiento del material a través del sistema de macroporos del carbón activado (macroporos > 50 nm).
- Micro transporte: Movimiento del material a través del sistema de mesoporos y microporos del carbón activado (microporo < 2 nm; mesoporo 2 - 50 nm).
- Adsorción: Adhesión física del material a la superficie del carbón activado en los mesoporos y microporos del carbón activado (Suárez, 2019).

Figura 1-12. Esquema de la adsorción



Fuente: Pilamonta, 2013.

1.6.2. Tipos de adsorción

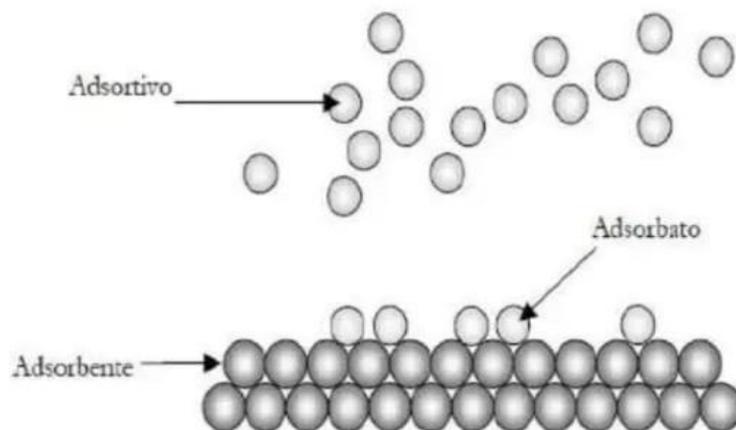
Se diferencian dos tipos de adsorción:

1.6.2.1. Adsorción física o fisisorción

La adsorción del carbón activado se debe a las fuerzas atractivas ejercidas por la enorme área superficial dentro de cada partícula. La mayor parte de esta área superficial se encuentra presente en las paredes de los microporos hacia el interior de las partículas del carbón. Cuando las partículas del carbón entran en contacto con las moléculas de un fluido, estas se difunden dentro del sistema de porosidad e interactúan con las moléculas en la superficie de los poros del carbón. A este tipo de interacción, denominada adsorción física, la molécula difundida es atraída y sostenida hacia la superficie del poro por una débil fuerza molecular; estas fuerzas son principalmente las fuerzas de Van der Waals, razón por la que adsorben moléculas de todo tamaño. Los mecanismos que ocurren en la adsorción de moléculas por parte del carbón activado son: (Gonzales y Teruya, 2004).

- a) Las moléculas del fluido difundido, contenidas dentro de una solución deben migrar hacia la partícula de carbón.
- b) Las moléculas deben migrar a través de una interface, película del líquido circundante a la partícula de carbón, entrando de esta manera hacia el poro.
- c) Las moléculas deben migrar a través del poro para finalmente avanzar hacia el último sitio libre para la adsorción. Cuando todos los sitios disponibles hayan sido agotados, entonces las partículas del carbón quedarán en equilibrio con la solución circundante, por consiguiente, su capacidad de adsorción adicional es agotada.

Figura 1-13. Representación esquemática de la adsorción física



Fuente: Gavino, s.f.

1.6.2.2. Adsorción química o quimisorción

La quimisorción o adsorción química se da cuando las fuerzas son enlaces covalentes, en este el adsorbato forma enlaces fuertes en los centros activos del adsorbente, se asemeja a una reacción química y requiere una transferencia de electrones entre adsorbente y adsorbato, es decir, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida (Gavino, s.f.).

1.6.3. Factores que influyen la adsorción del carbón activado

De compuestos presentes en agua

- Tipo de compuesto: Los compuestos con alto peso molecular y baja solubilidad son mejor adsorbidos.
- Concentración: A mayor concentración del compuesto que se desea eliminar, mayor consumo de carbón, por tanto, más carbón se necesitará.
- Presencia de otros compuestos orgánicos: Si existen otros compuestos orgánicos en la solución también serán adsorbidos por el carbón.
- pH: a pH bajos se adsorben más fácilmente (Carrasco y Londa, 2018).

De compuestos presentes en aire

- Tipo de compuesto: Compuestos con alto peso molecular, baja presión de vapor, alto punto de ebullición y alto índice de refracción son mejor adsorbidos.
- Concentración: A mayor concentración del compuesto, mayor consumo de carbón.
- Temperatura: A menor temperatura, mejor adsorción.
- Presión: A mayor presión, mayor adsorción.
- Humedad: A baja humedad, mayor adsorción (Hidalgo y Rivera, 2017).

1.7. Especificaciones de Calidad del Carbón Activado

Como en el caso de cualquier producto industrial, las distintas propiedades del carbón activado se evalúan a través de métodos analíticos que han sido normalizados por diversas asociaciones. La mayoría de los productores los aplican con el objeto de estandarizar y de permitir al usuario la comparación de las especificaciones de diversos carbones. La ASTM de Estados Unidos es el organismo cuyos procedimientos de evaluación sigue la mayoría de los fabricantes de carbón activado. Sin embargo, existen otros a los que comúnmente se hace referencia. Entre ellos está AWWA estadounidense, la DIN de Alemania, entre otras (Sevillano y Torres, 2013).

En el cuadro I-3 se muestran los principales parámetros especificados para carbón activado granular. Algunos de estos parámetros se aplican también para el carbón activado en polvo como el número de yodo, el contenido de cenizas totales, los solubles en agua, la humedad y el pH. Todas las especificaciones, excepto la de humedad, se refieren al carbón en base seca.

Cuadro I-3. Principales parámetros del carbón activado

Parámetro	Unidades	Rango de valores típicos	Normas
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a1200	ASTM D 4607-14
Área superficial	m ² /g	500 a1200	Adsorción de N ₂ (método BET) ASTM D-3037
Radio medio de poro y volumen de poro	mm y cm ³	0,7 a 500 y 0,2 a 1	Porosimetría con mercurio y adsorción de N ₂ . ASTM C-699
Densidad aparente	g/cm ³	0,26 a 0,65	ASTM D-2854
Dureza	Adimensional	30 a 99	ASTM D-3802
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	Menor a 2,1	ANSI/AWWA B604-90
Contenido de cenizas	% base seca	3 a 15	ASTM D 3174 -04
Solubles en agua	% base seca	0,5 a 7	ASTM D-5029
pH de extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Humedad (al empacar)	%	2 a 15	ASTM D-2867
Longitud de sedimentación	cm	2 a 10	DIN 19603

Fuente: Sevillano y Torres, 2013.

1.7.1. Descripción de las especificaciones de calidad del carbón activado

1.7.1.1. Índice de yodo

El índice de yodo o número de yodo es uno de los parámetros para caracterizar el funcionamiento del carbón activado, mide el nivel de actividad o capacidad de adsorción del carbón activado. El número de yodo está definido como la cantidad en miligramos de yodo adsorbido por un gramo de carbón activado, mientras más alto el número de yodo es mejor la calidad del carbón activado. Este índice de yodo es equivalente al área de superficie del carbón activado en m^2/g , además debido a su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que es llevado a cabo la adsorción, es decir mide el contenido de microporos (García, 2013).

De acuerdo a diferentes vendedores y marcas, los carbones activados con un número de yodo superior a 700 mg/g son carbones activados de calidad superior, carbones activados con número de yodo que esté entre 400 y 700 mg/g son carbones activados de buena calidad, carbones activados con número de yodo entre 200 y 400 mg/g son de mala calidad y carbones con número de yodo inferior a 200 mg/g son de muy mala calidad y/o que no son adsorbentes.

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

1.7.1.2. Índice azul de metileno

El azul de metileno es una de las moléculas más reconocidas de prueba para valorar la capacidad de adsorción de los carbones activados. Este facilita la medida de la estructura de mesoporos del carbón activado. La adsorción del azul de metileno por parte del carbón activado consiste en decolorar la disolución de azul de metileno. La decoloración del azul de metileno es un indicador muy importante, ya que mediante esto se puede saber si el carbón activado va a decolorar el aceite o algún otro líquido.

Para realizar la adsorción del azul de metileno, se prepara una disolución de azul de metileno con una concentración conocida, se mezcla con el carbón activado en polvo

y es agitado a 200 rpm durante 10 minutos a temperatura ambiente. Luego del agitado, la disolución se filtra y la concentración de azul de metileno se determina mediante espectrofotometría, midiendo la absorbancia a 668 nm. La masa adsorbida en el carbón es calculada según:

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

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, para usar en el análisis.

m = Masa de carbón activado en (g) (Padrón, et al., 2013).

Al determinar los mesoporos, este índice permite analizar la capacidad del adsorbente para remover sustancias indeseadas en fase líquida, principalmente contaminantes que le dan color a una sustancia en fase líquida.

1.7.1.3. Índice de melaza

El índice de melaza permite la medida de la estructura de macroporos del carbón activado y es un índice importante para la decoloración. Este método es aplicable a cualquier tipo de carbón activo (García y Granillo, 2017).

Para medir el índice de melaza en la adsorción de carbón activado, se prepara primeramente una solución estándar de melaza con una concentración conocida, generalmente se utiliza una solución de melaza diluida en agua destilada, luego se pesa en un frasco una cantidad específica de carbón activado seco y triturado, para luego entrar en contacto con la solución de melaza preparada. Una vez que entren en contacto se agita la mezcla a una velocidad constante durante un tiempo definido (por ejemplo, 24 horas) para asegurar que el proceso de adsorción se lleve a cabo adecuadamente. Una vez concluido el tiempo de agitado se filtra la mezcla para separar el carbón

activado de la solución de melaza y luego se procede a medir la concentración de melaza en la solución filtrada utilizando un método adecuado, como la espectrofotometría. Mediante esto se puede ver si se decolora la melaza. Para más detalle de cómo medir el índice de melaza se puede guiar mediante las siguientes normas:

- Norma ASTM D4607 - Método para la determinación del índice de melaza del carbón activado.
- Norma ISO 4607 - Método para la determinación del índice de melaza del carbón activado.

1.7.1.4. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa del carbón activado por unidad de volumen, el peso en gramos en base seca por un cm^3 . A densidades menores indica generalmente que existe mayor porosidad y mejor calidad del carbón activado.

Para medir la densidad aparente primeramente se tritura, se tamiza y se seca el carbón activado, para luego vaciarlo en un frasco o cilindro de volumen conocido y asegurarse de que se distribuya uniformemente, para esto se golpea suavemente el frasco o agitarlo para minimizar los huecos y espacios vacíos entre las partículas, para luego medir el volumen del carbón activado utilizando la marca en el frasco. Después se pesa la cantidad de carbón activado que se ha utilizado en el frasco. Con estos datos de volumen y masa de carbón activado se calcula la densidad aparente. Para más detalle de cómo medir la densidad aparente del carbón activado se puede guiar mediante las siguientes normas:

- Norma ASTM D2854 - Método para la determinación de la densidad aparente del carbón activado.
- Norma ISO 2725-1 - Método para la determinación de la densidad aparente del carbón activado.

Según la norma ASTM D2854 – la densidad aparente debe estar entre 0,26 a 0,65 g/cm^3 .

1.7.1.5. Tamaño de partículas

El tamaño de las partículas puede influir en la capacidad de adsorción y en el flujo del líquido o gas a través del material. Un tamaño de partícula muy pequeño facilita la rapidez de la tasa de adsorción, disminuyendo el tiempo de contacto necesario. Esto es debido a que la presión tiende a descender rápidamente, incrementando la adsorción (Hidalgo y Rivera, 2017).

1.7.1.6. Dureza

La dureza del carbón activado se refiere a la medición de resistencia del material a la abrasión y al desgaste durante el uso. Existen varios métodos para evaluarla, aunque desafortunadamente ninguno de ellos simula las condiciones reales que provocan la erosión y el rompimiento del carbón en las diferentes etapas de su uso (García y Granillo, 2017).

Para medir la dureza se toma una muestra de carbón activado se coloca en un tambor giratorio junto con un material abrasivo. El tambor gira durante un período de tiempo específico, y la cantidad de pérdida de masa del carbón activado se mide, esta pérdida de masa es un indicador de la dureza, una menor pérdida de masa indica mayor dureza. Para más detalle de cómo medir la dureza del carbón activado se puede guiar mediante las siguientes normas:

- Norma ASTM D4156 - Método de prueba estándar para la resistencia a la abrasión del carbón activado.
- Norma ISO 8321 - Método para la determinación de dureza del carbón activado.

1.7.1.7. Contenido de ceniza

El contenido de cenizas en el carbón activado se refiere a la cantidad de residuos inorgánicos que quedan después de que el carbón activado ha sido incinerado a una determinada temperatura. El contenido de cenizas reduce toda la actividad del carbón activado y reduce la eficiencia de reactivación (Cubillos, 2019).

Para determinar el contenido de cenizas del carbón activado, primero se seca la muestra de carbón activado a una temperatura controlada para eliminar cualquier humedad. La muestra seca se coloca en un crisol de porcelana o metal resistente al calor y se incinera en un horno a una temperatura alta. Este proceso elimina el carbono y otros materiales orgánicos, dejando solo los residuos inorgánicos o cenizas. Luego las cenizas se enfrían en un desecador y se pesan con precisión. La diferencia de peso, entre la muestra seca original y el peso de las cenizas representa el contenido de cenizas. Para más detalle de cómo medir el contenido de cenizas del carbón activado se puede guiar mediante las siguientes normas:

- Norma ASTM D 3174 –04 - Método para la determinación de cenizas del carbón activado.
- Normas ISO 1171 - Método para la determinación de cenizas. Esta es una norma internacional específica para el procedimiento de determinar el contenido de cenizas en los combustibles minerales sólidos, incluidos los carbones activados.

Según la norma ASTM D 3174 –04 el contenido de cenizas del carbón activado debe estar entre los 3 a 15 %.

1.8. Generalidades del Maní

El maní conocida como cacahuate, es una legumbre de la familia de las Leguminosae, este es un alimento muy versátil, se puede consumir crudo, asado al horno o frito y es uno de los ingredientes más usados en muchas recetas de dulces. A nivel nutricional son una fuente natural de proteínas de alta calidad. El consumo regular de maní ayuda a prevenir enfermedades cardíacas y reduce el colesterol (Pozzo y Vera, 2018).

El nombre científico del maní es *Arachis hypogaea*, su origen se encuentra en las regiones tropicales de Suramérica hace 8000 años. Esto fue gracias a Tom Dillehay, un arqueólogo estadounidense, que halló restos de cacahuets en Perú que datan de hace 7800 años. También existe una teoría menos aceptada que indica que el origen del cacahuate está en Brasil. Posteriormente, gracias a los Incas, se expandió el cultivo del

cacahuete desde la costa andina del Perú al resto de regiones del continente suramericano. Los colonizadores españoles, que lo vieron por primera vez en un mercado de la capital mexicana (Tenochtitlan), lo llevaron a Europa y África, lo cual permitió que su cultivo y su consumo se expandiera por todo el mundo (CURIOSFERA, 2020).

La planta de maní es un pequeño arbusto de 30 - 50 cm. Los frutos crecen debajo de la tierra, entre las raíces, y las semillas están cubiertas de una pared dura, rugosa y leñosa de color café crema, dentro del cual se desarrollan 1 a 5 semillas (Ordoñez, 2019).

El cultivo del maní coincide con la época de lluviosa donde se tienen temperaturas adecuadas para su desarrollo. La cosecha del maní se debe realizar cuando el mayor número de vainas ha obtenido su máximo peso (madurez fisiológica), considerando el tiempo seco.

Cuadro I-4. Taxonomía del maní

Reino	Vegetal
Phylum	Telemophytae
División	Tracheophytae
Sub división	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sub clase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Órdenes	Corolinos
Orden	Rosales
Familia	Leguminosae
Subfamilia	Papilionoideae
Nombre científico	<i>Arachis hypogaea L.</i>
Nombre común:	Maní

Fuente: Ing. M. Sc. Acosta, I., y Ing. M. Sc. Flórez, E. D., 2023.

1.9. El maní en Bolivia

En Bolivia la producción de maní se dirige fundamentalmente al consumo como semilla, sin procesar. Existen productos derivados de maní como el maní tostado en perilla y en grano, maní frito, maní tostado envuelto en caramelo, maní en tablillas y grageas. Los subproductos derivados son: mantequilla de maní, maní para refrescos, maní triturado para confitería, y harina de maní en diferentes presentaciones para sopas, aderezos, salsas y otros usos culinarios. Todos estos productos se ofertan solamente al mercado nacional.

Bolivia es un país que produce gran cantidad de maní, es el cuarto exportador en América Latina, con 25951 toneladas producidas el 2016. En el año 2012-2016, Bolivia exportó maní sin cáscaras a un total de 14 países. Los cultivos del maní se concentran principalmente en los valles de Chuquisaca, Tarija y Santa Cruz, aunque también está presentes en La Paz, Cochabamba, Pando, Beni y Potosí. Para su venta en los mercados, el maní es tostado y descascarado (35 % en peso) generando grandes cantidades de residuos no utilizados o subutilizados (San Martín, et al., 2017).

La temporada de siembra del maní se realiza considerando que la cosecha se realice durante los meses de la época seca. Es decir, la siembra se realiza entre los meses de noviembre a febrero y la cosecha se realiza de abril a julio (Pérez y García, 2013).

En 2021 la producción nacional de maní superó las 26000 toneladas, siendo los departamentos con mayor producción: Tarija con el 52 %, seguido de Santa Cruz con el 23 % y Chuquisaca con 19 %. Solo Santa Cruz representó casi el 90 % del total de las exportaciones bolivianas de maní. (IBCE, 2022).

Bolivia exportó maní en el 2022 principalmente a Perú un 86 %, Colombia 7 %, Ecuador 2 %, y otros 5 %. (IBCE, 2022).

Tabla I-1. Producción por año de maní en Bolivia

Año	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018	2018- 2019	2019- 2020	2020- 2021
Toneladas métricas	25938	25353	26040	28282	26602	26536

Fuente: INE (Instituto Nacional de Estadística), 2019.

Tabla I-2. Producción por año de maní en Tarija

Año	2015- 2016	2016- 2017	2017- 2018	2018- 2019	2019- 2020	2020- 2021
Toneladas métricas	13858	13702	13780	14435	13955	13875

Fuente: INE (Instituto Nacional de Estadística), 2019.

1.9.1. Variedades de maní en Bolivia

En Bolivia existen una gran variedad de maní, los agricultores manejan sus propias semillas de esta gran diversidad de recursos genéticos. Las variedades de maní que se cultivan, consumen y exportan se diferencian y denominan básicamente por el color de la cubierta de la semilla (Ordoñez, 2019).

1.9.1.1. Maní Overo: Único en el mundo. El color del grano es “abigarrado y blanco”. Sus rendimientos promedio en grano alcanzan los 1600 kg/ha y sus zonas de adaptación son: Yacuiba, Caraparí y Entre Ríos en el departamento de Tarija.

1.9.1.2. Maní Bayo: El color del grano es un castaño claro, típicamente “bayo”, cuyo potencial de rendimiento puede superar los 1700 kg/ha, y se adapta a las zonas productoras de Entre Ríos, Caraparí, Villamontes y Yacuiba.

1.9.1.3. Maní Colorado: El color del grano es colorado intenso y su rendimiento puede llegar a los 1400 kg/ha. y se adapta a las condiciones de producción de Yacuiba y Caraparí en el departamento de Tarija.

1.9.1.4. Maní Cartucho: Este es un tipo de maní de grano pequeño, colorado. Es muy apreciado por su sabor cuando es preparado como tostado de maní, sobre todo para el autoconsumo. Está difundido en las zonas productoras en el departamento de Tarija.

Figura 1-14. Principales variedades de maní en Bolivia



Fuente: Boris, 2022.

1.10. Cáscara de Maní

La cáscara de maní, es un subproducto de cosecha que ocurre cuando se retira las semillas de la vaina, la cual tiene un alto contenido de fibra, muy baja en calorías y proteínas. La vaina leñosa que contiene de 1 a 5 semillas, es muy rica en grasa a diferencia de otras leguminosas; la cascara de maní representa aproximadamente el 35 % del total de la vaina (Jaramillo, 2019).

En Bolivia se genera grandes cantidades de cáscara de maní que son los residuos no utilizados o subutilizados. La cáscara de maní en forma molida o no, es utilizada en alimentación animal principalmente en rumiantes (toros, vacas, ovejas y cabras). También lo utiliza como abono u otras veces lo queman. Al usar como abono la cáscara de maní, podría tener hongos y bacterias, las cuales son dañinas a las plantas, como también a las personas, ya que estos hongos producen aflatoxinas que son conocidas por causar cáncer en los seres humanos, y también causar daños a los animales. Para esto se propuso obtener carbón activado a partir de la cáscara de maní y darle un valor agregado, ya que estando acumulado la cáscara de maní, genera los hongos y bacterias.

La cáscara de maní está formada aproximadamente del 95 % de materia orgánica y 5 % de minerales presentes en las cenizas, que generalmente son: silicio, calcio, magnesio, potasio, aluminio, fósforo, azufre y cloro. La composición química de la cáscara de maní está formada principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa, además contiene polisacáridos, lípidos, proteínas, minerales, azúcares libres y resinas (Santa, 2012).

1.10.1. Limitaciones de cáscara de maní

Los cacahuets son particularmente delicados a la contaminación por hongos *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*. Estos hongos producen aflatoxinas que son conocidas por causar cáncer en los seres humanos, aumentar incidentes de virus de la hepatitis B y C, disminuir la respuesta inmune, afectar el crecimiento en niños y causar cirrosis en la infancia. En las aves de corral y el ganado, las aflatoxinas pueden causar pérdida de apetito, pérdida de peso, disminución de la producción de huevos, y la contaminación de la leche (ICRISAT, 2016). La contaminación por aflatoxinas se puede producir en el campo, después de que se levanten los cacahuets, antes de la cosecha, durante el transporte, y durante el almacenamiento (Payne, 2016). Las cáscaras de cacahuete o maní, como otras partes de su fruta, pueden estar contaminadas con aflatoxinas.

1.10.2. Composición química de la cáscara de maní

La cáscara de maní es un material muy liviano, su peso específico es aproximadamente de 100 kg/m^3 . El tamaño de la cáscara es variable y se encuentra en función de la cantidad de granos que ésta pueda alojar. Debido a su geometría cóncava, la cáscara permite que una gran cantidad de aire se aloje en su interior dando por resultado un bajo peso específico. También la cáscara es difícilmente degradable en su exposición al exterior, debido a su alto contenido de lignina y bajo contenido de nitrógeno.

Según los datos publicados (Gurevich, Bonelli y Cukierman, 2015) indican que la cáscara de maní posee 30,9 % de lignina, 54,6 % de celulosa y 14,5 % de hemicelulosa.

Estas composiciones de cáscara de maní van depender de la variedad del maní y las características del cultivo.

Cuadro I-5. Composición química de la cáscara de maní

Contenido	Cantidad %
Humedad	8 - 10
Proteína cruda	6 - 7
Grasa	1 - 2
Fibra Cruda	60 - 67
Celulosa	35 - 45
Lignina	27 - 33
Ceniza	2 - 4

Fuente: Woodroof, 1983.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL

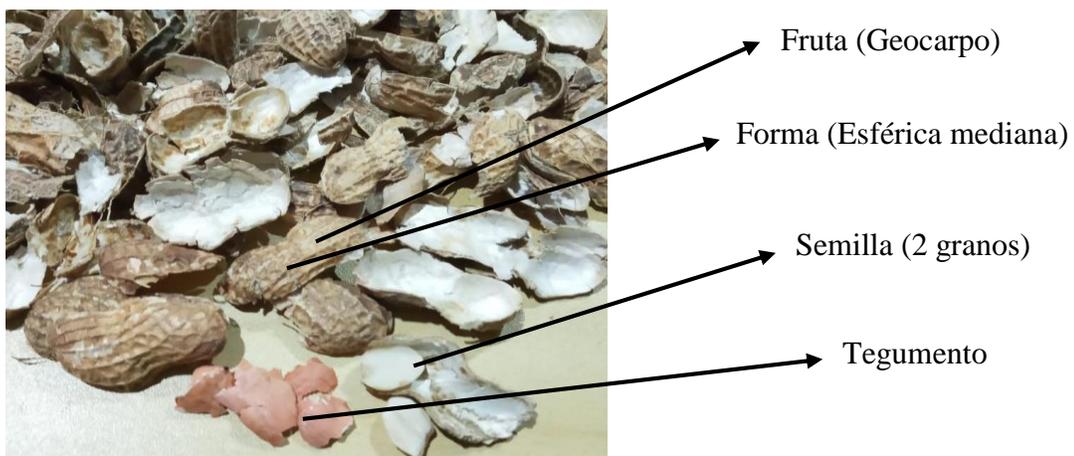
2.1. Materia prima para la obtención de carbón activado

La materia prima que se va usar para realizar el carbón activado, es la cáscara de maní de variedad Maní Bayo (*Arachis hypogaea L.*), esta materia es adquirida de la comunidad de Sachapera de Yacuiba. Yacuiba es una ciudad y municipio de Bolivia que está ubicada en el departamento de Tarija, y es la capital de la provincia Gran Chaco.

Se seleccionó la cáscara de maní variedad de maní bayo porque un compañero de la carrera de Ing. Química tiene su papá que es agricultor que se dedica a sembrar maní de variedad maní bayo. Entonces esto me facilito que pudiera conseguir la cáscara de maní asegurándome que realmente es de variedad maní bayo y no otra.

La planta de maní de variedad maní bayo tiene una altura de 14 - 25 cm, es de tamaño mediano de color verde oscuro, su ciclo de crecimiento es de 145 - 150 días, se siembra en los meses de octubre, noviembre y diciembre y se cosecha en los meses de mayo, junio, y julio. Este tipo de maní se siembra más en Entre Ríos, Caraparí, Villamontes y Yacuiba. Este maní Bayo es tipo Runner, contiene dos granos por vaina, posee una forma esférica mediana y el color de la semilla es crema o “bayo”.

Figura 2-1. Maní bayo



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.2. Selección del Método Tecnológico Industrial para la Obtención Experimental de Carbón Activado de la Cáscara de Maní

Como se vio en el capítulo I, existen dos métodos para la obtención de carbón activado, el método de activación química y el método de activación física. Para su selección se usó el método de factores ponderados, el cual realiza un análisis cuantitativo en el que se compararán entre sí los dos métodos de activación, el cual se seleccionará el mejor método para la obtención de carbón activado, de acuerdo a la puntuación más alta. Se realizó tablas con las alternativas de los métodos de activación, como también se realizó un cuadro de los factores que se evaluó para la selección del método de activación. La calificación se realizó de acuerdo a una escala predeterminada del 1 al 10.

En la tabla II-1 se establecieron las calificaciones ponderadas.

Tabla II-1. Escala de calificación

Calificación	
Escala de Puntuación	Puntuación
Malo	1 - 2
Regular	3 - 4
Bueno	5 - 6
Muy bueno	7 - 8
Excelente	9 - 10

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En el cuadro II-1 se observa los factores que se evaluarán en los métodos de activación y el porcentaje que tendrá cada factor.

Cuadro II-1. Factores a evaluar

Factor evaluado	Peso relativo (%)	Comentario del evaluador
Aplicabilidad del método y disponibilidad de equipamiento	10	Los métodos de obtención de carbón activado son dos, activación física y química, en el primer caso la activación se puede realizar empleando una corriente gaseosa de dióxido de carbono, oxígeno o vapor de agua como activante y en el segundo caso se usa agentes activantes como ácido fosfórico, hidróxido de potasio y cloruro de zinc entre otros. Se tiene más disponibilidad de equipamiento para realizar el método químico, ya que para el método físico se necesitan equipos que trabajen a temperaturas muy elevadas.
Generación de residuos	10	En todos los métodos se generarán residuos.
Confiabilidad del método	5	El método más utilizado con diferentes materias primas es el método químico ya que es muy bueno para trabajar con materiales lignocelulíticos.
Costo	30	Inversión, costos de operación y mantenimiento, costo de energía y agua.
Operación	20	Flexibilidad de operación, confiabilidad del proceso y complejidad de operación del proceso.
Rendimiento	10	El rendimiento por el método de activación química es mucho mejor que el de la activación física, esto se puede ver viendo las ventajas y desventajas que se muestran en el cuadro I-2.
Calidad	10	Los carbones activos con más calidad, son obtenidos mediante activación química.
Impacto al medio ambiente	5	La activación física del carbón es contaminante con gases como el CO ₂ , mientras que la activación química puede generar contaminación en el agua, aunque este impacto se puede reducir haciendo la recuperación del agente activante.
Total	100	

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla II-2 se ve la selección del método experimental de obtención de carbón activado a partir de cáscara de maní, donde se califica los factores evaluados a cada método y se le asigna una puntuación del 1-10, 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%.

Tabla II-2. Selección del método experimental para la obtención de carbón activado de cáscara de maní

Factores evaluados	Peso relativo (%)	Métodos de activación			
		Método de activación química		Método de activación física	
		A	B	A	B
Aplicabilidad del método y disponibilidad de equipamiento	10	9	0,9	4	0,4
Generación de Residuos	10	7	0,7	7	0,7
Confiabilidad del método	5	9	0,45	6	0,3
Costo	30	5	1,5	7	2,1
Operación	20	9	1,8	7	1,4
Rendimiento	10	9	0,9	6	0,6
Calidad	10	9	0,9	6	0,6
Impacto al Medio Ambiente	5	5	0,25	6	0,3
Puntuación final			7,4		6,4

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla II-2, se observa que la activación química tiene mayor puntaje final respecto a la activación física para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de maní, por lo cual el método que se aplica es el de activación química además de contar con las condiciones y equipos en Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.

Para la activación química existen diferentes agentes activantes, para lo cual se debe seleccionar el agente activante más adecuado. Para la selección se usa el método de factores ponderados, el cual realiza un análisis cuantitativo en el que se compararán entre sí las diferentes alternativas, el cual se seleccionará el mejor activante químico de acuerdo a la puntuación más alta que se verá en la tabla II-3.

Donde:

A = Calificación.

Peso relativo (%) = Calificación del factor evaluado.

$C = (A \times \text{Peso relativo (\%)}) / 100 \%$.

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

Factores evaluados	Peso Relativo (%)	Alternativas			
		ZnCl ₂		H ₃ PO ₄	
		A	C	A	C
Eficiencia	40	8	3,2	9	3,6
Disponibilidad	30	7	2,1	9	2,7
Costo	15	8	1,2	9	1,35
Impacto Ambiental	15	3	0,45	7	1,05
Puntuación Final			6,95		8,7

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla II-3 el reactivo activante que se utiliza es el H_3PO_4 , quien tiene mayor puntuación final con respecto a la otra alternativa.

Martínez de Yuso Ariza, A. (2012), señala que el H_3PO_4 , se usa como agente activante de materiales lignocelulósicos, aumenta el volumen de microporos, pero también permite el desarrollo de los demás tamaños de poro de una forma proporcional, lo que produce carbones activados con diferentes volúmenes de microporo pero con una misma distribución de la microporosidad.

El uso de H_3PO_4 como agente activante permite obtener carbones activados con altas capacidades de retención para compuestos orgánicos volátiles, superiores a las que se consiguen empleando otros agentes activantes. Con relación al cloruro de zinc (ZnCl_2) su uso está en declive debido a la contaminación que puede resultar de su mal manejo a escala industrial y que el costo del mismo es mayor que el de otros activantes (Oña, 2017).

2.3. Diseño Experimental

El diseño de experimentos es fundamental en la investigación científica, nos ayuda a identificar qué factores o variables afectan el comportamiento de un proceso productivo.

2.3.1. Variables dependientes

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

2.3.2. Variables independientes

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

2.4. Diseño Factorial

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca, el diseño factorial 2^k es una de ellas. Este describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta (Medina y López, 2011).

Los diseños factoriales son los más utilizados en los experimentos con dos o más factores, es decir, con dos o más variables independientes, las cuales serán analizadas al ser consideradas por el investigador como variables que afectan al proceso. Los valores en los que se puede trabajar con cada uno de los factores se les denomina niveles, es decir los niveles son el valor, puede ser cuantitativo o cualitativo, que puede tomar cada uno de los factores dentro del experimento (Fernández, 2020).

En un diseño factorial, cada uno de los niveles de cada factor independiente se combina con cada uno de los niveles de los demás, para así realizar todas las combinaciones posibles. Cada una de las combinaciones se convierte en una condición para el experimento. Esto produce que los experimentos sean más eficientes. Es decir, un diseño factorial estudia los efectos producidos por dos o más factores (variables independientes), con sus respectivos niveles al momento de las combinaciones que se realiza (Fernández, 2020).

El diseño factorial que se planteó para el presente proyecto de investigación es 2^k . Es decir, que se aplicara un diseño factorial 2^3 , en el cual se tienen 3 factores o variables independientes, 2 niveles y 2 repeticiones, y sobre esto se evalúa las variables respuestas.

El número de experimentos que se va a realizar se expresa en la siguiente ecuación:

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^3) \times 2 = 16 \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

Esto quiere decir que se van a realizar 8 experimentos, cada una de estas tendrá su replica que sumado nos dará 16 número de experimentos.

Los factores o variables que influyen más en el proceso fueron determinados según bibliografía consultada, son la concentración del H_3PO_4 , tiempo y temperatura de carbonización o activación.

En la tabla II-4 se ven las variables y niveles que se tomaron en cuenta.

Tabla II-4. Variables y niveles

Variables	Unidad de medida	Niveles	
		Bajo (-)	Alto (+)
Tiempo de activación (Variable 1)	Horas (h)	2	3
Concentración de H_3PO_4 (variable 2)	Porcentaje (%)	30	35
Temperatura de activación (Variable 3)	Grados Celsius (°C)	500	600

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los niveles son representados por (-1) y (+1) donde: (-1) representa el nivel bajo y (+1) el nivel alto de cada variable.

Tabla II-5. Matriz de experimentos y plan de experimentos

Prueba	Matriz de experimentos			Plan de Experimentación		
	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)
1	-1	-1	-1	2	30	500
2	+1	-1	-1	3	30	500
3	-1	+1	-1	2	35	500
4	+1	+1	-1	3	35	500
5	-1	-1	+1	2	30	600
6	+1	-1	+1	3	30	600
7	-1	+1	+1	2	35	600
8	+1	+1	+1	3	35	600

Fuente: Elaboración propia, 2023.

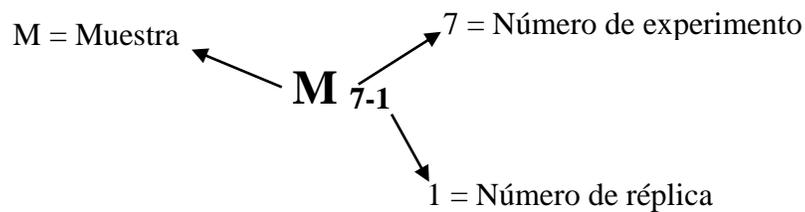
A partir de este punto se les da una codificación a las muestras para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de maní de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla II-6. Codificación de los experimentos de obtención de carbón activado

Muestra	Plan de Experimentación		
	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)
M ₁₋₁	2	30	500
M ₂₋₁	3	30	500
M ₃₋₁	2	35	500
M ₄₋₁	3	35	500
M ₅₋₁	2	30	600
M ₆₋₁	3	30	600
M ₇₋₁	2	35	600
M ₈₋₁	3	35	600
M ₁₋₂	2	30	500
M ₂₋₂	3	30	500
M ₃₋₂	2	35	500
M ₄₋₂	3	35	500
M ₅₋₂	2	30	600
M ₆₋₂	3	30	600
M ₇₋₂	2	35	600
M ₈₋₂	3	35	600

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Descripción de la abreviación M₇₋₁:



2.4.1. Especificación de las variables del diseño factorial

Las variables que se eligió para la obtención del carbón activado de cascara de maní son la concentración del ácido fosfórico, la temperatura y tiempo de activación. Se eligieron estas variables en base a diferentes fuentes de información bibliográfica, ya que estas variables son las que influyen en el proceso de obtención de carbón activado.

Concentración del agente activante: El ácido fosfórico como agente activante es apto para materiales lignocelulósicos como el de la cáscara de maní, además este permite desarrollo de los tamaños de poros de una forma proporcional.

La concentración del ácido fosfórico influye en la estructura porosa y el área superficial del carbón activado es por eso que se optó trabajar con dos concentraciones de ácido fosfórico de 30 % y 35 % según las pruebas preliminares realizadas.

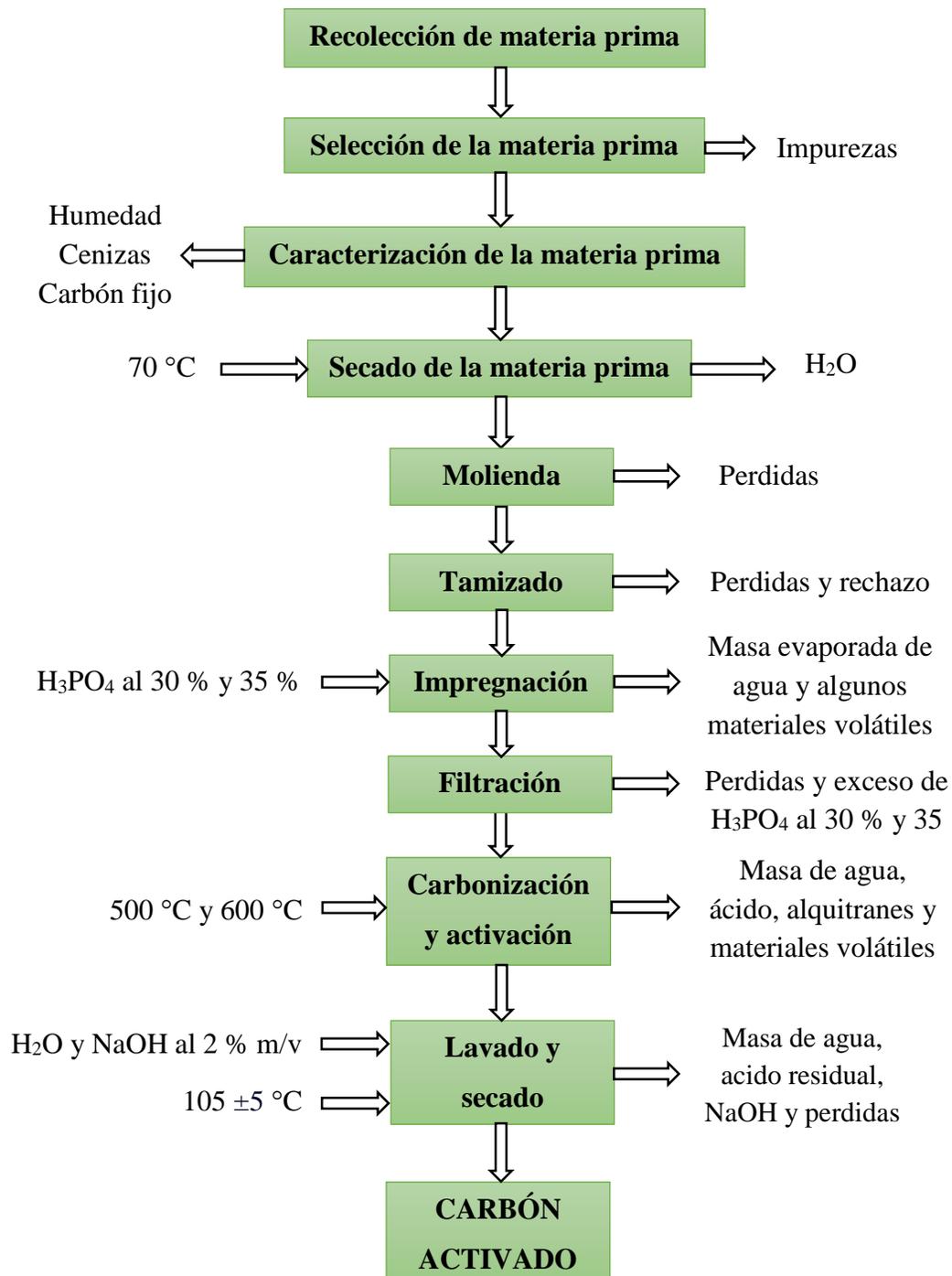
Temperatura: La temperatura utilizada en la etapa de activación es de 500 °C y 600 °C, en base a diferentes fuentes de información bibliográfica relacionadas con la etapa de activación, ya que a temperaturas elevadas se obtiene un carbón activado de buena calidad. No se usó una temperatura mayor a 600 °C en la etapa de activación, ya que durante la prueba preliminar el crisol se pega en la mufla a una temperatura de 700 °C, además de producir una cantidad baja de carbón activado. Por lo que se vio conveniente trabajar con las temperaturas de 500 °C y 600 °C.

Tiempo: Para el tiempo de activación se definió dos tiempos diferentes que son 2 y 3 horas. No es recomendable ampliar el tiempo de activación ya que la muestra podría convertirse en cenizas.

2.5. Descripción del Método Experimental Seleccionado para la Obtención de Carbón Activado Granular de Cáscara de Maní

En la figura 2-2, se observan las etapas del método de activación química que se va a realizar durante la parte experimental para la obtención de carbón activado granular a partir de cáscara de maní, mostrando con claridad los parámetros que se tomarán en cuenta en cada etapa.

Figura 2-2. Diagrama de bloques del método de activación química a emplear para la obtención experimental de carbón activado granular de cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia con datos de la bibliografía, 2023.

2.5.1. Recolección de materia prima

La materia prima que se utilizó en el estudio, es la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*). Esta materia prima fue extraída de la comunidad de Sachapera que se encuentra en Yacuiba, que es la capital de la Provincia Gran Chaco del departamento de Tarija.

En la figura 2-3 se muestra la cáscara de maní extraída de Yacuiba.

Figura 2-3. Cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.2. Selección de la materia prima

La selección de la cáscara de maní se realizó en el domicilio del universitario del presente trabajo, ya que se lleva mucho tiempo en separar las impurezas.

Las impurezas con la que vino la cáscara de maní son: tegumento de maní, semillas (grano) de maní, tierra, raíces y troncos pequeños de la planta de maní. Para esto se realizó una zaranda de 50 x 40 cm, con un diámetro de 1 cm por lado sus orificios.

La zaranda se usó para tamizar manualmente para la separación de la cáscara de maní, en lo que las raíces más pequeñas, tegumento, semillas y tierra, pasaron por el orificio de la zaranda, y las más grandes impurezas como troncos y raíces se retiró

manualmente, ya que quedaron en la zaranda junto con la cáscara de maní, esto se ve en la figura 2-4. Una vez seleccionado la cáscara de maní se embolso en un yute o saco para el siguiente proceso.

Figura 2-4. Selección de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.3. Caracterización de la materia prima

La caracterización de la cáscara de maní se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS, ya que este cuenta con los equipos para realizar los análisis de porcentaje de humedad, contenido de cenizas, contenido de material volátil y contenido de carbón fijo.

2.5.3.1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de maní

El análisis de humedad de la cáscara de maní, se realizó en un secador de infrarrojos de marca Sartorius.

Figura 2-5. Secador de infrarrojos



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento

Para el control de humedad se realizó los siguientes pasos:

- Se rompió la cáscara de maní en pequeños pedazos ya que es voluminoso y no se puede realizar un buen control de humedad.
- Se encendió el secador de infrarrojos, luego se colocó el platillo receptor al secador y se tara llevándolo a cero.
- Se colocaron 5 g de cáscara de maní en pequeños pedazos, en el platillo receptor para luego ser analizado.
- Se programó el análisis a una temperatura de 105 °C y el secado hasta un peso constante.
- Una vez finalizado el análisis se procedió a anotar el dato requerido.

Para corroborar el análisis del contenido de humedad de la cáscara de maní se acudió al laboratorio de CEANID, para esto se llevó 150 g de cáscara de maní en una bolsa plástica para realizar su respectivo análisis de humedad.

2.5.3.2. Determinación de cenizas de la cáscara de maní

Para la determinación del contenido de cenizas de la cáscara de maní. se guio mediante la bibliografía de: López, 2022; Mamani, 2021; García y Granillo, 2017 y mediante la norma de la American Society for Testing and Materials (Norma ASTM D 3174 – 04) (Anexo 2).

Procedimiento

- Calentar un crisol con tapa por 30 min en una mufla a 650 °C, transcurrido este tiempo apagar la misma y esperar a que baje la temperatura a 150 °C. Esto se realiza para eliminar el contenido de humedad del crisol y así evitar errores de peso.
- Abrir la mufla y con ayuda de las pinzas retirar el crisol y colocarlo en el desecador hasta temperatura ambiente.
- Se pesó el crisol en una balanza y se anotó el dato.
- Se taró el peso del crisol a cero y se pesa 2 g cáscara de maní seca en pequeños pedazos.
- Con ayuda de una pinza se introduce el crisol con la muestra y su tapa a la mufla, a una temperatura de 700 °C durante 60 min, como se observa en la figura 2-6.

Figura 2-6. Determinación de cenizas



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Una vez transcurrido el tiempo se apaga la mufla y esperar a que baje la temperatura hasta llegar a 150 °C.
- Retirar con ayuda de unas pinzas el crisol con la muestra de la mufla, y se procedió a colocarlo dentro de un desecador hasta que su temperatura disminuya a la temperatura ambiente. Posteriormente se pesa el crisol con la muestra y se registra el dato.

El porcentaje de cenizas se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{Cenizas} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100 \quad (\text{Ecuación 2-3})$$

Donde:

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

B = Masa del crisol vacío, en gramos.

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

Para corroborar el análisis del contenido de cenizas de la cáscara de maní se recurrió al laboratorio de CEANID, para esto se llevó 150 g de cáscara de maní en una bolsa plástica para realizar su respectivo análisis de cenizas.

2.5.3.3. Determinación de material volátil de la cáscara maní

Para la determinación del material volátil se guio mediante la bibliografía de: Mamani, 2021; López, 2022; y García y Granillo, 2017. Esto consiste en:

- Calentar un crisol con tapa por 30 min en una mufla a 650 °C, transcurrido este tiempo apagar la misma y esperar a que baje la temperatura a 150 °C. Esto se realiza para eliminar el contenido de humedad del crisol y así evitar errores de peso.

Figura 2-7. Determinación del material volátil



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Abrir la mufla y con ayuda de las pinzas retirar el crisol y colocarlo en el desecador hasta temperatura ambiente.
- Se pesa el crisol con su tapa en la balanza digital y se anota el peso registrado “B”.

- Se procede a pesar 2 g de cáscara de maní seca en pequeños pedazos de la muestra “C” y luego introducirlos al desecador.
- Con ayuda de una pinza se introduce el crisol con su tapa en la mufla a 650 °C por 7 min, transcurrido este tiempo apagarla y esperar a que baje la temperatura a 150 °C.
- Sacar el crisol con la muestra de la mufla con ayuda de las pinzas y enfriar en el desecador hasta la temperatura ambiente y pesar transcurrido un tiempo no mayor de 2 min.
- Registrar el peso del crisol con la muestra y su tapa “A” para obtener la cantidad de volátiles.

La cantidad de materiales volátiles se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{Material volátil} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100 \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

Donde:

A = Masa del crisol y residuo obtenido, en gramos.

B = Masa del crisol vacío, en gramos.

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

2.5.3.4. Determinación de carbón fijo

El carbono fijo es la parte no volátil del carbón, que permanece después de la determinación de materia volátil y que quemará luego en forma sólida después de que esa materia volátil ha sido liberada (Cubillos, 2019).

El contenido de carbón fijo de la cáscara de maní se determina por diferencia de los valores de porcentaje de humedad, material volátil y cenizas. Esto se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{CF} = 100\% - (\% \text{MV} + \% \text{C}) \quad (\text{Ecuación 2-5})$$

Donde:

%CF = Porcentaje de Carbono fijo.

%MV = Porcentaje de materia volátil.

%CC = Porcentaje de contenido de cenizas.

2.5.4. Procedimiento para la obtención de carbón activado granular a partir de cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).

2.5.4.1. Secado de la cáscara de maní

El secado de la cáscara de maní se realizó en una estufa de secado por convección natural del laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química. En la figura 2-8 se muestra el secado.

Figura 2-8. Secado de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento

- Pesar en una balanza la cáscara de maní que se va a secar.
- Lo que se pesó de cáscara de maní, se coloca una pequeña cantidad en una bandeja pequeña que esta ira al centro de la bandeja grande y el resto de cáscara

pesada se coloca al rededor la bandeja pequeña como se muestra en la figura 2-8.

- Medir la humedad de la cáscara de maní con el secador de infrarrojo para tomar nota de la humedad inicial.
- Realizar el secado de la cáscara de maní a una temperatura de 70 °C.
- Pesar la bandeja pequeña con cáscara de maní cada 30 min hasta mantener peso constante.

2.5.4.2. Molienda y tamizado de la cáscara de maní

La molienda de la cáscara de maní seca, se realizó en dos molinos: primero en el molino de discos para que la cáscara quede en trozos pequeños y posteriormente se molió en el molino de martillos para tener una molienda más pequeña. Estos dos molinos pertenecen al laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química. En la figura 2-9 se muestra los dos molinos.

Figura 2-9. Molienda de la cáscara de maní con el molino de discos y molino de martillos



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento para la molienda

- Se muele la cáscara de maní seca en el molino de discos.
- Se recolecta lo molido en una bandeja y posterior se lo vacía en una bolsa.
- Se coloca una bolsa hermética al molino de martillos para poder recolectar la cáscara de maní molida.
- El recolectado de la molienda del molino de discos se coloca lentamente al molino de martillos por su abertura pequeña y se comienza a moler, en caso de taponarse en su abertura del molino se debe empujar con una varilla delgada de hierro.
- Al finalizar la molienda por el molino de martillo, se saca la bolsa hermética que contiene la cáscara de maní molida y se cierra este, como se ve en la figura 2-10.

Figura 2-10. Recolección de molienda finalizada



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento para el tamizado

En la trituración o molienda se obtiene diferentes tamaños de granulometrías de cáscara de maní, por lo que se realiza un tamizado en un tamiz de marca ORTO-ALRESA con

un juego de mallas: 2; 1; 0,5; 0,25; 0,063 mm y bandeja de recepción de muestra, mostrados en la figura 2-11.

Figura 2-11. Tamizado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento

- Colocar la cáscara de maní previamente molida en el primer tamiz que sería la malla de 2 mm.
- Programar el equipo en una velocidad de 4 rpm y en un tiempo de 15 min.
- Encender el equipo y esperar que finalice el tiempo programado.
- Recolectar la cáscara de maní de la malla de 0,5 mm ya que paso por la malla de 1 mm y es lo que se requiere debido a las pruebas preliminares realizadas. Se recolecta en una bolsa hermética para realizar el siguiente proceso de impregnación, esto se ve en la figura 2-12.

Figura 2-12. Cáscara de maní molida malla 1mm



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.4.3. Impregnación

Para la impregnación de cáscara de maní se utilizó como agente activador el ácido fosfórico (H_3PO_4) con una concentración de 85 %, posteriormente por bibliografía y pruebas preliminares realizadas se vio conveniente diluir el agente activante en dos diferentes concentraciones al 30 % y 35 % para la impregnación del precursor que es la cáscara de maní molida de una granulometría de 1 mm.

La impregnación se realizó con una relación 1:3 p/v ya que en las pruebas preliminares se concluyó que es la mejor relación de impregnación para obtener un carbón activado de cáscara de maní.

Figura 2-13. Impregnación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento

- Pesar 10 g de cáscara de maní molida y vaciarlo en un vaso de precipitado de 250 ml.
- Adicionar el ácido fosfórico al 30 % y 35 % dependiendo del número de experimento a realizar, en una relación 1:3 p/v respectivamente, es decir 30 ml de H_3PO_4 para los 10 g de cáscara de maní molida. Agitar con una varilla como se muestra en la figura 2-13 durante treinta segundos y se pesa en una balanza y se procede a registrar el dato.
- Dejar la mezcla en reposo durante 22 h con agitación de manera ocasional.
- Pasado el tiempo de impregnación se pesa la mezcla y se registra el dato.
- Se separa el exceso del agente activante de la cáscara de maní, para posteriormente introducir la muestra en los crisoles.

Nota: El exceso del agente activante es separado de la cáscara de maní mediante una filtración al vacío, como se observa en la figura 2-14, ya que según pruebas preliminares se observó que es la mejor manera. Con el exceso de agente activante se

lava el vaso de precipitado hasta que esté completamente limpio de muestra impregnada y este nuevamente se filtra.

Figura 2-14. Filtración al vacío del exceso de agente activante



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.4.4. Carbonización y activación

La carbonización y activación hace referencia a la pirolisis, este se realizó en la mufla perteneciente al laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.

Figura 2-15. Carbonización y activación en la mufla



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Procedimiento

- Colocar el crisol limpio y seco en la mufla por 30 min a 500 °C para eliminar toda humedad y evitar errores de peso.
- Una vez concluido el tiempo apagar la mufla, y esperar hasta que alcance una temperatura de 150 °C, de esta manera se evita el choque térmico.
- Sacar de la mufla el crisol utilizando unas pinzas y colocarlo en el desecador para que enfrié hasta una temperatura ambiente.
- Pesar el crisol en una balanza digital y registrar el dato. Posteriormente se taro a cero el crisol.
- Adicionar la cáscara de maní previamente impregnada con ácido fosfórico al crisol, posteriormente se pesa y se registra el dato.
- Con ayuda de una pinza introducir el crisol a la mufla para su carbonización y posterior activación. La activación química se realizó a dos diferentes temperaturas las cuales son, 500 °C y 600 °C durante 2 y 3 h. El tiempo se cronometra desde el momento que alcance dichas temperaturas.
- Una vez concluido el tiempo y a la temperatura que se realizó la carbonización y activación según al número de experimentos, se apaga la mufla y esperar hasta que alcance una temperatura de 150 °C, de esta manera se evita el choque térmico.
- Con ayuda de unas pinzas se transfirió el crisol a un desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente, como se observa en la figura 2-16. Pesar el crisol en una balanza y registrar el dato.

Figura 2-16. Carbón activado obtenido



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.4.5. Lavado

El lavado del carbón se realizó con la finalidad de eliminar el ácido fosfórico residual hasta alcanzar un pH próximo a la neutralidad. El pH a lo que se llegó fue entre 6,88 a 7, el promedio es 6,941 (ver Anexo 12). Esto se llevó a cabo en las instalaciones de laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.

Procedimiento

- Introducir el carbón activado en los vasos de precipitado y agitar con una varilla de vidrio constantemente.
- Cortar papel filtro Whatman 42 según el tamaño del embudo a utilizar y pasar el carbón al embudo y comenzar a lavar y filtrar al vacío con agua destilada, como se aprecia en la figura 2-17.

Figura 2-17. Lavado de carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Se procede a medir el pH del agua de lavado después de la tercera lavada, es decir en la cuarta lavada se mide el pH, éste debe alcanzar un pH próximo a la neutralidad.
- Si después de la cuarta lavada no se alcanza un pH próximo a 7, se neutraliza con hidróxido de sodio al 2 % m/v (0,5 N), ya que según pruebas preliminares se vio conveniente.
- Lavar finalmente con agua destilada y medir el pH obtenido, como se muestra en la figura 2-18.

Figura 2-18. pH del lavado del carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.4.6. Secado

El secado se realizó en la estufa por convección natural en las instalaciones de laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.

Procedimiento

- Precalentar la estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C.
- Colocar el carbón activado obtenido del paso anterior en cápsulas de aluminio.
- Colocar las cápsulas de aluminio en la estufa durante un tiempo de 22 h, como se muestra en la figura 2-19.

Figura 2-19. Secado de carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Pasado este tiempo sacar de la estufa las cápsulas de aluminio con carbón activado y enfriar en un desecador hasta la temperatura ambiente.
- Para envasar el carbón activado obtenido se pesa un recipiente de plástico y se tara a cero.
- Se vacía el carbón activado que estaba en las cápsulas de aluminio a los recipientes de plástico y se pesa, registrando el dato que será el carbón activado final obtenido.
- Una vez pesado el carbón activado se tapa el recipiente de plástico con su doble tapa, para evitar la adsorción de la humedad y los olores que pueda haber en el ambiente.

Nota: El carbón activado se debe almacenar en un ambiente fresco y seco, además debe estar envasado en recipientes herméticos de vidrio o plástico, también se puede envasar en bolsas herméticas, pero se debe tener más cuidado ya que la bolsa podría ser rasgada y el carbón activado estaría en contacto con el medio en que se encuentra, ya que, si hubiera olores, humedad o líquidos contaminantes este adsorbería, por lo que reduciría

su capacidad de adsorción. El carbón activado tiene una fecha de caducidad es de dos años desde su fabricación, pero este puede durar más tiempo, siempre y cuando esté en un ambiente seco, fresco y no contaminado, además de estar en su respectivo recipiente hermético.

2.6. Caracterización del Producto Obtenido

Para determinar la calidad del producto obtenido que es el carbón activado de la cáscara de maní se realizaron dos análisis uno que es la determinación del índice de yodo que mediante este se podrá calcular el área superficial y el otro análisis es la determinación del índice de azul de metileno que mediante este se podrá determinar el % de remoción del azul de metileno. Estos análisis se realizaron para ver su efectividad del carbón activado obtenido de cáscara de maní. Los análisis se realizaron por el estudiante del presente proyecto, ya que el laboratorio de CEANID que se encuentra en la UAJMS no cuenta con la técnica ni el método para poder realizar estos análisis.

2.6.1. Determinación del índice de yodo

El índice de yodo o número de yodo es una indicación de área superficial disponible en m^2 /gramo de carbón activado.

Se usó la norma ASTM D 4607-14 (Anexo 3), la norma NTE INEN 1988:2013 (Anexo 4) y los procedimientos de Test methods for activated carbón, 1986 (Anexo 5) como guía para la determinación del índice de yodo de los carbones activados.

Procedimiento

- Pulverizar una porción de carbón activado granular en un mortero.

Nota: Según las normas mencionadas en el capítulo II, punto 2.6.1., nos dice que el carbón activado granular se debe pulverizar para realizar su respectivo análisis, ya que esto permite que, al estar en polvo, este tiene mayor superficie de contacto y nos permite realizar un buen análisis.

- Secar 2 g de carbón activado a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 h, en una estufa de secado por convección natural.

- Enfriar el carbón seco a temperatura ambiente en un desecador.
- Pesar 1,5 g de carbón activado en un Erlenmeyer de 250 ml.
- Con ayuda de una pipeta adicionar 10 ml de HCl al 5 % al matraz Erlenmeyer y realizar movimientos giratorios hasta que todo el carbón activado se haya humedecido.
- Colocar el Erlenmeyer en un calentador, y esperar a que llegue a la ebullición, una vez llegado a la ebullición se lo mantiene así durante 30 segundos. Esto se ve en la figura 2-20.

Figura 2-20. Ebullición del HCl con el carbón activado

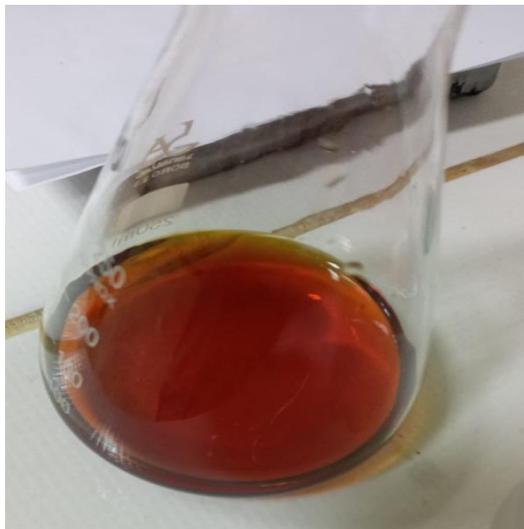


Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Una vez concluido el tiempo dejarlo enfriar el matraz con su contenido hasta una temperatura ambiente.
- Añadir mediante una pipeta volumétrica 100 ml de la solución estándar de yodo 0,1 N al Erlenmeyer. Luego taponarlo el Erlenmeyer e inmediatamente se lo agita vigorosamente durante 30 segundos.
- Posteriormente se coloca papel filtro Whatman 42 en un embudo y se comienza a filtrar la solución.

- Excluir los 20 a 30 ml iniciales del filtrado y recoger el resto del filtrado en un Erlenmeyer.
- Agitar el filtrado en el Erlenmeyer y pipetear 50 ml a un nuevo matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- Llenar la bureta con tiosulfato de sodio 0,1 N.
- Iniciar la titulación del filtrado, hasta que el color amarillo rojizo intenso haya desaparecido.

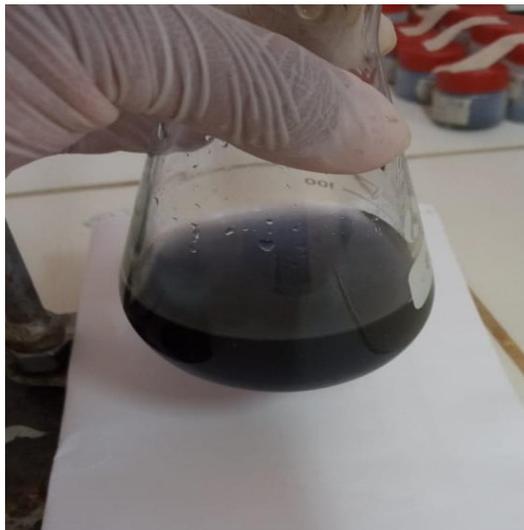
Figura 2-21. Decoloración del amarillo rojizo intenso



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Agregar 1 ml de solución de almidón a la muestra anterior, la misma que adquiere una tonalidad de color azul, como se muestra en la figura 2-22.

Figura 2-22. Tonalidad de color azul



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Seguir titulando hasta el color azul desaparezca, como se observa en la figura 2-23, y se anota el volumen de tiosulfato consumido.

Figura 2-23. Titulación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.6.2. Determinación del índice de azul de metileno

El análisis de azul de metileno se realiza para determinar la capacidad de adsorción de los carbones activados. El análisis del índice de azul de metileno se realizó de acuerdo a los procedimientos establecidos por Zenteno, 2009; Mamani, 2021; García y Granillo, 2017 y Test methods for activated carbón, 1986 (Anexo 7).

Para realizar el análisis se compró una solución preparada de azul de metileno al 1% del CEVITA (Centro Vitivinícola Tarija). Con esta solución se prepara las diferentes soluciones, donde se pueda diferenciar con facilidad la variación de color antes y después de la adsorción con carbón activo, y que además se pueda determinar la absorbancia de luz en el espectrofotómetro.

2.6.2.1. Determinación de la curva de calibración de la solución de azul de metileno

- Se prepara un blanco de agua destilada de 50 ml y una serie de estándares de azul de metileno a concentraciones variables de (0,5, 1, 2, 3 y 4) mg/l, como se puede observar en la figura 2-24.

Figura 2-24. Soluciones preparadas para la curva de calibración.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Se enciende el espectrofotómetro 20 min antes de ser usado, luego se selecciona la longitud de onda en la que se trabajara que es 665 nm según datos de bibliografía y proceder a leer el blanco de agua destilada.
- Una vez medido el blanco se procede a medir las soluciones preparadas de azul de metileno, para esto se transfiere la muestra a la celda y se lee la absorbancia a 665 nm y se repite este paso hasta terminar las muestras.

Figura 2-25. Espectrofotómetro



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Con los datos obtenidos se realiza la curva patrón de calibración absorbancia-concentración.

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

Para la decoloración del azul de metileno se usó la solución de 3 mg/l que se preparó anteriormente para la curva de calibración.

Procedimiento

- Pulverizar una porción de carbón activado granular en un mortero.
- Secar 2 g de carbón activado a 150 °C por 1 h, en una estufa de secado por convección natural.

- Enfriar el carbón seco a temperatura ambiente en un desecador.
- Pesar 0,1 g de carbón activado.
- De la solución 3 mg/l se mide en una probeta 25 ml de azul de metileno e introducirlo en un Erlenmeyer. Luego adicionar al mismo el carbón activado ya pesado.

Figura 2-26. Muestra de azul de metileno con el carbón activado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Agitar el Erlenmeyer con la muestra de manera continua durante 15 min.
- Se procede a filtrar la muestra y para ello se utilizó un papel filtro Whatman 42 y un embudo. Esto se muestra en la figura 2-27.

Figura 2-27. Filtrado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

- Luego del filtrado la muestra se introduce en la celda del espectrofotómetro, viendo que no tenga burbujas la solución en la celda. Se coloca la celda en el espectrofotómetro y se mide la absorbancia a 665 nm.

Figura 2-28. Medición de la absorbancia



Fuente: Elaboración propia, 2023.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultado de la Caracterización de la Cáscara de Maní

3.1.1. Resultados de la determinación del porcentaje humedad de la cáscara de maní

El análisis fisicoquímico que se hizo es el porcentaje de humedad de la cáscara de maní a punto de secarse completamente.

Para obtener buenos resultados del porcentaje de humedad, se analizaron 3 muestras de cascara de maní en el secador de infrarrojos. Los resultados se pueden ver en la tabla III-1.

Tabla III-1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de maní

Número de muestras	% Humedad
1	8,570
2	8,240
3	8,540
Promedio	8,450

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El porcentaje de humedad obtenido de la cáscara de maní es de 8,450 %, este porcentaje es bajo, lo cual esto hace que la cáscara de maní sea apta para obtener carbón activado ya que no se tendrá que utilizarse mucha energía para lograr eliminar la humedad, lo que implica menores costos energéticos. Comparando el resultado del porcentaje de humedad sacado por CEANID (ver Anexo 8) con el que se obtuvo no existe mucha diferencia, ver la tabla III-2.

Tabla III-2. Comparación del porcentaje de humedad

Análisis realizado	% Humedad
LOU	8,450
CEANID	7,86

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La diferencia de estos dos se debe a la fecha en el que se realizó el análisis. El análisis de humedad de la cáscara de maní se realizó en el LOU (Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química), mucho antes que en el laboratorio de CEANID, ya que durante ese tiempo se pudo secar más, y es por esto que en el laboratorio de CEANID salió un poco menos el contenido de humedad.

3.1.2. Caracterización de la materia prima en base seca

Los análisis fisicoquímicos que se realizó a la materia prima en base seca fueron: el porcentaje de contenido de cenizas, el porcentaje de material volátil y el carbón fijo. En la tabla III-3 se ven los resultados obtenidos.

Tabla III-3. Análisis de la caracterización de la materia prima en base seca

Muestra	Cáscara de maní			Promedio
	Número de muestras			
	1	2	3	
% Cenizas	3,690	3,450	3,190	3,440
% Material volátil	14,940	14,360	14,540	14,610
% Carbón fijo	81,370	82,190	82,270	81,940

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El porcentaje de ceniza obtenido de la cáscara de maní es de 3,440 %, este es una pequeña cantidad de materia inorgánica lo que afecta en menor grado la capacidad de adsorción del carbón activado. Mientras menor sea el contenido de cenizas mayor calidad del carbón activado es decir mayor área superficial, índice de yodo y a la vez capacidad de adsorción.

Con respecto al material volátil de la cáscara de maní con un 14,610 %, este representa la cantidad de materia prima en base seca, que durante la impregnación, carbonización y activación se eliminan, lo que influye en un menor rendimiento en la producción de carbón activo.

El contenido de carbón fijo fue de 81,940 %, lo cual se puede considerar que la cáscara de maní es de buena calidad para la producción de carbón activado.

Comparando el resultado sacado por CEANID (ver Anexo 8) del contenido de cenizas no existe mucha diferencia con el contenido de cenizas que se obtuvo en el LOU, ver la tabla III-4.

Tabla III-4. Comparación del porcentaje de cenizas

Análisis realizado	% Cenizas
LOU	3,440
CEANID	3,11

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La diferencia de estos dos se debe a la granulometría que se usó para realizar el análisis, en el LOU solamente se trozo en pequeños pedazos la cáscara de maní y se secó, mientras que en CEANID lo molieron la cáscara y no lo secaron. Otra diferencia se debe a la temperatura y tiempo de incineración.

3.1.3. Resultado del análisis microbiológico de la cáscara de maní

El análisis microbiológico que se realizó a la cáscara de maní es el contenido de coliformes totales en la que dio un resultado de $1,8 \times 10^4$ UFC/g que quiere decir Unidades Formadoras de Colonias por gramos. Este resultado fue dado por el laboratorio de CEANID quien realizo el análisis, esto se puede ver en el Anexo 9. Como se puede ver el resultado la cáscara de maní tiene contaminantes microbiológicos, esto se debe a que la cascara de maní está expuesta a contaminantes ya que la planta de maní su fruto crece bajo tierra.

3.2. Resultados de las Determinaciones del Índice de Yodo, Área Superficial en Función del Índice de Yodo y Índice de Azul de Metileno del Carbón Activado Obtenido de la Cáscara de Maní

3.2.1. Resultados de la determinación de índice de yodo

El índice de yodo o número de yodo se define como la masa en miligramos de yodo atómico que se adsorbe por gramo de carbón activado. Este índice de yodo es un factor muy importante para determinar la calidad del carbón activado obtenido, ya que mientras mayor sea este valor mayor capacidad de adsorción tendrá.

Se usó la norma ASTM D 4607-14 (Anexo 3), la norma NTE INEN 1988:2013 (Anexo 4) y los procedimientos de Test methods for activated carbón, 1986 (Anexo 5) como guía para realizar el cálculo de la determinación del índice de yodo de los carbones activados.

3.2.1.1. 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**

$$\text{Índice de yodo} = \frac{V}{m} \times f \quad (\text{Ecuación 3-6})$$

➤ **Cálculo de relación V/m**

$$\frac{V}{m} = \frac{A - (2,2 \times B \times V_1)}{mc} \quad (\text{Ecuación 3-7})$$

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

$$A = N_1 \times 12693 \quad (\text{Ecuación 3-8})$$

$$B = N_2 \times 126,93 \quad (\text{Ecuación 3-9})$$

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

$$C = \frac{N_2 \times V_1}{50} \quad (\text{Ecuación 3-10})$$

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 6).

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.

3.2.1.2. 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-5 y III-6.

Ejemplo de la muestra M7-1

Primeramente, se calculó las constantes del índice de yodo A y B, con las ecuaciones 3-8 y 3-9.

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

$$A = 1269,3$$

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

$$B = 12,693$$

Posteriormente se calcula V/m con los valores de las constantes A y B utilizando la ecuación 3-7.

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

$$\frac{V}{m} = \frac{1269,3 - (2,2 \times 12,693 \times 11,6)}{1,500}$$

$$\frac{V}{m} = 630,2498$$

Luego se calculó el valor C con la ecuación 3-10.

$$C = \frac{0,1 \times 11,6}{50}$$

$$C = 0,0232$$

Una vez calculado la normalidad del filtrado residual $C = 0,0232$, con su valor de este buscamos en el (Anexo 6) el factor de corrección del índice de yodo obteniendo así el valor de “ f ” que va ser $f = 0,9775$.

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 cascara de maní con la ecuación 3-6.

$$\text{Índice de yodo} = 630,2498 \times 0,9775$$

$$\text{Índice de yodo} = 616,0691 \text{ mg/g}$$

En las tablas III-5 y III-6 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-5. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1

Muestra	Masa de carbón activado (g)	(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	1,504	0,1	0,1	10	16,3	541,3092	0,0326	0,9275	502,0643
M ₂₋₁	1,504	0,1	0,1	10	15,2	561,7328	0,0304	0,9363	525,9504
M ₃₋₁	1,502	0,1	0,1	10	13,4	595,9456	0,0268	0,9550	569,1281
M ₄₋₁	1,500	0,1	0,1	10	12,8	607,9101	0,0256	0,9613	584,3840
M ₅₋₁	1,502	0,1	0,1	10	14,1	582,9315	0,0282	0,9475	552,3276
M ₆₋₁	1,503	0,1	0,1	10	13,6	591,8333	0,0272	0,9525	563,7212
M ₇₋₁	1,500	0,1	0,1	10	11,6	630,2498	0,0232	0,9775	616,0691
M ₈₋₁	1,502	0,1	0,1	10	12,4	614,5373	0,0248	0,9663	593,8274

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-5 se puede observar que el mejor carbón activado obtenido es de la muestra “M₇₋₁” con un valor de índice de yodo de 616,0691 mg/g, lo cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35% y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas, además se pudo observar en la tabla que al aumentar la temperatura y la concentración también aumenta el índice de yodo de los carbones activados de cáscara de maní.

Tabla III-6. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2

Muestra	Masa de carbón activado (g)	(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 ₁₋₂	1,504	0,1	0,1	10	15,9	548,7359	0,0318	0,9300	510,3244
M ₂₋₂	1,503	0,1	0,1	10	14,7	571,3961	0,0294	0,9413	537,8552
M ₃₋₂	1,506	0,1	0,1	10	12,9	603,6339	0,0258	0,9606	579,8507
M ₄₋₂	1,506	0,1	0,1	10	12,6	609,1966	0,0252	0,9638	587,1437
M ₅₋₂	1,504	0,1	0,1	10	13,8	587,7264	0,0276	0,9506	558,6927
M ₆₋₂	1,506	0,1	0,1	10	13,4	594,3628	0,0268	0,9550	567,6165
M ₇₋₂	1,501	0,1	0,1	10	11,8	626,1091	0,0236	0,9750	610,4563
M ₈₋₂	1,502	0,1	0,1	10	12,3	616,3964	0,0246	0,9675	596,3635

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-6 se puede observar que el mejor carbón activado obtenido es de la muestra “M₇₋₂” con un valor de índice de yodo de 610,4563 mg/g.

A continuación, en la tabla III-7 se muestran los promedios de los resultados del cálculo de índice de yodo de la réplica 1 y réplica 2.

Tabla III-7. Resultados promedio del índice de yodo

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H₃PO₄) (%)	Temperatura (°C)	Índice de yodo (mg/g) Replica 1	Índice de yodo (mg/g) Replica 2	Promedio índice de yodo (mg/g)
M₁	2	30	500	502,0643	510,3244	506,1944
M₂	3	30	500	525,9504	537,8552	531,9028
M₃	2	35	500	569,1281	579,8507	574,4894
M₄	3	35	500	584,3840	587,1437	585,7638
M₅	2	30	600	552,3276	558,6927	555,5102
M₆	3	30	600	563,7212	567,6165	565,6688
M₇	2	35	600	616,0691	610,4563	613,2627
M₈	3	35	600	593,8274	596,3635	595,0954

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla III-7 se observa el índice de yodo promedio es de 613,2627 mg/g, este valor se lo compara con el índice de yodo de la norma ASTM D 4607-14 el cual especifica que el carbón activado puede obtener un número de yodo de 500 a 1200 mg/g, por lo cual se puede decir que la muestra “**M₇**” de carbón activado de cascara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), es de buena calidad ya que está dentro del parámetro establecido de la norma ASTM D 4607-14. Este índice de yodo obtenido es un factor muy importante para determinar la calidad del carbón activado obtenido puesto que mientras mayor sea este valor mayor capacidad de adsorción tendrá.

3.2.2. Resultados del área superficial en función al índice de yodo

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:

$$\text{Área superficial} = \text{índice de yodo} + 100 \quad (\text{Ecuación 3-11})$$

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

Ejemplo de la muestra M₇₋₁

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

$$\text{Área superficial} = 616,0691 + 100 = 716,0691 \text{ m}^2/\text{g}$$

En la tabla III-8 y III-9 se muestra el área superficial del carbón activado obtenido de las demás muestras de la réplica 1 y réplica 2.

Tabla III-8. Área superficial del carbón activado replica 1

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
M ₁₋₁	502,0643	602,0643
M ₂₋₁	525,9504	625,9504
M ₃₋₁	569,1281	669,1281
M ₄₋₁	584,3840	684,3840
M ₅₋₁	552,3276	652,3276
M ₆₋₁	563,7212	663,7212
M ₇₋₁	616,0691	716,0691
M ₈₋₁	593,8274	693,8274

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III-9. Área superficial del carbón activado replica 2

Muestra	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)
M ₁₋₂	510,3244	610,3244
M ₂₋₂	537,8552	637,8552
M ₃₋₂	579,8507	679,8507
M ₄₋₂	587,1437	687,1437
M ₅₋₂	558,6927	658,6927
M ₆₋₂	567,6165	667,6165
M ₇₋₂	610,4563	710,4563
M ₈₋₂	596,3635	696,3635

Fuente: Elaboración propia, 2023.

A continuación, en la tabla III-10 se muestran los promedios de los resultados del cálculo del área superficial de la réplica 1 y replica 2.

Tabla III-10. Promedio área superficial

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H ₃ PO ₄) (%)	Temperatura (°C)	Área superficial (m ² /g) Replica 1	Área superficial (m ² /g) Replica 2	Promedio área superficial (m ² /g)
M ₁	2	30	500	602,0643	610,3244	606,1944
M ₂	3	30	500	625,9504	637,8552	631,9028
M ₃	2	35	500	669,1281	679,8507	674,4894
M ₄	3	35	500	684,3840	687,1437	685,7638
M ₅	2	30	600	652,3276	658,6927	655,5102
M ₆	3	30	600	663,7212	667,6165	665,6688
M ₇	2	35	600	716,0691	710,4563	713,2627
M ₈	3	35	600	693,8274	696,3635	695,0954

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla III-10 se observa que la mejor muestra en cuanto al área superficial promedio es la muestra “M₇” lo cual dicha muestra fue impregnada con

ácido fosfórico a una concentración de 35% y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas.

El área superficial es directamente proporcional al índice de yodo. Es decir que el yodo por el tamaño que posee se aloja en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción, por lo que mientras mayor sea el número de yodo mayor área superficial tendrá. Es por esto que la muestra “M7” es la mejor muestra en cuanto al área superficial.

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

El índice de azul de metileno da una indicación de la capacidad de adsorción de un carbón activado para moléculas que tienen dimensiones similares a las moléculas de azul de metileno; este parámetro es una indicación de la estructura de mesoporos del carbón activado.

El azul de metileno se define como el número de mililitros de la solución de azul de metileno decolorada por 0,1 g de carbón activado.

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

Para hacer los cálculos de índice azul de metileno es necesario realizar la curva de calibración, para esto en el capítulo II punto 2.6.2.1, se prepararon soluciones de azul de metileno a determinadas concentraciones, en las que se dio a conocer sus lecturas de la absorbancia de luz en el espectrofotómetro.

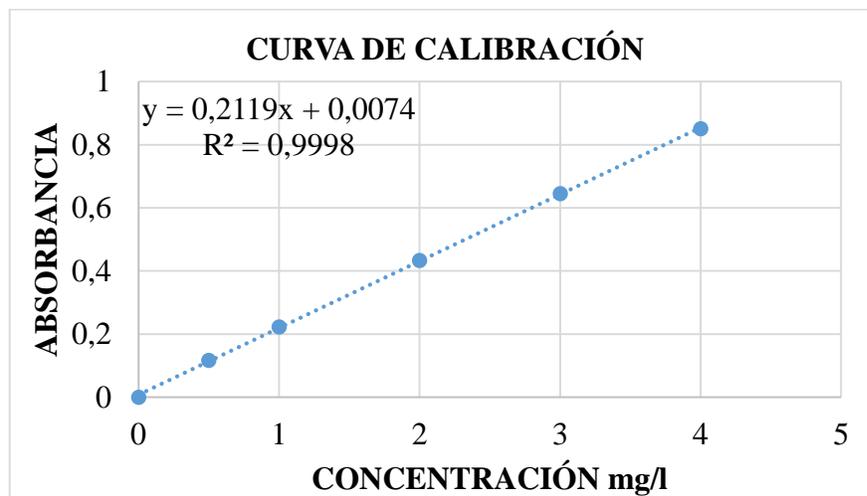
En la tabla III-11 se observa las concentraciones de las soluciones de azul de metileno y sus lecturas de absorbancia de cada una de estas. Con esto y con la ayuda del software Excel se realizó la curva patrón que se ve en la figura 3-1.

Tabla III-11. Lecturas de absorbancia para la curva patrón

Concentración (mg/l)	Absorbancia (nm)
0	0
0,5	0,117
1	0,223
2	0,433
3	0,645
4	0,851

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 3-1. Curva de calibración



Fuente: Elaboración propia, 2023.

De la figura 3-1 se obtiene la ecuación de concentración con la que se podrá realizar los cálculos de porcentaje de remoción y masa adsorbida de la solución de azul de metileno por el carbón activado, además se obtiene el coeficiente de aproximación lineal “R²” para la curva es de 0,9998, lo que demuestra que el modelo lineal se ajusta perfectamente a los datos experimentales.

La ecuación de la concentración es:

$$y = 0,2119x + 0,0074 \quad (\text{Ecuación 3-12})$$

$$x = \frac{y - 0,0074}{0,2119} \quad (\text{Ecuación 3-13})$$

Donde:

x = Concentración de azul de metileno expresada en mg/l, de la ecuación 3-13.

y = Absorbancia expresada en nm.

3.2.3.2. Ecuaciones utilizadas para el cálculo del índice de azul de metileno

Para realizar el cálculo de la masa adsorbida de azul de metileno por el carbón activado, se usó la solución de 3 mg/l que ha sido utilizada anteriormente para determinar la curva de calibración.

Para determinar la masa adsorbida se usa la siguiente ecuación 1-1:

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

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, para usar en el análisis.

m = Masa del carbón activado en (g).

Para calcular la concentración inicial de la solución de azul de metileno se usa la ecuación 3-13, donde la variable “x” que se obtiene de la curva de calibración es la concentración inicial del azul de metileno, pero también se usa esa ecuación 3-13 para determinar la concentración final, solamente que este se mide después del filtrado y no antes.

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

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100 \% \quad (\text{Ecuación 3-14})$$

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).

3.2.3.3. Resultados de análisis del índice de azul de metileno

A continuación, se realiza un ejemplo del procedimiento de cómo se realizó el cálculo para la obtención de resultados de las tablas III-12 y III-13.

Ejemplo de la muestra M₇₋₁

Primeramente, con la ecuación 3-13 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: $y = 0,645$

$$x = \frac{y - 0,0074}{0,2119}$$

$$x = \frac{0,645 - 0,0074}{0,2119}$$

$$C_o = x = 3,0089 \text{ mg/l}$$

Una vez calculado la concentración inicial, se calcula la concentración final de la misma manera con la ecuación 3-13.

Donde la absorbancia de la muestra M₇₋₁ es: $y = 0,012$

$$x = \frac{y - 0,0074}{0,2119}$$

$$x = \frac{0,012 - 0,0074}{0,2119}$$

$$C_f = x = 0,0217 \text{ mg/l}$$

Una vez obtenido la concentración inicial y final se calcula la masa adsorbida (q_e) de la muestra M_{7-1} con la ecuación 1-1.

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

$$q_e = \frac{(3,0089 \text{ mg/l} - 0,0217 \text{ mg/l}) \times 0,025 \text{ l}}{0,1015 \text{ g}}$$

$$q_e = 0,7358 \text{ mg/g}$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de remoción del azul de metileno de la muestra M_{7-1} con la ecuación 3-14.

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

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(3,0089 \text{ mg/g} - 0,0217 \text{ mg/g})}{3,0089 \text{ mg/g}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Remoción} = 99,2785$$

A continuación, en las tablas III-12 y III-13 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-12. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción del azul de metileno, réplica 1

Muestra	Masa de carbón activado 1 (g)	Masa de carbón activado 2 (g)	Masa de carbón activado promedio (g)	Abs. 1	Abs. 2	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	Masa adsorbida "qe" (mg/g)	% Remoción
M ₁₋₁	0,103	0,101	0,1020	0,025	0,026	0,0255	0,0854	0,7165	97,1612
M ₂₋₁	0,103	0,102	0,1025	0,021	0,019	0,0200	0,0595	0,7194	98,0238
M ₃₋₁	0,103	0,101	0,1020	0,015	0,019	0,0170	0,0453	0,7264	98,4943
M ₄₋₁	0,102	0,102	0,1020	0,016	0,014	0,0150	0,0359	0,7287	98,8080
M ₅₋₁	0,103	0,102	0,1025	0,017	0,018	0,0175	0,0477	0,7223	98,4159
M ₆₋₁	0,102	0,103	0,1025	0,014	0,017	0,0155	0,0382	0,7246	98,7296
M ₇₋₁	0,102	0,101	0,1015	0,012	0,012	0,0120	0,0217	0,7358	99,2785
M ₈₋₁	0,101	0,102	0,1015	0,015	0,014	0,0145	0,0335	0,7329	98,8864

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla III-12 se observa que la mejor muestra de obtención de carbón activado es “M₇₋₁” con un valor de masa adsorbida de 0,7358 mg/g y con un porcentaje de remoción del 99,2785%, lo cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35% y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas.

Tabla III-13. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción del azul de metileno, réplica 2

Muestra	Masa de carbón activado 1 (g)	Masa de carbón activado 2 (g)	Masa de carbón activado promedio (g)	Abs. 1	Abs. 2	Abs. Promedio	Cf (mg/l)	Masa adsorbida qe (mg/g)	% Remoción
M ₁₋₂	0,102	0,102	0,1020	0,027	0,025	0,0260	0,0878	0,7160	97,0827
M ₂₋₂	0,103	0,101	0,1020	0,021	0,022	0,0215	0,0665	0,7212	97,7885
M ₃₋₂	0,102	0,102	0,1020	0,017	0,019	0,0180	0,0500	0,7252	98,3375
M ₄₋₂	0,103	0,100	0,1015	0,014	0,015	0,0145	0,0335	0,7329	98,8864
M ₅₋₂	0,103	0,103	0,1030	0,017	0,016	0,0165	0,0429	0,7199	98,5727
M ₆₋₂	0,102	0,103	0,1025	0,015	0,016	0,0155	0,0382	0,7246	98,7296
M ₇₋₂	0,102	0,100	0,1010	0,011	0,012	0,0115	0,0193	0,7400	99,3569
M ₈₋₂	0,101	0,101	0,1010	0,014	0,014	0,0140	0,0311	0,7371	98,9648

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De acuerdo a la tabla III-13 se observa que la mejor muestra de obtención de carbón activado es “M₇₋₂” con un valor de masa adsorbida de 0,7400 mg/g y con un porcentaje de remoción del 99,3569%. A continuación, en la tabla III-14 y tabla III-15 se muestran los promedios de la masa adsorbida y el porcentaje de remoción de azul de metileno de los carbones activados de cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).

Tabla III-14. Resultados promedio de la masa adsorbida del azul de metileno

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H₃PO₄) (%)	Temperatura (°C)	Masa adsorbida (mg/g) Replica 1	Masa adsorbida (mg/g) Replica 2	Promedio masa adsorbida (mg/g)
M₁	2	30	500	0,7165	0,7160	0,7163
M₂	3	30	500	0,7194	0,7212	0,7203
M₃	2	35	500	0,7264	0,7252	0,7258
M₄	3	35	500	0,7287	0,7329	0,7308
M₅	2	30	600	0,7223	0,7199	0,7211
M₆	3	30	600	0,7246	0,7246	0,7246
M₇	2	35	600	0,7358	0,7400	0,7379
M₈	3	35	600	0,7329	0,7371	0,7350

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La tabla III-14 indica que la muestra “**M₇**” tiene el mayor promedio de masa adsorbida del azul de metileno con un valor de 0,7379 miligramos de masa adsorbida de azul de metileno por cada gramo de carbón activado (adsorbente).

Tabla III-15. Resultados promedio del porcentaje de remoción del azul de metileno

Muestra	Tiempo (h)	Concentración (H₃PO₄) (%)	Temperatura (°C)	% Remoción Replica 1	% Remoción Replica 2	Promedio %remoción
M₁	2	30	500	97,1612	97,0827	97,1220
M₂	3	30	500	98,0238	97,7885	97,9062
M₃	2	35	500	98,4943	98,3375	98,4159
M₄	3	35	500	98,8080	98,8864	98,8472
M₅	2	30	600	98,4159	98,5727	98,4943
M₆	3	30	600	98,7296	98,7296	98,7296
M₇	2	35	600	99,2785	99,3569	99,3177
M₈	3	35	600	98,8864	98,9648	98,9256

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-15 indica que la muestra “**M₇**” tiene el mayor promedio de % de remoción del azul de metileno, con un valor de 99,3177 %, esto indica que ese es el porcentaje de masa de azul de metileno que es adsorbida por el carbón activado obtenido a partir de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*). Además, se pudo observar en la tabla III-14 y III-15 que al aumentar la temperatura y la concentración también aumenta la masa adsorbida y el porcentaje de remoción de los carbones activados de cáscara de maní.

3.3. Resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico del carbón activado obtenido de la cáscara de maní

El análisis fisicoquímico se realizó al mejor carbón activado obtenido de la cáscara de maní que fue la muestra **M₇**, se hizo el análisis de contenido de cenizas que dio un resultado de 7,0 %, este análisis lo realizó el laboratorio de CEANID. El valor obtenido del contenido de cenizas está dentro del parámetros según la norma ASTM D 3174 – 04 que el contenido de cenizas del carbón activado debe estar entre 3 % a 15 %, por lo que se cumplió según esta norma.

El análisis microbiológico de coliformes totales que se realizó al carbón activado obtenido de la cáscara de maní lo realizó el laboratorio de CEANID y dio un resultado de < 2 NMP/g que quiere decir Número Más Probable por gramo, este valor es aceptable según el laboratorio de CEANID ya que lo realizaron mediante la norma boliviana NB 31006:09. Esta norma es del agua potable que se usa para la Identificación y recuento de bacterias Coliformes totales, Coliformes termorresistentes y Escherichia coli - Método de Número Más Probable (NMP), se basaron mediante esta norma debido a que no hay una norma con respecto al análisis microbiológico del carbón activado. El resultado obtenido < 2 NMP/g no indica necesariamente contaminación fecal sino a bacterias que se pueden encontrar en el ambiente, ya que el carbón activado obtenido de la cáscara de maní puede adsorber la humedad u algún olor del ambiente. Los resultados de contenido de cenizas y coliformes totales se obtuvieron del laboratorio de CEANID se puede ver en el Anexo 10.

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-16 y tabla III-17 se puede observar todas las corrientes de todos las etapas o procesos realizados en la obtención experimental de carbón activado granular de la cáscara maní, tanto de la réplica 1 como el de la réplica 2.

Tabla III-16. Corrientes del balance de materia para cada experimento y réplica

Muestra	A cas.m.h+imp (g)	B imp (g)	C cas.m.h (g)	D vap.agua (g)	E cas.m.s (g)	F perd (g)	G cas.m.s.molida (g)	H rechazo (g)	I perd.tam (g)	J cas.m.s.tam (g)
M₁₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,500	10,003
M₂₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₃₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₄₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₅₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,501	10,002
M₆₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,500	10,003
M₇₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,500	10,003
M₈₋₁	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₁₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,500	10,003
M₂₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,503	10,000
M₃₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₄₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₅₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₆₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₇₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001
M₈₋₂	42,500	8,500	34,000	2,226	31,774	0,328	31,446	20,943	0,502	10,001

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III-17. Corrientes del balance de materia para cada experimento y réplica

Muestra	K activante (g)	L evap (g)	M c.impre (g)	N exc+perd (g)	Ñ cas.impre (g)	O agua+Ac+alqui+m.v (g)	P c.act (g)	Q agua (g)	R NaOH (g)	S agua+Ac.r+NaOH+perd (g)	T c.act.final (g)
M₁₋₁	37,517	1,366	46,154	28,583	17,571	10,105	7,466	232	50,531	284,933	5,064
M₂₋₁	37,517	1,513	46,005	28,029	17,976	10,756	7,220	208	50,531	260,704	5,047
M₃₋₁	38,771	1,986	46,786	28,174	18,612	10,714	7,898	311	50,531	364,070	5,359
M₄₋₁	38,771	2,004	46,768	28,982	17,786	9,988	7,798	296	50,531	348,691	5,638
M₅₋₁	37,517	1,382	46,137	27,690	18,447	11,002	7,445	225	50,531	278,109	4,867
M₆₋₁	37,517	1,427	46,093	28,173	17,920	10,772	7,148	221	50,531	273,938	4,741
M₇₋₁	38,771	2,212	46,562	28,482	18,080	10,904	7,176	312	50,531	364,351	5,356
M₈₋₁	38,771	2,043	46,729	28,201	18,528	11,340	7,188	308	50,531	360,315	5,404
M₁₋₂	37,517	1,368	46,152	27,961	18,191	10,272	7,919	222	50,531	275,343	5,107
M₂₋₂	37,517	1,486	46,031	28,083	17,948	10,565	7,383	215	50,531	267,943	4,971
M₃₋₂	38,771	1,991	46,781	28,132	18,649	10,655	7,994	316	50,531	369,302	5,223
M₄₋₂	38,771	1,982	46,790	28,990	17,800	10,128	7,672	305	50,531	357,616	5,587
M₅₋₂	37,517	1,458	46,060	27,571	18,489	10,991	7,498	216	50,531	269,274	4,755
M₆₋₂	37,517	1,445	46,073	27,602	18,471	11,351	7,120	232	50,531	285,007	4,644
M₇₋₂	38,771	2,148	46,624	28,079	18,545	11,094	7,451	302	50,531	354,691	5,291
M₈₋₂	38,771	2,037	46,735	27,966	18,769	11,608	7,161	298	50,531	350,307	5,385

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

$A_{\text{cas.m.h+imp}}$ = Masa de cáscara de maní húmeda e impurezas.

B_{imp} = Masa de impurezas como: tegumento de maní, semillas (grano) de maní, tierra, raíces y troncos pequeños de la planta de maní.

$C_{\text{cas.m.h}}$ = Masa de cáscara de maní húmeda.

$D_{\text{vap.agua}}$ = Masa de vapor de agua.

$E_{\text{cas.m.s}}$ = Masa de cáscara de maní seca.

F_{perd} = Pérdidas de cáscara de maní en la molienda.

$G_{\text{cas.m.s.molida}}$ = Masa de cáscara de maní seca y molida.

H_{rechazo} = Cantidad de rechazo de la cáscara de maní tamizada.

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

$J_{\text{cas.m.s.tam}}$ = Masa de cáscara de maní seca tamizada.

$K_{\text{activante}}$ = Masa de agente activante (H_3PO_4).

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

$M_{\text{c.impre}}$ = Masa de cáscara de maní impregnada con exceso de agente activante (H_3PO_4).

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

$\tilde{N}_{\text{cas.impre}}$ = Masa de cáscara de maní impregnada.

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

$P_{\text{c.act}}$ = Masa de carbón activado.

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

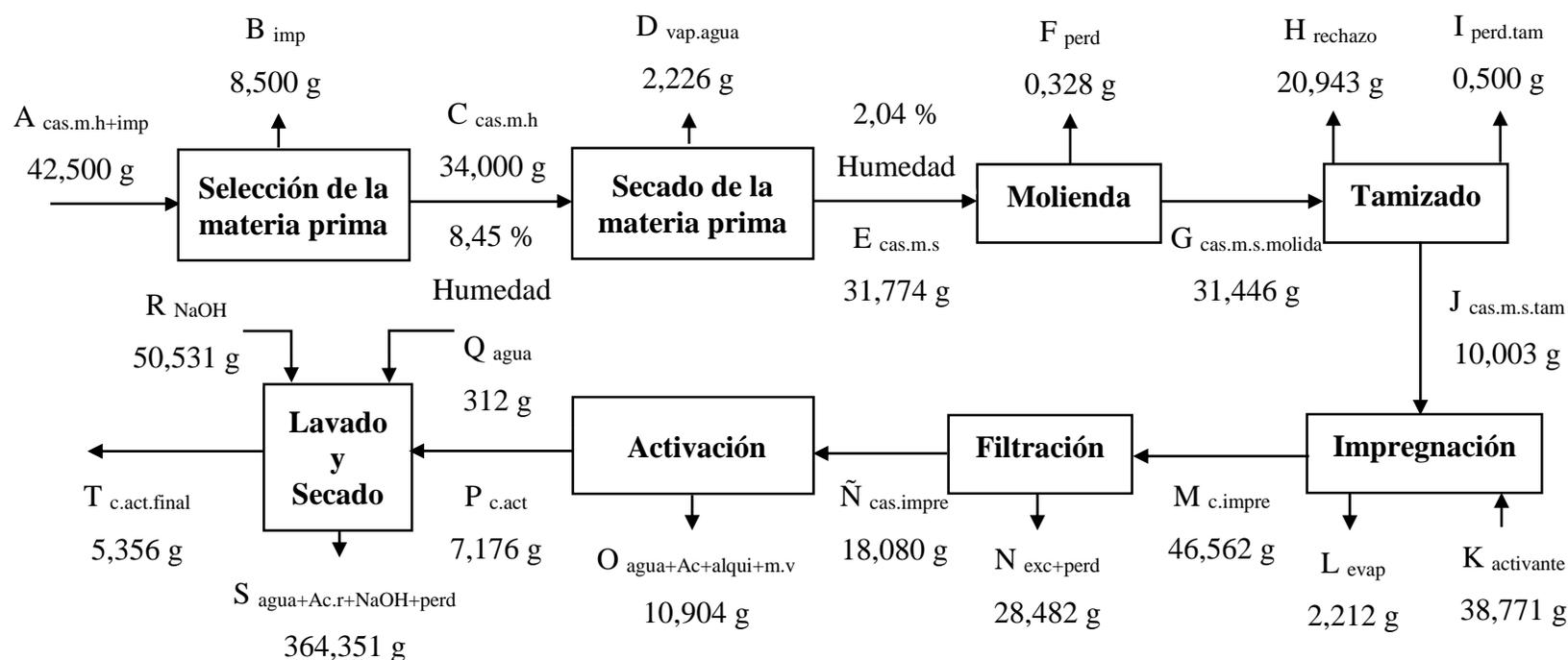
R_{NaOH} = Masa de hidróxido de sodio para neutralizar el exceso de ácido en la etapa de lavado del carbón activado.

$S_{\text{agua+Ac.r+NaOH+perd}}$ = Masa de agua, ácido residual, hidróxido de sodio y pérdidas.

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

En la figura 3-2 se muestra el balance de materia general de la obtención experimental de carbón activado granulado de cáscara de maní, también se ejemplifica el balance de materia general con la mejor muestra obtenida que es la “M7-1”.

Figura 3-2. Diagrama de flujo del balance de materia general para la obtención experimental de carbón activado granular de cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

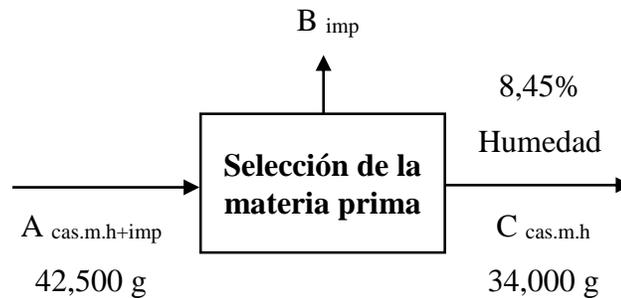
3.4.1.1. Balance de materia por etapa

Para realizar el balance de materia por etapa o proceso se tomó como ejemplo la mejor muestra de obtención de carbón activado. Por lo cual se realizó el ejemplo con la muestra “M7-1”, la cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35 % y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas.

3.4.1.1.1. Balance de materia en la etapa de selección de la materia prima

La selección de la materia prima se realizó debido a que tenía impurezas, estos eran: tegumento de maní, semillas (grano) de maní, tierra, raíces y troncos pequeños de la planta de maní.

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



Fuente: Elaboración propia, 2023.

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

$$A_{\text{cas.m.h+imp}} = B_{\text{imp}} + C_{\text{cas.m.h}} \quad (\text{Ecuación 3-15})$$

Donde:

$A_{\text{cas.m.h+imp}}$ = Masa de cáscara de maní húmeda e impurezas.

B_{imp} = Masa de impurezas como: tegumento de maní, semillas (grano) de maní, tierra, raíces y troncos pequeños de la planta de maní.

$C_{\text{cas.m.h}}$ = Masa de cáscara de maní húmeda.

El valor de la corriente $A_{\text{cas.m.h+imp}}$ y la corriente $C_{\text{cas.m.h}}$ se conoce, mientras que la corriente B_{imp} no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-15 se despeja la corriente B_{imp} y se calcula este.

$$B_{\text{imp}} = A_{\text{cas.m.h+imp}} - C_{\text{cas.m.h}}$$

$$B_{\text{imp}} = 42,500 \text{ g} - 34,000 \text{ g}$$

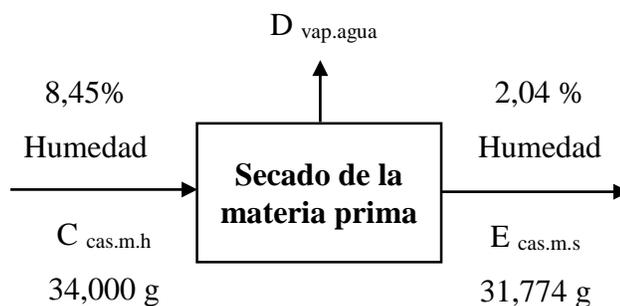
$$B_{\text{imp}} = 8,500 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de selección de la materia prima se detallan en la tabla III-16.

3.4.1.1.2. Balance de materia en la etapa de secado de la materia prima

El secado de la cáscara de maní se realizó en una estufa (ver Anexo 1) a una temperatura de 70 °C. En esta etapa se eliminó el contenido de agua que tenía la cáscara de maní.

Figura 3-4. Diagrama de flujo en la etapa de secado de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2023.

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

$$C_{\text{cas.m.h}} = D_{\text{vap.agua}} + E_{\text{cas.m.s}} \quad (\text{Ecuación 3-16})$$

Donde:

$C_{\text{cas.m.h}}$ = Masa de cáscara de maní húmeda.

$D_{\text{vap.agua}}$ = Masa de vapor de agua.

$E_{\text{cas.m.s}}$ = Masa de cáscara de maní seca.

El valor de la corriente $C_{\text{cas.m.h}}$ y la corriente $E_{\text{cas.m.s}}$ se conoce, mientras que la corriente $D_{\text{vap.agua}}$ no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-16 se despeja la corriente $D_{\text{vap.agua}}$ y se calcula este.

$$D_{\text{vap.agua}} = C_{\text{cas.m.h}} - E_{\text{cas.m.s}}$$

$$D_{\text{vap.agua}} = 34,000 \text{ g} - 31,774 \text{ g}$$

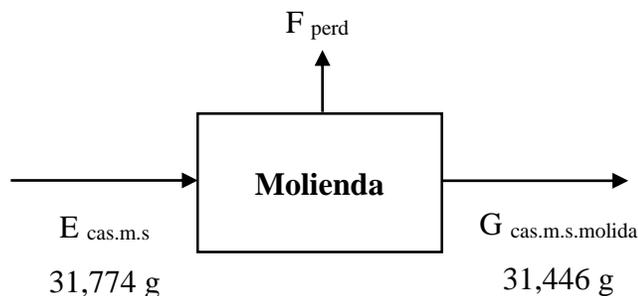
$$D_{\text{vap.agua}} = 2,226 \text{ g}$$

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-16.

3.4.1.1.3. Balance de materia en la etapa de molienda

La molienda de la cáscara de maní se realizó en dos molinos (ver Anexo 1): primero en el molino de discos para que la cáscara quede en trozos pequeños y posteriormente se molió en el molino de martillos para tener una molienda más pequeña. En el transcurso de la molienda de ambos molinos hubo pérdidas. Para calcular esto se pesó la cáscara de maní antes de ser molida y después de ser molida por ambos molinos, y así poder calcular las pérdidas.

Figura 3-5. Diagrama de flujo en la etapa de molienda



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El balance global en la etapa de molienda es:

$$E_{\text{cas.m.s}} = F_{\text{perd}} + G_{\text{cas.m.s.molida}} \quad (\text{Ecuación 3-17})$$

Donde:

$E_{\text{cas.m.s}}$ = Masa de cáscara de maní seca.

F_{perd} = Perdidas de cáscara de maní en la molienda.

$G_{\text{cas.m.s.molida}}$ = Masa de cáscara de maní seca y molida.

El valor de la corriente $E_{\text{cas.m.s}}$ y la corriente $G_{\text{cas.m.s.molida}}$ se conoce, mientras que la corriente F_{perd} no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-17 se despeja la corriente F_{perd} y se calcula este.

$$F_{\text{perd}} = E_{\text{cas.m.s}} - G_{\text{cas.m.s.molida}}$$

$$F_{\text{perd}} = 31,774 \text{ g} - 31,446 \text{ g}$$

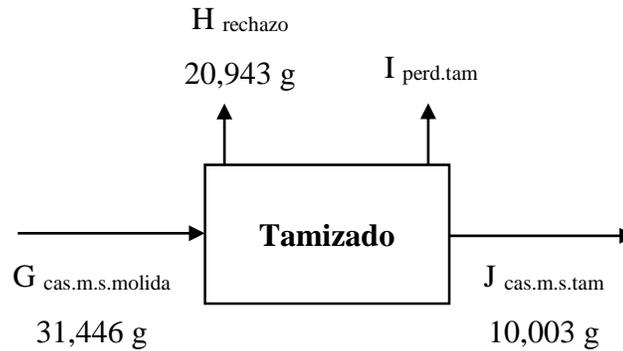
$$F_{\text{perd}} = 0,328 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de molienda se detallan en la tabla III-16.

3.4.1.1.4. Balance de materia en la etapa de tamizado

El tamizado se realizó para escoger la mejor granulometría de la cáscara de maní molida para obtener el carbón activado, por lo que se escogió una granulometría de 1 mm, se escogió este porque si hubiera sido una granulometría más pequeña este podría estar contaminada con tierra, ya que la cáscara de maní produce bajo tierra y si fuera una granulometría más grande este también podría tener tierra, por lo que se vio adecuado elegir una granulometría de 1 mm.

Figura 3-6. Diagrama de flujo en la etapa de tamizado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El balance global en la etapa de tamizado es:

$$G_{\text{cas.m.s.molida}} = H_{\text{rechazo}} + I_{\text{perd.tam}} + J_{\text{cas.m.s.tam}} \quad (\text{Ecuación 3-18})$$

Donde:

$G_{\text{cas.m.s.molida}}$ = Masa de cáscara de maní seca y molida.

H_{rechazo} = Cantidad de rechazo de la cáscara de maní tamizada.

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

$J_{\text{cas.m.s.tam}}$ = Masa de cáscara de maní seca tamizada.

Los valores de las corriente $G_{\text{cas.m.s.molida}}$, H_{rechazo} y la corriente $J_{\text{cas.m.s.tam}}$ se conoce, mientras que la corriente $I_{\text{perd.tam}}$ no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-18 se despeja la corriente $I_{\text{perd.tam}}$ y se calcula este.

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

$$I_{\text{perd.tam}} = 31,446 \text{ g} - 20,943 \text{ g} - 10,003 \text{ g}$$

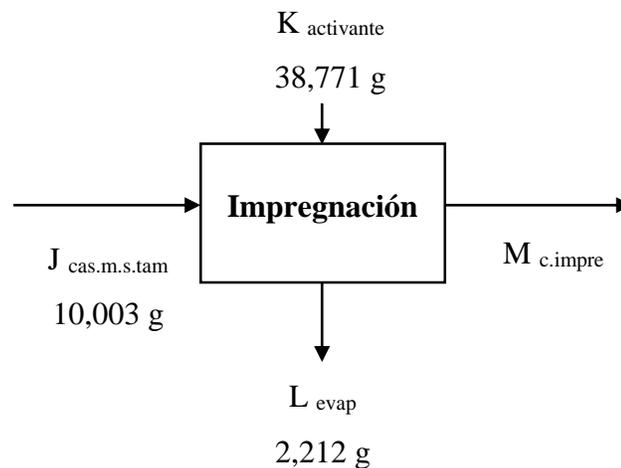
$$I_{\text{perd.tam}} = 0,500 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de tamizado se detallan en la tabla III-16.

3.4.1.1.5. Balance de materia en la etapa de impregnación

La impregnación es la etapa en el que el agente activante empieza reaccionar con el precursor (cáscara de maní seca), produciendo la deshidratación y evolución de productos volátiles gaseosos de la cascara de maní. La impregnación se realizó con el agente activante de ácido fosfórico a una concentración de 35% con una relación de impregnación 1:3 p/v, a una temperatura ambiente. Luego de impregnarlo se dejó en reposo por un tiempo de 22 horas, con agitación de manera ocasional.

Figura 3-7. Diagrama de flujo en la etapa de impregnación de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El balance global en la etapa de impregnación es:

$$J_{\text{cas.m.s.tam}} + K_{\text{activante}} = L_{\text{evap}} + M_{\text{c.impre}} \quad (\text{Ecuación 3-19})$$

Donde:

$J_{\text{cas.m.s.tam}}$ = Masa de cáscara de maní seca.

$K_{\text{activante}}$ = Masa de agente activante (H_3PO_4).

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

$M_{\text{c.impre}}$ = Masa de cáscara de maní impregnada con exceso de agente activante (H_3PO_4).

Los valores de las corrientes $J_{\text{cas.m.s.tam}}$, $K_{\text{activante}}$ y L_{evap} se conocen, mientras que la corriente $M_{\text{c.impre}}$ no se la conoce, por lo que con la ayuda de la ecuación 3-19 se despeja la corriente $M_{\text{c.impre}}$ y se calcula este.

$$M_{\text{c.impre}} = J_{\text{cas.m.s.tam}} + K_{\text{activante}} - L_{\text{evap}}$$

$$M_{\text{c.impre}} = 10,003 \text{ g} + 38,771 \text{ g} - 2,212 \text{ g}$$

$$M_{\text{c.impre}} = 46,562 \text{ g}$$

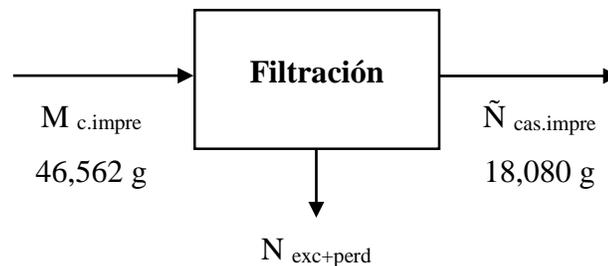
Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes en la etapa de impregnación se detallan en la tabla III-17.

3.4.1.1.6. Balance de materia en la etapa de filtración

La filtración se realizó para quitar al exceso de agente activante (ácido fosfórico) de la cáscara de maní impregnada. Para extraer de manera rápida y fácil el exceso de ácido fosfórico se realizó una filtración al vacío.

La filtración de la cáscara de maní impregnada se realizó para extraer el exceso de ácido fosfórico que se describe en el capítulo II, en el punto 2.5.4.3. Se observó que una vez filtrado existen pequeñas pérdidas de la cáscara de maní previamente impregnada, que estas se quedaban en el papel filtro y vaso precipitado en el que se mezcló el ácido fosfórico y la cáscara de maní.

Figura 3-8. Diagrama de flujo en la etapa de filtración de la cáscara de maní impregnada



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El balance global en la etapa de filtración es:

$$M_{\text{c.impre}} = N_{\text{exc+perd}} + \tilde{N}_{\text{cas.impre}} \quad (\text{Ecuación 3-20})$$

Donde:

$M_{c.impre}$ = Masa de cáscara de maní impregnada con exceso de agente activante (H_3PO_4).

$N_{exc+perd}$ = Masa en exceso de agente activante (H_3PO_4) y perdidas.

$\tilde{N}_{cas.impre}$ = Masa de cáscara de maní impregnada.

El valor de la corriente $\tilde{N}_{cas.impre}$ se conoce y la corriente $M_{c.impre}$ también se conoce ya que fue calculada en la anterior etapa. La corriente $N_{exc+perd}$ no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-20 se despeja la corriente $N_{exc+perd}$ y se calcula este.

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

$$N_{exc+perd} = 46,562 \text{ g} - 18,080 \text{ g}$$

$$N_{exc+perd} = 28,482 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de filtración se detallan en la tabla III-17.

3.4.1.1.7. Balance de materia en la etapa de activación

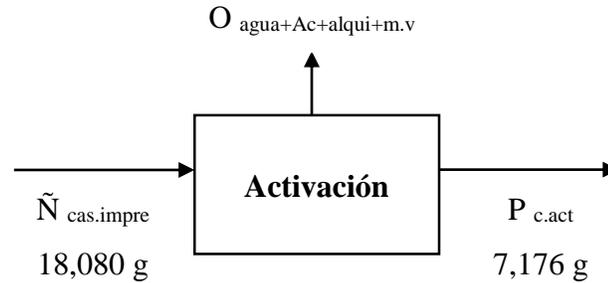
La etapa activación química es la más importante, es donde la materia prima ya impregnada se convierte en carbón activado.

La etapa de activación es donde ocurre también la carbonización, es decir la carbonización y activación es donde se realiza la eliminación de alquitranes, materiales volátiles, agua y parte del agente activante o ácido de la cáscara de maní que estuvo previamente impregnado. Durante la carbonización de la cáscara de maní el agente activante penetra en el interior de los poros de su estructura botánica, lo cual produce el desarrollo de una estructura porosa más desarrollada. Entonces la activación consiste en el aumento de porosidad de la cáscara de maní para obtener el carbón activado de alta porosidad y sin alquitranes, materiales volátiles, agua y ácido. En resumen, se puede decir que a medida que la cáscara de maní previamente impregnada se carbonice también se irá activando, ya que el agente activante con la ayuda de la temperatura irá

aumentando la porosidad ya que se eliminara los alquitranes, materiales volátiles, agua y parte del ácido, y de esta manera obteniendo el carbón activado.

La activación química se realizó en una mufla (ver Anexo 1) a una temperatura de 600 °C, durante 2 horas.

Figura 3-9. Diagrama de flujo en la etapa de activación de la cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

El balance global en la etapa de activación es:

$$\tilde{N}_{\text{cas.impre}} = O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}} + P_{\text{c.act}} \quad (\text{Ecuación 3-21})$$

Donde:

$\tilde{N}_{\text{cas.impre}}$ = Masa de cáscara de maní impregnada.

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

$P_{\text{c.act}}$ = Masa de carbón activado.

Los valores de las corrientes $\tilde{N}_{\text{cas.impre}}$ y $P_{\text{c.act}}$ se conocen como se ve en la figura 3-9, mientras que la corriente $O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}}$ no se conoce, por cual con ayuda de la ecuación 3-21 se despeja la corriente $O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}}$ y se calcula este.

$$O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}} = \tilde{N}_{\text{cas.impre}} - P_{\text{c.act}}$$

$$O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}} = 18,080 \text{ g} - 7,176 \text{ g}$$

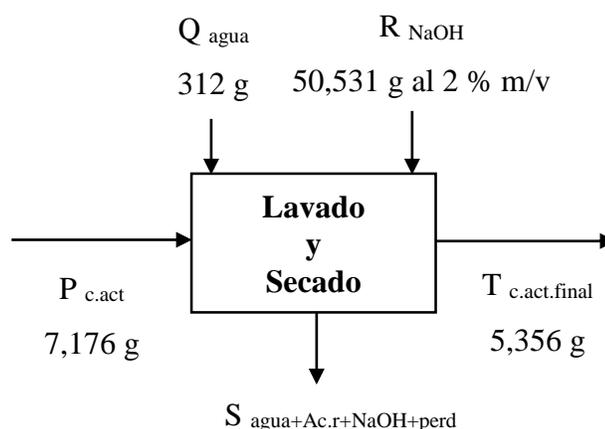
$$O_{\text{agua+Ac+alqui+m.v}} = 10,904 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de activación se detallan en la tabla III-17.

3.4.1.1.8. Balance de materia en la etapa de lavado y secado

El lavado del carbón activado se realizó para eliminar todas las impurezas, exceso de ácido, sales inorgánicas y orgánicas que se hubiesen podido formar. La etapa de lavado se describe en el capítulo II, en el punto 2.5.4.5, donde se observó que al lavar el producto se generó pequeñas pérdidas ya que las partículas más pequeñas del carbón activado se quedaban en los poros del papel filtro. Luego del lavado se secó el carbón activado en una estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C por un tiempo de 22 horas.

Figura 3-10. Diagrama de flujo en la etapa de lavado y secado del carbón activado de cáscara de maní



Fuente: Elaboración propia, 2023.

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

$$P_{c.act} + Q_{agua} + R_{NaOH} = S_{agua+Ac.r+NaOH+perd} + T_{c.act.final} \quad (\text{Ecuación 3-22})$$

Donde:

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

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

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

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

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

Los valores de las corrientes $P_{c.act}$, Q_{agua} , R_{NaOH} y $T_{c.act.final}$ se conocen, mientras que la corriente $S_{agua+Ac.r+NaOH+perd}$ no se conoce, por lo cual con la ayuda de la ecuación 3-22 se despeja la corriente $S_{agua+Ac.r+NaOH+perd}$ y se calcula este.

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

$$S_{agua+Ac.r+NaOH+perd} = 7,176 \text{ g} + 312 \text{ g} + 50,531 \text{ g} - 5,356 \text{ g}$$

$$S_{agua+Ac.r+NaOH+perd} = 364,351 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes en la etapa de lavado y secado se detallan en la tabla III-17.

3.4.2. Balance de energía

El balance de energía se realizó en las etapas donde hubo consumo de energía eléctrica. Para esto se realizó de la mejor muestra de obtención de carbón activado que es la muestra “M7-1”, la cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35 % y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas.

3.4.2.1. Balance de energía en la etapa de secado de la materia prima

El secado de la materia prima que es la cáscara de maní se realizó en una estufa (ver Anexo 1), este tiene un factor de consumo de 0,5. El secado se realizó a una temperatura de 70 °C, por un tiempo de 3 horas.

Datos

$$\text{Tiempo} = t = 3 \text{ h}$$

$$\text{Temperatura} = 70 \text{ °C}$$

$$\text{Factor} = f = 0,5$$

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

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

Para calcular la energía consumida en la etapa de secado de la materia prima se utiliza la siguiente ecuación:

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

$$E_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW} \times 3 \text{ h} \times 0,5$$

$$E_{\text{estufa}} = 3 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 3 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 10800 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de secado de la materia prima es 10800 kJ.

3.4.2.2. Balance de energía en la etapa de molienda

La molienda de cáscara de maní se realizó en dos molinos: primero en el molino de discos para que la cáscara quede en trozos pequeños y posteriormente se molió en el molino de martillos para tener una molienda más pequeña. La energía consumida por los molinos se calculó por separado y luego se sumó para obtener la energía total de consumo en la etapa de molienda.

Molino de discos

Datos

Tiempo = $t = 3,863 \text{ min} = 0,064 \text{ h}$

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

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

Para calcular la energía consumida en la etapa de molienda se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{m.discos}} = P_{\text{m.discos}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-24})$$

$$E_{\text{m.discos}} = 1,4 \text{ kW} \times 0,064 \text{ h}$$

$$E_{\text{m.discos}} = 0,089 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{m.discos}} = 0,089 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 320,4 \text{ kJ}$$

La energía consumida por el molino de discos es 320,4 kJ.

Molino de martillo

Datos

Tiempo = $t = 3,956 \text{ min} = 0,066 \text{ h}$

Potencia del molino de martillo = $P_{\text{m.martillo}} = 1 \text{ kW}$

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

Para calcular la energía consumida en la etapa de molienda se utiliza la siguiente ecuación:

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

$$E_{\text{m.martillo}} = 1 \text{ kW} \times 0,066 \text{ h}$$

$$E_{\text{m.martillo}} = 0,066 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{m.martillo}} = 0,066 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 237,6 \text{ kJ}$$

La energía consumida por el molino de martillo es 237,6 kJ.

La energía consumida total ($E_{\text{energia.con.total}}$) en la etapa de molienda es:

$$E_{\text{energia.con.total}} = E_{\text{m.discos}} + E_{\text{m.martillo}}$$

$$E_{\text{energia.con.total}} = 0,089 \text{ kWh} + 0,066 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{energia.con.total}} = 0,155 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{energia.con.total}} = 0,155 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 558 \text{ kJ}$$

La energía consumida total en la etapa de molienda es 558 kJ.

3.4.2.3. Balance de energía en la etapa de tamizado

El tamizado se realizó para escoger la mejor granulometría de la cáscara de maní molida para obtener el carbón activado, por lo que se escogió una granulometría de 1 mm. El tamizado se realizó durante 15 minutos.

Datos

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:

$$E_{\text{tamizador}} = P_{\text{tamizador}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-26})$$

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

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

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

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

3.4.2.4. Balance de energía en la etapa filtración

La filtración se realizó dos veces que son las siguientes: la primera filtración se realizó para separar el exceso del agente activante de la cáscara de maní y la segunda filtración se realizó cuando se lavó el carbón activado obtenido de cáscara de maní. Ambas filtraciones se realizaron mediante el uso del equipo de bomba de vacío. La primera filtración duro 5 minutos y la segunda 12 minutos.

Datos

Sumando el tiempo del primer y segundo filtrado se tiene que es 17 minutos.

Tiempo = $t = 17 \text{ min} = 0,283 \text{ h}$

Potencia de la bomba de vacío = $P_{\text{bomba de vacío}} = 0,4 \text{ kW}$

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

Para calcular la energía consumida en la etapa de filtración se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{bomba de vacío}} = P_{\text{bomba de vacío}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-27})$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,4 \text{ kW} \times 0,283 \text{ h}$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,113 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{bomba de vacío}} = 0,113 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 406,8 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de filtración por la bomba de vacío es 406,8 kJ.

3.4.2.5. Balance de energía en la etapa de activación

La activación química se realizó en una mufla (ver Anexo 1), en la cual se introdujo la muestra a este por un tiempo de 2 horas y a una temperatura de 600°C, dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35%.

Datos

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

Temperatura = 600 °C

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

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

Para calcular la energía consumida en la etapa de activación se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{mufla}} = P_{\text{mufla}} \times t \quad (\text{Ecuación 3-28})$$

$$E_{\text{mufla}} = 3,2 \text{ kW} \times 2 \text{ h}$$

$$E_{\text{mufla}} = 6,4 \text{ kWh}$$

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

La energía consumida en la etapa de activación es 23040 kJ.

3.4.2.6. Balance de energía en la etapa de secado del carbón activado

El secado del carbón activado se hizo luego del lavado del carbón activado, este se realizó en una estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C por un tiempo de 22 horas, para eliminar toda cantidad de agua que tenía el carbón activado granular.

Datos

Tiempo = $t = 22$ h

Temperatura = 105 ± 5 °C

Factor = $f = 0,5$

Potencia de la estufa = $P_{\text{estufa}} = 2$ 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 siguiente ecuación:

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} \times t \times f \quad (\text{Ecuación 3-29})$$

$$E_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW} \times 22 \text{ h} \times 0,5$$

$$E_{\text{estufa}} = 22 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 22 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 79200 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de secado del carbón activado es 79200 kJ.

3.5. Determinación del Rendimiento del Proceso

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

$$\% R = \frac{\text{Masa final del carbón activado}}{\text{Masa inicial de la cáscara de maní}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3-30})$$

A continuación, se ejemplifica con la mejor muestra obtenida de carbón activado en cuanto a masa que es la muestra “M 4-1”, la cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35% y con una temperatura de activación de 500 °C por un tiempo de 3 horas.

Donde:

Masa inicial de la cáscara de maní húmeda e impurezas. = $m_{\text{cas.m.h+imp}} = 42,500 \text{ g}$

Masa final del carbón activado obtenido = $m_{\text{c.act.final}} = 5,638 \text{ g}$

Porcentaje de rendimiento = % R

$$\% R = \frac{5,638 \text{ g}}{42,500 \text{ g}} \times 100$$

$$\% R = 13,266$$

El rendimiento en masa que se calculó no determina la calidad del carbón activado de la cáscara de maní, es por eso que para este proceso se determinó el porcentaje de remoción del azul de metileno, el índice de yodo y el área superficial en función al índice de yodo los cuales indican la calidad del producto obtenido.

En la tabla III-18 se muestra el porcentaje del rendimiento en masa de cada muestra experimental realizada para obtener el carbón activado, también se observa el promedio de todas las muestras.

Tabla III-18. Rendimiento en masa de cada experimentos y réplicas del carbón activado obtenido a partir de la cáscara de maní

Muestra	m cas.m.h+imp (g)	m c.act.final (g)	% Rendimiento
M₁₋₁	42,500	5,064	11,915
M₂₋₁	42,500	5,047	11,875
M₃₋₁	42,500	5,359	12,609
M₄₋₁	42,500	5,638	13,266
M₅₋₁	42,500	4,867	11,452
M₆₋₁	42,500	4,741	11,155
M₇₋₁	42,500	5,356	12,602
M₈₋₁	42,500	5,404	12,715
M₁₋₂	42,500	5,107	12,016
M₂₋₂	42,500	4,971	11,696
M₃₋₂	42,500	5,223	12,289
M₄₋₂	42,500	5,587	13,146
M₅₋₂	42,500	4,755	11,188
M₆₋₂	42,500	4,644	10,927
M₇₋₂	42,500	5,291	12,449
M₈₋₂	42,500	5,385	12,671
Promedio	42,500	5,152	12,123

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El promedio del porcentaje de rendimiento en masa del mejor carbón activado obtenido de cáscara de maní es la muestra M₇₋₁ y su réplica M₇₋₂ dio un resultado de 12,526 %.

3.6. Análisis Estadístico del Diseño Factorial

El análisis estadístico se realizó mediante el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 26.0; el cual permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera los resultados más significativos y confiables.

El análisis de varianza ANOVA es el análisis estadístico que determina la influencia de los factores tiempo, concentración, temperatura y sus respectivas interacciones sobre la variable respuesta, lo cuales son, área superficial en función al índice de yodo y el porcentaje de remoción del azul de metileno.

3.6.1. Análisis estadístico de la variable respuesta área superficial en función al índice de yodo

En la tabla III-19, se muestran los datos introducidos al programa IBM SPSS de acuerdo al diseño factorial planteado, cada factor o variable independiente tiene un nivel superior (+1) y un nivel inferior (-1).

Tabla III-19. Datos para el cálculo del Área superficial

N° Muestra	Variables independientes			Variable dependiente
	Tiempo	Concentración	Temperatura	Área superficial
1	-1	-1	-1	602,0643
2	+1	-1	-1	625,9504
3	-1	+1	-1	669,1281
4	+1	+1	-1	684,3840
5	-1	-1	+1	652,3276
6	+1	-1	+1	663,7212
7	-1	+1	+1	716,0691
8	+1	+1	+1	693,8274
9	-1	-1	-1	610,3244
10	+1	-1	-1	637,8552
11	-1	+1	-1	679,8507
12	+1	+1	-1	687,1437
13	-1	-1	+1	658,6927
14	+1	-1	+1	667,6165
15	-1	+1	+1	710,4563
16	+1	+1	+1	696,3635

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-20, 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.

Tabla III-20. Pruebas de efectos inter-sujetos para el Área superficial

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Área superficial					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	16736,689 ^a	6	2789,448	96,066	0,000
Intersección	7096596,436	1	7096596,436	244401,240	0,000
Tiempo	209,878	1	209,878	7,228	0,025
Concentración	10955,312	1	10955,312	377,292	0,000
Temperatura	4302,491	1	4302,491	148,174	0,000
t * C	457,103	1	457,103	15,742	0,003
t * T	506,058	1	506,058	17,428	0,002
C * T	305,847	1	305,847	10,533	0,010
Error	261,330	9	29,037		
Total	7113594,455	16			
Total corregido	16998,019	15			

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-20 se puede observar que todas las variables tiempo, concentración, temperatura y sus interacciones, tiempo*concentración, tiempo*temperatura, concentración*temperatura, son significativas ya que poseen una significancia menor a 0,05 para un nivel de confianza del 95%.

Una vez establecido las variables con significancia menor a 0,05, se procede a realizar la regresión lineal.

En la tabla III-21, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 98,5 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla III-21. Ajustes de datos para el modelo lineal general

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,992 ^a	0,985	0,974	5,38857
a. Predictores: (Constante), C * T, t * T, t * C, Temperatura, Concentración, Tiempo				
b. Variable dependiente: Área superficial				

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-22 se muestran los cálculos realizados para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales del área superficial.

Tabla III-22. ANOVA para el Área superficial

ANOVA ^a						
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	16736,689	6	2789,448	96,066	,000 ^b
	Residuo	261,330	9	29,037		
	Total	16998,019	15			
a. Variable dependiente: Área superficial						
b. Predictores: (Constante), C * T, t * T, t * C, Temperatura, Concentración, Tiempo						

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuesta, en la tabla III-23, se muestran los resultados de los coeficientes del modelo de la regresión lineal.

Tabla III-23. Coeficientes del modelo de regresión lineal para el Área superficial

Coeficientes ^a								
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	
1	(Constante)	665,986	1,347		494,370	0,000	662,938	669,033
	Tiempo	3,622	1,347	0,111	2,689	0,025	0,574	6,669
	Concentración	26,167	1,347	0,803	19,424	0,000	23,119	29,214
	Temperatura	16,398	1,347	0,503	12,173	0,000	13,351	19,446
	t * C	-5,345	1,347	-0,164	-3,968	0,003	-8,392	-2,298
	t * T	-5,624	1,347	-0,173	-4,175	0,002	-8,671	-2,576
	C * T	-4,372	1,347	-0,134	-3,245	0,010	-7,420	-1,325

a. Variable dependiente: Área superficial

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

De acuerdo al diseño factorial propuesto todas las variables son significativas ya que poseen un nivel de significancia menor a 0,05 como se puede ver en la tabla III-23, es decir que todas las variables inciden en la calidad del carbón activado obtenido a partir de la cascara de maní. Con los valores numéricos de B, se obtiene la ecuación de la regresión lineal para el área superficial.

$$\text{Área superficial} = 665,986 + 3,622 \times t + 26,167 \times C + 16,398 \times T - 5,345 (t \times C) - 5,624 (t \times T) - 4,372 (C \times T) \quad (\text{Ecuación 3-31})$$

Donde:

t = Tiempo.

C = Concentración

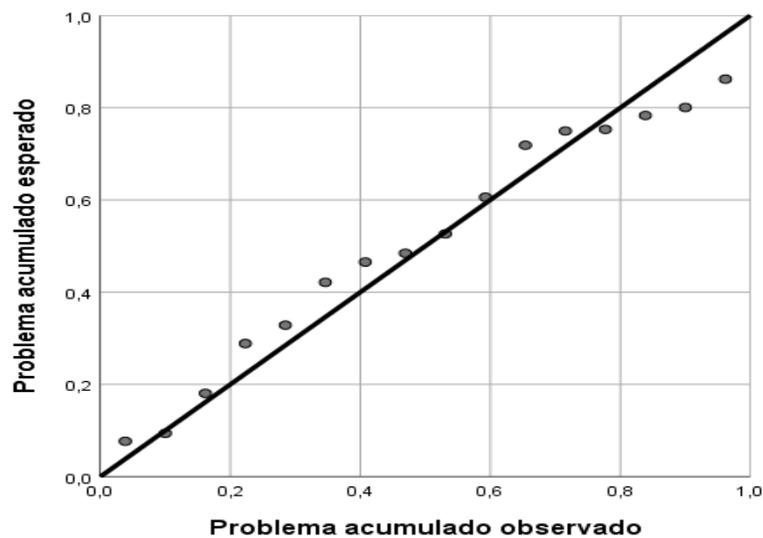
T = Temperatura.

En la figura 3-11, se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis realizado el desajuste no muestra significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura 3-11. Modelo lineal

Gráfico P-P normal de regresión Residuo estandarizado

Variable dependiente: Área superficial



Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-24 se compara el área superficial observado con el área superficial del modelo de programa IBM SPSS, en la cual se puede observar que no existe gran variación, además que el área superficial más altos del modelo coinciden con las muestras 7 y 15 o que es lo mismo M_{7-1} y M_{7-2} de las tablas III-8 y III-9.

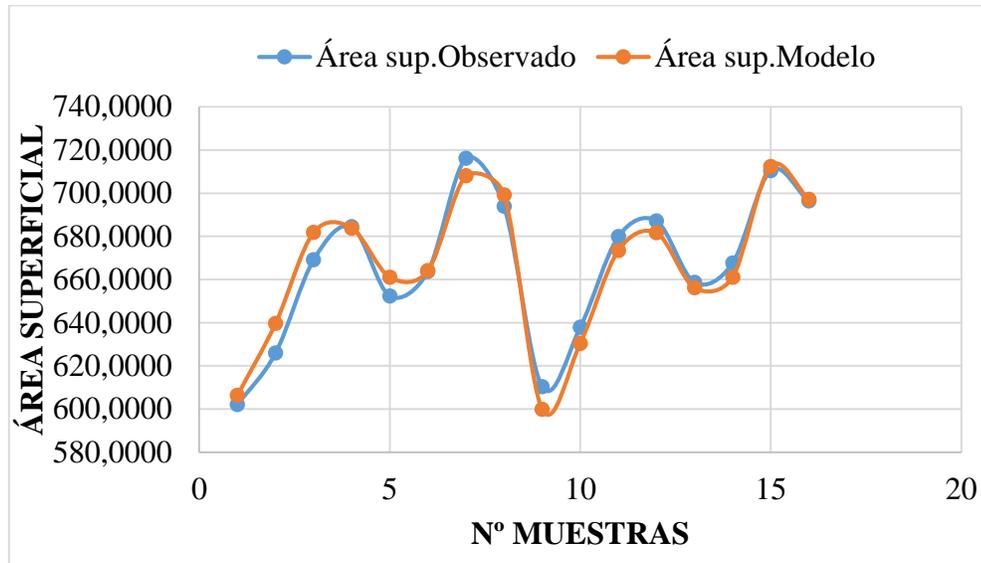
Tabla III-24. Comparación del área superficial observado y el área superficial del modelo

N° Muestra	Área superficial observado	Área superficial modelo	Error
1	602,0643	606,3195	-4,2552
2	625,9504	639,6195	-13,6692
3	669,1281	681,7464	-12,6183
4	684,3840	683,7500	0,6340
5	652,3276	661,0726	-8,7450
6	663,7212	664,0966	-0,3754
7	716,0691	707,9928	8,0763
8	693,8274	699,1688	-5,3415
9	610,3244	599,8950	10,4294
10	637,8552	630,3603	7,4949
11	679,8507	673,4066	6,4441
12	687,1437	681,6035	5,5401
13	658,6927	656,1219	2,5708
14	667,6165	661,0669	6,5496
15	710,4563	712,3584	-1,9020
16	696,3635	697,1963	-0,8328

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 3-12, se muestra gráficamente la comparación del área superficial observado y el área superficial del modelo matemático, notándose la similitud de la trayectoria entre el observado y el modelo, con un error no muy significativo.

Figura 3-12. Comparación gráfica del área superficial observado y el área superficial del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.6.2. Análisis estadístico de la variable respuesta % de remoción del azul de metileno

En la tabla III-25, se muestran los datos introducidos al programa IBM SPSS de acuerdo al diseño factorial planteado, cada factor o variable independiente tiene un nivel superior (+1) y un nivel inferior (-1).

Tabla III-25. Datos para el cálculo del análisis de varianza del % de Remoción del azul de metileno

N° Muestra	Variables independientes			Variable dependiente
	Tiempo	Concentración	Temperatura	% de Remoción del azul de metileno
1	-1	-1	-1	97,1612
2	+1	-1	-1	98,0238
3	-1	+1	-1	98,4943
4	+1	+1	-1	98,808
5	-1	-1	+1	98,4159
6	+1	-1	+1	98,7296
7	-1	+1	+1	99,2785
8	+1	+1	+1	98,8864
9	-1	-1	-1	97,0827
10	+1	-1	-1	97,7885
11	-1	+1	-1	98,3375
12	+1	+1	-1	98,8864
13	-1	-1	+1	98,5727
14	+1	-1	+1	98,7296
15	-1	+1	+1	99,3569
16	+1	+1	+1	98,9648

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-26, se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta de % de remoción del azul de metileno, tomando en cuenta los factores de tiempo, concentración y temperatura, así como sus interacciones.

Tabla III-26. Pruebas de efectos inter-sujetos para el % de Remoción del azul de metileno

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: % de Remoción del azul de metileno					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	6,530 ^a	6	1,088	117,439	0,000
Intersección	155140,824	1	155140,824	16740247,417	0,000
Tiempo	0,280	1	0,280	30,236	0,000
Concentración	2,648	1	2,648	285,705	0,000
Temperatura	2,522	1	2,522	272,105	0,000
t * C	0,240	1	0,240	25,924	0,001
t * T	0,471	1	0,471	50,801	0,000
C * T	0,369	1	0,369	39,862	0,000
Error	0,083	9	0,009		
Total	155147,438	16			
Total corregido	6,614	15			

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-26 se puede observar que todas las variables tiempo, concentración, temperatura y sus interacciones, tiempo*concentración, tiempo*temperatura, concentración*temperatura, son significativas ya que poseen una significancia menor a 0,05 o el 5% para un nivel de confianza del 95%.

Una vez establecido las variables con significancia menor a 0,05, se procede a realizar la regresión lineal.

En la tabla III-27, se muestra el resumen del modelo, el cual se ajusta a los datos a un R^2 igual al 98,7 % de variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

Tabla III-27. Ajustes de datos para el modelo lineal general

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,994 ^a	0,987	0,979	0,09627
a. Predictores: (Constante), C * T, t * T, t * C, Temperatura, Concentración, Tiempo				
b. Variable dependiente: % de Remoción del azul de metileno				

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-28 se muestran los cálculos realizados para la determinación de los coeficientes o constantes para las ecuaciones de las correlaciones lineales del % de remoción del azul de metileno.

Tabla III-28. ANOVA para el % de Remoción del azul de metileno

ANOVA ^a						
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	6,530	6	1,088	117,439	,000 ^b
	Residuo	0,083	9	0,009		
	Total	6,614	15			
a. Variable dependiente: % de Remoción del azul de metileno						
b. Predictores: (Constante), C * T, t * T, t * C, Temperatura, Concentración, Tiempo						

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuesta, en la tabla III-29, se muestran los resultados de los coeficientes del modelo de la regresión lineal.

Tabla III-29. Coeficientes del modelo de regresión lineal para el % de Remoción del azul de metileno

Coeficientes ^a								
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	
1	(Constante)	98,470	0,024		4091,485	0,000	98,415	98,524
	Tiempo	0,132	0,024	0,206	5,499	0,000	0,078	0,187
	Concentración	0,407	0,024	0,633	16,903	0,000	0,352	0,461
	Temperatura	0,397	0,024	0,617	16,496	0,000	0,343	0,451
	t * C	-0,123	0,024	-0,191	-5,092	0,001	-0,177	-0,068
	t * T	-0,172	0,024	-0,267	-7,127	0,000	-0,226	-0,117
	C * T	-0,152	0,024	-0,236	-6,314	0,000	-0,206	-0,098

a. Variable dependiente: % de Remoción del azul de metileno

Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

De acuerdo al diseño factorial propuesto todas las variables son significativas ya que poseen un nivel de significancia menor a 0,05 como se puede ver en la tabla III-29, es decir que todas las variables inciden en la calidad del carbón activado obtenido a partir de la cascara de maní. Con los valores numéricos de B, se obtiene la ecuación de la regresión lineal para el % de remoción del azul de metileno.

$$\% \text{ de Remoción del azul de metileno} = 98,470 + 0,132 \times t + 0,407 \times C + 0,397 \times T - 0,123 (t \times C) - 0,172 (t \times T) - 0,152 (C \times T) \quad (\text{Ecuación 3-32})$$

Donde:

t = Tiempo.

C = Concentración

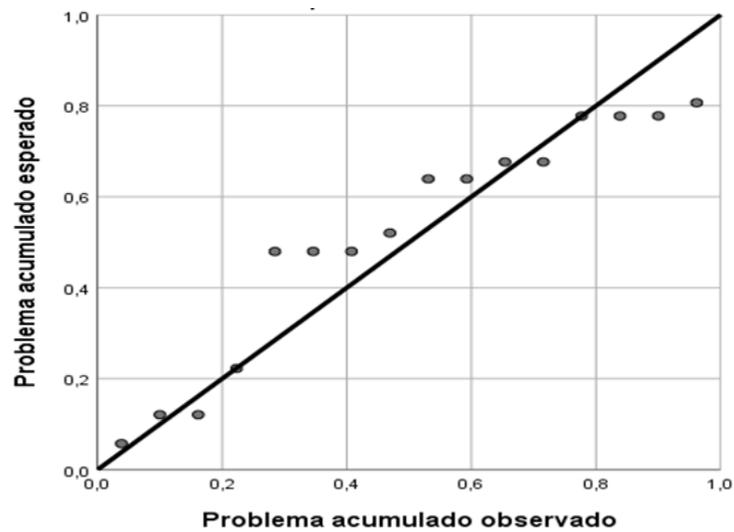
T = Temperatura.

En la figura 3-13, se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis realizado el desajuste no muestra significancia, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura 3-13. Modelo lineal

Gráfico P-P normal de regresión Residuo estandarizado

Variable dependiente: % de Remoción del azul de metileno



Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2023.

En la tabla III-30 se compara el % de remoción del azul de metileno observado con el % de remoción del azul de metileno del modelo de programa IBM SPSS, en la cual se puede observar que no existe demasiada variación, además que los porcentajes de remoción más altos del modelo coinciden con las muestras 7 y 15 o que es lo mismo M_{7-1} y M_{7-2} de las tablas III-12 y III-13.

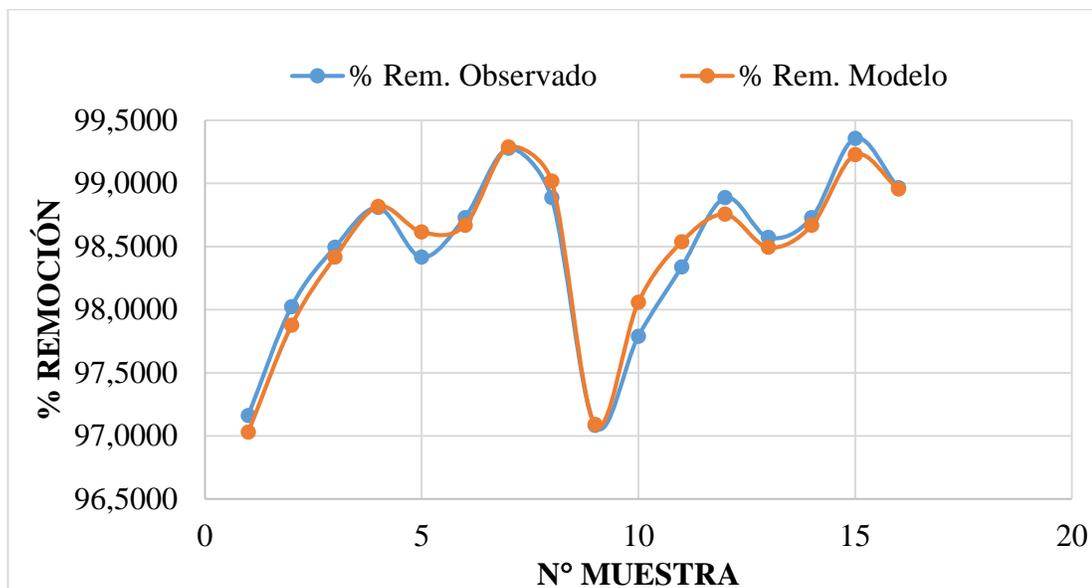
Tabla III-30. Comparación del % de remoción del azul de metileno observado y el % de remoción del azul de metileno del modelo

Nº Muestra	% de Remoción del azul de metileno observado	% Remoción del azul de metileno modelo	Error
1	97,1612	97,0304	0,1308
2	98,0238	97,8756	0,1482
3	98,4943	98,4159	0,0784
4	98,8080	98,8167	-0,0087
5	98,4159	98,6163	-0,2004
6	98,7296	98,6686	0,0610
7	99,2785	99,2872	-0,0087
8	98,8864	99,0171	-0,1307
9	97,0827	97,0915	-0,0088
10	97,7885	98,0587	-0,2702
11	98,3375	98,5379	-0,2004
12	98,8864	98,7557	0,1307
13	98,5727	98,4943	0,0784
14	98,7296	98,6686	0,0610
15	99,3569	99,2262	0,1307
16	98,9648	98,9561	0,0087

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 3-14, 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 3-14. Comparación gráfica del % de remoción del azul de metileno observado y el % de remoción del azul de metileno del modelo



Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.7. Comparación de la Mejor Muestra de Carbón Activado Obtenido con uno Comercial

En la siguiente tabla III-31 se compara el carbón activado comercial de la tienda DIEMAR, con el mejor carbón activado granular obtenido, que es la muestra “M7”, lo cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico a una concentración de 35% y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de 2 horas.

Tabla III-31. Comparación entre carbones activados

Análisis	Carbón activado comercial (DIEMAR)	Carbón activado obtenido “M7”
Masa adsorbida de azul de metileno (mg/g)	0,6897	0,6791
% Remoción de azul de metileno	92,1422	90,7307

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los valores de la muestra “M₇” de la tabla III-31 son los promedios de la réplica 1 y réplica 2 de los experimentos realizados. La comparación de masa adsorbida y porcentaje de remoción de azul de metileno entre carbones activados se realizó en granulado y no en polvo, ya que uno de los objetivos específicos es obtener carbón activado granular, para lo cual se izó este análisis de comparación.

El porcentaje de remoción de azul de metileno indica la capacidad de adsorción de un carbón activo frente a moléculas grandes. En la tabla III-31 se observa que el mejor carbón activado granulado es el comercial, es decir que es de buena calidad, el carbón activado obtenido “M₇” es también de buena calidad, ya que su porcentaje de remoción está por encima del 50 %.

3.8. Prueba de aplicación del carbón activado obtenido de la cáscara de maní

Las pruebas de aplicación que se realizan al carbón activado son para demostrar su capacidad de adsorción y su uso cotidiano de este. El carbón activado puede alterar el pH del agua, dependiendo de su método de activación y de la composición química del agua a tratarse.

Para el presente proyecto se realizó una aplicación con agua clorada, en la que consistió en la eliminación del cloro del agua con el carbón activado obtenido de cascara de maní, para esto se realizó lo siguiente:

- Primeramente, se agarró en una botella descartable 2 litros de agua del grifo de laboratorio de operaciones unitarias (LOU) de la carrera de Ingeniería Química de la UAJMS.
- Con ayuda de una pipeta de 1 ml, se pipetea hipoclorito de sodio (lavandina) y se echa tres gotas a la botella que tiene 2 litros de agua, para elevar la cantidad de cloro, se tapa la botella y se agita para que se mezcle.
- De la mezcla anterior se adiciona 1 litro de agua clorada a una botella de un litro y este se tapa. A esta muestra se codifica como **M 7 Antes 1**, que quiere decir antes de la filtración con el carbón activado obtenido de la cascara de

maní. A la muestra se midió su pH inicial para ver cuánto cambio luego de la filtración.

- Se pesó 10 g de carbón activado granulado obtenido de la cáscara de maní en un vidrio de reloj.
- Cortar papel filtro Whatman 42 según el tamaño del embudo que se utilizó y se pasó el carbón activado previamente pesado al embudo y se comenzó a filtrar por gravedad el resto de agua clorada que quedó en la botella de 2 litros.
- Se adiciona 500 ml de agua filtrada a una botella de 500 ml. A esta muestra se codifica como **M 7 Después 2**, que quiere decir después de la filtración con el carbón activado obtenido de cáscara de maní. Con el resto del agua filtrada que quedo se midió el pH que sería el final.

Figura 3-15. Filtración del agua clorada



Fuente: Elaboración propia, 2024.

- Después estas dos muestras **M 7 Antes 1** y **M 7 Después 2**, se mandó a analizar al laboratorio de CEANID la cantidad de cloro residual.

Nota: El cloro residual es el que queda disponible después de haber efectuado la desinfección del agua.

Tabla III-32. Resultados de la prueba de aplicación

Análisis realizado	Parámetro	Agua clorada sin tratar M 7 Antes 1	Agua clorada filtrada con el carbón activado M 7 Después 2
CEANID	Cloro residual (mg/l)	2,60	< 0,1
LOU	pH	7,46	6,58

Fuente: Elaboración propia, 2024.

De la tabla III-31, se puede observar que, al filtrar la muestra de agua clorada por un filtro con carbón activado de cáscara de maní, este adsorbe el cloro, por tanto, podemos decir que el carbón activado obtenido de cascara de maní es eficiente para eliminar el cloro. Además, se puede ver que el pH disminuye de 7,46 a 6,58. Los resultados obtenidos del cloro residual, realizado por el laboratorio de CEANID se puede ver en el Anexo 11.

Para que se pueda disminuir el cloro a cero se recomienda compactar el carbón activado de cáscara de maní como un lecho para que se pueda filtrar lento y este pueda adsorber todo el cloro.

En algún momento el agua llega con exceso de cloro a las industrias, entonces el carbón activado obtenido de la cáscara de maní se puede usar para bajar ese exceso de cloro del agua.

CAPÍTULO IV
COSTOS DEL PROYECTO

4. COSTOS DEL PROYECTO

4.1. Evaluación de Costos

Para determinar el presupuesto de presente proyecto de investigación, se realizó la evaluación de costos 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 maní

N°	Reactivo	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Ácido fosfórico al 85 %	80	l.	1	80
2	Hidróxido de sodio	120	kg.	0,05	6
3	Agua destilada	4	l.	25	100
4	Ácido clorhídrico al 5 %	240	l.	0,5	120
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	240	l.	2	480
8	Almidón	200	l.	0,2	40
Total					998,4

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-2. Detalle de costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental del proceso de obtención de carbón activado a partir de la cáscara de maní

N°	Descripción	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Papel filtro Whatman 42	8	Pliegue	10	80
2	Vaso precipitado de 500 ml	45	Pza.	1	45
3	Barbijo desechable	10	Caja	1	10
4	Guantes látex	30	Caja	1	30
5	Botellas de plástico de 1000 ml	2	Pza.	6	12
6	Varilla de vidrio	16	Pza.	2	32
7	Crisol de 100 ml	80	Pza.	2	160
8	pH-metro	160	Pza.	1	160
9	Bolsas	0,5	Pza.	6	3
10	Bolsa hermética	2	Pza.	6	12
11	Mortero	70	Pza.	1	70
12	Bote grande de plástico con tapa	2	Pza.	20	40
13	Bote pequeño de plástico con tapa	1,5	Pza.	20	30
Total					684

Fuente: Elaboración propia, 2023.

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. En

la tabla IV-2 se observa que no se puso el costo de la materia prima ya que esta fue adquirida gratis en Yacuiba que es la capital de la provincia Gran Chaco. Se adquirió gratis la cáscara de maní porque es un desecho o descarte.

Para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos solo se pagó el 40 % del precio unitario, ya que hubo un descuento del 60 % por parte del CEANID, debido a que el estudiante es de la UAJMS.

Tabla IV-3. Detalle de los costos de análisis fisicoquímicos

N°	Descripción		Precio Unitario (Bs)	40 % del Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Cáscara de maní	Humedad	40	16	1	16
2		Ceniza	70	28	1	28
3	Carbón activado de cáscara de maní	Ceniza	70	28	1	28
4	Agua	Cloro residual (M 7 Antes 1)	70	28	1	28
5		Cloro residual (M 7 Después 2)	70	28	1	28
Total						128

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-4. Detalle de los costos de análisis microbiológicos

N°	Descripción		Precio Unitario (Bs)	40 % del Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Cáscara de maní	Coliformes totales	100	40	1	40
2	Carbón activado de cáscara de maní	Coliformes totales	100	40	1	40
Total						80

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-5. Detalle de costos de servicios y materiales directos e indirectos

N°	Actividad	Precio Unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Investigación en internet	169	Mes	5	845
2	Impresión	0,2	Hoja	1900	380
3	Anillados	4	Anillado	12	48
4	Empastados	50	Empastado	3	150
5	Transporte diario	4	Pasaje	110	440
6	Transporte materia prima	30	Pasaje	1	30
7	Mano de obra	15	h	600	9000
Total					10893

Fuente: Elaboración propia, 2023.

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, sección 3.4.2.

Tabla IV-6. Detalle de costos energéticos

N°	Etapa	Energía consumida (kWh)	Costo de kWh (Bs)	Costo (Bs)
1	Secado de la cáscara de maní	3	0,90	2,700
2	Molienda	0,155	0,90	0,140
3	Tamizado	0,02	0,90	0,018
4	Filtración	0,113	0,90	0,102
5	Activación	6,4	0,90	5,760
6	Secado del carbón activado	22	0,90	19,800
Total				28,519

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-7. Detalle de costos totales

N°	Descripción	Costo (Bs)
1	Costos de reactivos utilizados en la parte experimental y análisis	998,4
2	Costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental	684
3	Costo de análisis fisicoquímicos	128
4	Costo de análisis microbiológicos	80
5	Costos de servicios y materiales directos e indirectos	10893
6	Detalle de costos energéticos	28,519
Total		12811,919

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El costo total de la investigación es de 12811,919 Bs.

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

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

Para determinar el costo de 1 kg de carbón activado se toma como referencia el mejor carbón activado obtenido de cáscara de maní, que es la muestra “M7”, lo cual dicha muestra fue impregnada con ácido fosfórico con una relación p/v 1:3 a una concentración de 35 % y con una temperatura de activación de 600 °C por un tiempo de 2 horas.

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

N°	Descripción	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Cáscara de maní	0	7,983 kg	0
2	Ácido fosfórico	80	2,320 l	185,600
3	Energía eléctrica	0,9	138,597 kWh	124,737
Total				310,337

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El costo de 1 kg de carbón activado usando la cáscara de maní, ácido fosfórico como agente activante y la energía eléctrica como fuente de energía para la estufa, la mufla, molino, tamizador y bomba a vacío, es de 310,337 Bs. No se tomó en cuenta la mano de obra ya que se trabajó de manera discontinua, y si fuera incluida elevaría el precio del carbón activado de manera significativa.

Comparando el precio del carbón activado obtenido de cáscara de maní es un poco más del triple del precio del carbón activado comercial, esto se debe al elevado precio del ácido fosfórico, o que también que el carbón activado comercial como es producido industrialmente, el precio disminuye, ya que se produce mayor cantidad. En la tabla IV-9 se muestran los precios del carbón activado.

Tabla IV-9. Precios del carbón activado

Cantidad	Precio del carbón activado comercial (DIEMAR)	Precio del carbón activado de cáscara de maní obtenido
1 kg	80 Bs	310,337 Bs

Fuente: Elaboración propia, 2023.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo a todo lo ejecutado en el presente proyecto de investigación de obtención de carbón activado a partir de la cáscara de maní, según objetivos planteados y con concluyendo con los resultados de los mismos, las conclusiones son las siguientes:

- Se caracterizó la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), en base húmeda y en base seca.

En base húmeda se determinó el porcentaje de humedad, dando un promedio de 8,450 % de humedad. En base seca se determinó el porcentaje de contenido de cenizas, el porcentaje de material volátil y el porcentaje de carbón fijo, dando los siguientes resultados:

Tabla V-1. Caracterización de la cáscara de maní en base seca

Cáscara de maní en base seca	
% Cenizas promedio	3,440
% Material volátil promedio	14,610
% Carbón fijo promedio	81,940

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El análisis microbiológico que se realizó a la cáscara de maní fue el de coliformes totales que dio un resultado de $1,8 \times 10^4$ UFC/g, esto fue realizado por el laboratorio de CEANID.

- Para la selección del proceso tecnológico más adecuado en la obtención de carbón activado a partir de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), se realizó una tabla en la que se evaluó con una puntuación el método de activación física y química, obteniendo mayor puntaje el método de activación química ya que se determinó que es la mejor opción, además este método no requiere de altas temperaturas. Dentro de la activación química se

analizaron los diferentes agentes activantes, donde se concluye que el mejor agente activante es el ácido fosfórico.

- Se llegó a obtener carbón activado granular a partir de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*), esto se puede ver en la figura 2-19.
- El porcentaje de rendimiento en masa promedio de la mejor muestra de carbón activado obtenido a partir de la cáscara de maní es del 12,526 %.
- Se caracterizaron los carbones activados obtenidos de la cáscara de maní, estudiando las variables respuesta como el área superficial en función del índice de yodo y el % de remoción del azul de metileno, los cuales indican la calidad del producto obtenido, el resultado de los mismos puede ser observados en las tablas III-10 y III-15, dando como resultado que la muestra M₇ es de mejor calidad de carbón activado obtenido a partir de la cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*). En la tabla V-2 se muestran las características del carbón activado obtenido de mejor calidad.

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

Muestra	M ₇
Índice de yodo promedio (mg/g)	613,2627
Área superficial promedio (m ² /g)	713,2627
Remoción de azul de metileno (%)	99,3177

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El análisis fisicoquímico y microbiológico se realizó al mejor carbón activado obtenido de cáscara de maní que es la muestra M₇, y dio un resultado de 7,0 % de cenizas y de coliformes totales < 2 NMP/g. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de CEANID.

- 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 maní con ácido fosfórico a una concentración de

35% con una relación p/v de 1:3, y con una temperatura en la etapa de activación de 600 °C por un tiempo de dos horas.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones van dirigidas a los investigadores que deseen emprender o continuar con trabajos de obtención de carbón activado a partir de cáscara de maní:

- Se recomienda que la materia prima esté libre de impurezas, y necesariamente tamizada y usar una granulometría media, ya que de no ser así el producto no será uniforme, tanto en tamaño como en calidad. Es decir, al haber trozos grandes de cáscara de maní, necesitan mayor tiempo de reposo y agitación, como también mayor tiempo de carbonización o activación, lo que implica un costo energético. En caso de utilizar una granulometría demasiado pequeña, corre el riesgo de que tenga tierra o alguna impureza, ya que la materia prima crece bajo tierra.
- Se recomienda realizar un secado de la materia prima con el fin de desalojar el agua de los poros de la materia prima, para así obtener una mejor impregnación y activación, ya que el agente activante ocupara los poros desalojados por el agua evaporada.
- Ver si es recomendable usar el exceso de agente activante que se obtuvo en la etapa de filtración, para la obtención de carbón activado y comparar el resultado con un carbón activado que no uso el exceso de agente activante.
- Se recomienda lavar con agua destilada e hidróxido de sodio 0,5 N, el carbón activado obtenido hasta que el pH sea neutro para luego secar el mismo. Esto se realiza con el fin de retirar el ácido fosfórico residual del carbón activado. En esta operación no se recomienda usar agua potable debido a la presencia de minerales que contiene, esto puede contaminar el carbón activado y disminuir su capacidad de adsorción.
- Se recomienda estudiar la adsorción en aguas residuales, compuestos aromáticos, gases, grasas, decoloración y desodorización de bebidas

alcohólicas u otros, así de esta manera encontrar la mejor aplicación del carbón activado de cáscara de maní variedad maní bayo (*Arachis hypogaea L.*).

- 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.
- Actualmente existe una gran cantidad de desechos agroindustriales de bajo costo, por lo que se recomienda realizar más estudios de investigación en cuanto a materias primas aptos para la obtención de carbón activado.