

**PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN CARBÓN ACTIVADO
MAGNETICO PARTIENDO DEL ELOTE DE MAÍZ (TUSA)**

KELY YOJANA MEDINA AGUIRRE

Proyecto Integral de Grado para optar el título de:

Ingeniero Químico

Director

Diana Madelen Galindres Jiménez

Dr. Sc. Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C

2021

Nota de aceptación:

Ing.

Ing.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Consejero Institucional

Dr. JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZALEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria general

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

A mis padres por su constante paciencia, motivación y apoyo a lo largo de mi carrera, por su dedicación e infinitos esfuerzos por dar a sus hijos lo mejor. Gracias por ser mi motor, mi fuerza, mi inspiración y mi voluntad.

Dedico esta de manera especial a mi abuela por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y enseñarme valores como responsabilidad, honestidad y perseverancia que fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto de grado. Además de ser esa persona donde siempre pude encontrar un refugio y una palabra sabia en los momentos que más lo necesité.

A mis hermanos y a mis tías por estar siempre presentes en mi vida y enseñarme mediante su ejemplo valores y cualidades que nunca olvidare y que estoy segura de que aplicaré a lo largo de mi vida profesional y personal.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle a la Dra. Diana Madelen Galindres Jiménez, por su paciencia y guía durante el desarrollo del presente proyecto de grado ya que su conocimiento y apoyo fueron fundamentales para concluir exitosamente este proyecto.

Agradezco especialmente a mis padres por su apoyo incondicional y esfuerzos a lo largo de mi formación profesional. Además, a mis hermanos y tías por enseñarme valores e inspirarme a través de su ejemplo.

Agradezco también a la Fundación Universidad de América por abrirme sus puertas y formarme profesionalmente.

Por último, a todas aquellas personas que hicieron parte de mi formación como profesional, a mis compañeros, docentes y todas aquellas personas que me brindaron su conocimiento para poder llevar a cabo este proyecto de grado exitosamente.

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1. Carbón activado	16
1.1.1. Antecedentes históricos	16
1.1.2. Características del carbón activado	17
1.1.3. Proceso de adsorción	19
1.1.4. Factores que afectan la adsorción en carbones activados	24
1.1.5. Selección de un adsorbente	26
1.1.6. Modos de operación del proceso de adsorción	28
1.1.7. Obtención de carbón activado	30
1.1.8. Caracterización de carbón activado	32
1.1.9. Aplicaciones industriales	40
1.2. Maíz	42
1.2.1. Antecedentes históricos	43
1.2.2. Generalidades del maíz	43
1.2.3. Producción de maíz en Colombia	46
1.2.4. Elote de maíz como bioadsorbente	49
2. DISEÑO METODOLOGICO	52
2.1. Materiales	52
2.2. Equipos	54
2.3. Propuesta para la síntesis de carbón activado magnético	56
2.3.1. Pretratamiento	57
2.3.2. Activación química	59
2.3.3. Carbonización	60
2.3.4. Magnetización	61
2.4. Ventajas, desventajas y aplicaciones del carbón activado magnético	63

3. ANÁLISIS DE COSTOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO MAGNÉTICO	66
3.1.Descripción del proceso	66
3.1.1. Pretratamiento	66
3.1.2. Activación química	67
3.1.3. Carbonización	67
3.1.4. Magnetización	67
3.2.Equipos	69
3.3.Análisis de costos de producción	74
3.3.1. Costo de los equipos	74
3.3.2. Costo de reactivos	75
3.3.3. Gastos adicionales	76
4. CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Uso de carbón activado a través de la historia.	16
Figura 2. Esquema proceso de adsorción y desorción	21
Figura 3. Adsorción monocapa (A) y multicapa (B)	22
Figura 4. Adsorción en vasos agitados (<i>batch</i>)	28
Figura 5. Adsorción en tanques de flujo continuo	29
Figura 6. Adsorción de lecho fijo	30
Figura 7. Diagrama general de producción de carbón activado	31
Figura 8. Principales países productores de carbón activado para el 2019	41
Figura 9. Países con el mayor consumo de carbón activado per cápita para el 2019	42
Figura 10. Demanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016	48
Figura 11. Diagrama de síntesis de carbón activado magnético a nivel laboratorio	57
Figura 12. Esquema del proceso de co-precipitación para la obtención de nanopartículas de Fe_3O_4	61
Figura 13. Diagrama de bloques para la producción de carbón activado magnético	68
Figura 14. Diagrama de flujo para la producción de carbón activado magnético	69
Figura 15. Horno deshidratador	70
Figura 16. Molino de perlas	70
Figura 17. Tamizador	71
Figura 18. Mezclador industrial para líquidos y sólidos	72
Figura 19. Horno rotatorio tubular	73
Figura 20. Precipitador electrostático	74

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características físicas del carbón activado	20
Tabla 2. Información nutricional del maíz por cada 100 gramos	44
Tabla 3. Rendimientos promedios de la producción de maíz 2016-2017	47
Tabla 4. Demanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016	48
Tabla 5. Características físicas del elote (tusa) de maíz para diferentes estudios	50
Tabla 6. Componentes elementales del elote (tusa) de maíz	51
Tabla 7. Ventajas y desventajas de un carbón activado magnético	65
Tabla 8. Cotización equipos para la producción de carbón activado magnético	75
Tabla 9. Cotización de reactivos para la producción de carbón activado magnético	76
Tabla 10. Salario y prestaciones salariales operarios planta piloto	77

LISTA DE SIGLAS

α = área superficial proyectada por una molécula de adsorbato

ε_p = porosidad de la partícula del adsorbente

μm = micrometros

ρ_b = densidad relativa del adsorbente

ρ_L = densidad del adsorbato en el liquido

ρ_p = densidad aparente del adsorbente

$^{\circ}\text{C}$ = grados centígrados

atm = atmosfera de presión

cm = centímetros

COP = pesos colombianos

d_{poro} = diámetro de poro

g = gramos

ha = hectárea

hr = hora

K = kelvin

kcal = kilocalorías

kg = kilogramos

kw = kilowatts

L = litros

M = peso molecular del adsorbente

m = metros

mm = milímetros

mol = mol

N_A = número de Avogadro

nm = nanómetro

S_{ij} = selectividad de una sustancia i con respecto a j

V_m = volumen de capa monomolecular de gas adsorbido

V_{poro} = volumen específico del poro

x = fracción molar para un compuesto

y = fracción molar de la fase fluida

wt = peso/peso

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como principal objetivo realizar una propuesta para el desarrollo de un carbón activado magnético partiendo del elote de maíz (tusa). De esta manera se realiza una revisión bibliográfica del carbón activado, donde se estudian sus características, el proceso de adsorción para la remoción de contaminantes y los factores que pueden afectarlo, los métodos de operación y obtención de carbón activado, así como sus aplicaciones industriales y como hacer la selección de un buen adsorbente. Luego de estudiar las condiciones que debe cumplir un buen adsorbente, se decide tomar como precursor el elote de maíz (tusa), por lo que se estudian las oportunidades que se tienen en Colombia utilizando este como materia prima para el desarrollo de un carbón activado magnético. Una vez se ha recopilado toda la información de la literatura, se identifican las condiciones y parámetros para la síntesis de carbón activado partiendo de la tusa de maíz para posteriormente establecer una metodología para la síntesis de carbón activado magnético y así poder identificar y caracterizar las aplicaciones de este adsorbente. Adicionalmente se decide realizar un análisis de costos para la producción del carbón activado magnético a nivel planta piloto para de esta forma identificar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Palabras claves: carbón activado magnético, bioadsorbentes, adsorción de contaminantes.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de nuevos materiales ambientalmente amigables para la remoción de contaminantes es un campo creciente de interés, donde se busca la utilización de residuos como material de partida (precursores) para generar nuevas alternativas de descontaminación. En este campo los carbones activados han generado gran curiosidad ya que son ampliamente usados en diversos procesos e industrias, su costo de producción es bajo y es un adsorbente muy versátil capaz de remover diferentes contaminantes.

El elote de maíz (tusa) ha sido anteriormente usado en la producción de carbón activado debido a su alto contenido de carbono y su disponibilidad al ser uno de los cereales más consumidos a nivel mundial y el tercer cereal más consumido en Colombia después del arroz y el trigo. El carbón activado producido partiendo del elote de maíz ha demostrado tener alto rendimiento en la remoción de contaminantes como Cr(VI)[14], Pb⁺², Cu⁺², Cd⁺² con porcentajes muy cercanos al 100% [15].

El uso de carbón activado magnético utilizando el elote de maíz como precursor para la remoción de contaminantes puede considerarse como un método emergente y alternativa verde para el tratamiento de aguas debido a su bajo costo al utilizar residuos agroindustriales como principal materia prima, simplicidad en la obtención y porque puede proporcionar una eliminación rápida y eficiente de contaminantes en el agua. Además, este carbón activado magnético se puede recuperar y reutilizar durante el proceso aplicando un campo magnético externo que permite un fácil aislamiento, lo que representa una ventaja frente a los carbones activados convencionales, ya que estos se separan comúnmente mediante filtración o centrifugación, lo que aumenta el costo del proceso general y puede no ser completamente eficiente para aislar el adsorbente de la muestra.

En este trabajo se plantea una propuesta para el desarrollo de un carbón activado magnético partiendo del elote de maíz usando ácido fosfórico para su activación y una solución de cloruro férrico – sulfato ferroso para magnetizarlo mediante el método de coprecipitación. Lo anterior sustentado mediante una extensa revisión bibliográfica. Además, se realiza un análisis de costos para identificar los recursos necesarios para la producción de este carbón activado a nivel planta piloto y de esta forma poder tener una idea de la inversión inicial en cuanto a equipos, reactivos y mano de obra, ya que otros como gastos energéticos y gastos variables se pueden incluir una vez llevada a cabo la experimentación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar una propuesta para el desarrollo de un carbón activado magnético partiendo del elote de maíz (tusa)

Objetivos específicos

- Identificar las condiciones y parámetros para la síntesis de carbón activado partiendo de la tusa de maíz.
- Establecer una metodología para la síntesis de carbón activado magnético.
- Caracterizar las aplicaciones del carbón activado magnético
- Realizar un análisis de costos para la producción del carbón activado a nivel planta piloto.

1. MARCO TEORICO

En este capítulo se explica lo correspondiente a los conceptos de carbón activado y adsorción, así como las características y propiedades que hacen al elote de maíz un excelente bioadsorbente.

1.1. Carbón activado

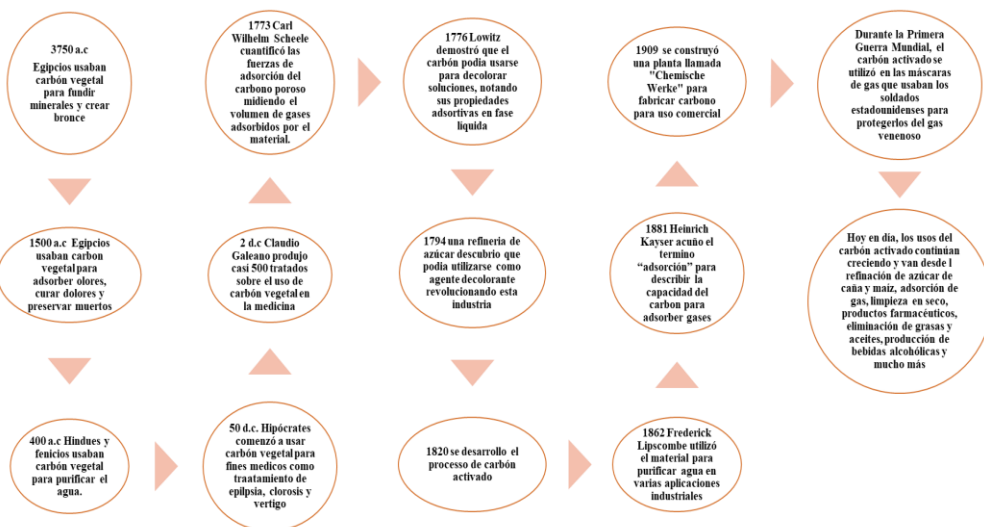
El carbón activado es un adsorbente versátil que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito que proviene de la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, etc., tiene alta porosidad y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 300 a 1200 $m^2 \cdot g^{-1}$ con un promedio de diámetro de poro de 10 a 60 nm [16] [2].

1.1.1. Antecedentes históricos

El origen del carbón activado no tiene una fecha exacta, sin embargo, existe evidencia de su uso e importancia a lo largo de la historia, desde el mundo antiguo hasta la era moderna como se muestra en la Figura 1 a continuación:

Figura 1.

Uso de carbón activado a través de la historia.



Nota. La figura representa una línea del tiempo del uso que se ha dado al carbón activado a través de la historia. Tomado de: Universidad de Sevilla and Aguapedia, "Manual del carbon activado," Universidad de Sevilla, 2015.

En la actualidad el carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual lo podemos encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos [16].

1.1.2. Características de un carbón activado

El carbón activado posee una serie de características que lo hacen un material adsorbente y se listan a continuación:

- Composición química: La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75-80% en carbono, 5–10% en cenizas, 60% en oxígeno y 0,5% en hidrógeno.[2][16]
- Escasa especificidad: el carbón activado posee escasa especificidad ante un proceso de retención, lo cual lo convierte en un adsorbente “universal”, aunque esto se puede modificar con los procesos de activación. [16]
- Naturaleza apolar: Por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, el carbón activado retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes...), mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente”.[16]
- Tamaño del adsorbente (d_p : *diámetro de partícula*): Es importante porque la tasa de consumo del adsorbente depende de esta, y además, es una de las variables que determina la caída de presión para mantener un rendimiento dado.[17]
- Densidad del adsorbente (ρ_p): hace referencia a la densidad aparente de este material que se puede definir como la relación entre la masa y el volumen del sólido incluyendo huecos y poros que contenga. [18] La densidad aparente del adsorbente es un factor determinante de la altura en un diseño de lecho fijo y está relacionada inversamente con la porosidad y directamente con la densidad real del adsorbente como se expresa a continuación:[19]

Ecuación 1.

Densidad relativa del adsorbente

$$\rho_b = \rho_p(1 - \varepsilon_p)$$

Nota. Ecuación de la densidad relativa del adsorbente. Tomado de: C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

Donde ρ_b es la densidad relativa del adsorbente, ρ_p es la densidad aparente del adsorbente y ε_p es la porosidad del adsorbente.

- Porosidad de la partícula del adsorbente (ε_p): es un indicador de la estructura interna del adsorbente. La porosidad corresponde a la fracción de los espacios vacíos de un pellet o granulo y se puede asociar con el volumen específico del poro (volumen del poro por unidad de masa adsorbida) de la siguiente forma: [2]

Ecuación 2.

Volumen específico del poro

$$V_{poro} = \frac{\varepsilon_p}{\rho_p}$$

Nota. Ecuación del volumen específico del poro. Tomado de: C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

Donde V_{poro} es el volumen específico del poro, ρ_p es la densidad de partícula del adsorbente y ε_p es la porosidad del adsorbente.

- Distribución de tamaño y tamaño del poro: el tamaño de los poros es comúnmente clasificado como microporos donde $d_{poro} < 2 \text{ nm}$, mesoporos $2 \text{ nm} < d_{poro} < 50 \text{ nm}$ y macroporos $d_{poro} > 50 \text{ nm}$. Aunque el tamaño del poro de un adsorbente puede llegar a influenciar su

capacidad y tasa de adsorción, aun no hay claridad sobre la relación exacta que estos guardan. La distribución del tamaño de poro podría ser determinada por medición de porosidad de mercurio, medición de adsorción y desorción de nitrógeno y por medio de tamizado molecular. [2]

- Área de superficie específica (s_G): debido a que la adsorción es un fenómeno de superficie, el área superficial es de gran importancia para la capacidad de adsorción de un adsorbente. El área de superficie específica se puede determinar basado en el conocimiento de el volumen de la capa monomolecular de gas adsorbido a condiciones estándar (298K, 1atm). Usando el método BET (Brunauer, Emmett and Teller), s_G se puede calcular de la siguiente forma[20]:

Ecuación 3.

Área de superficie específica

$$s_G = \frac{\alpha \times V_m \times N_A}{V}$$

Nota. Ecuación del área de superficie específica. Tomado de:
C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

Donde s_G es el área de superficie específica, V_m es el volumen de capa monomolecular de gas adsorbido a condiciones estándar de presión y temperatura, V es el volumen molar de N_2 a condiciones estándar de temperatura y presión ($22,400 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$), N_A es el número de Avogadro ($6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas} \cdot \text{mol}^{-1}$) y α es el área superficial proyectada por una molécula de adsorbato. Basado en un empaquetamiento bidimensional cercano de partículas esféricas, α se puede expresar como[17]:

Ecuación 4.

Área superficial proyectada por una molécula de adsorbato

$$\alpha = 1.091 \left(\frac{M}{N_A \times \rho_L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Nota. Ecuación de área superficial proyectada por una molécula de adsorbato. Tomado de: C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

Donde α es el área superficial proyectada por una molécula de adsorbato y esta expresada en cm^2 , M es el peso molecular del adsorbato, N_A es el número de Avogadro (6.023×10^{23} moléculas·mol⁻¹) y ρ_L es la densidad del adsorbato en estado líquido y a la temperatura predominante[17].

A continuación, se muestran en la Tabla 1 los valores de las características físicas descritas anteriormente para el carbón activado:

Tabla 1.

Características físicas del carbón activado:

	Tamaño del adsorbente	Densidad	Porosidad	Área superficial específica	Tamaño del poro
Carbón activado	- 60 + 30 Tyler Mesh	500-900 kg/m ³	0.40-0.7	200-2000m ² /g	microporos < 2 nm

Nota. La figura muestra las características físicas de carbón activado.

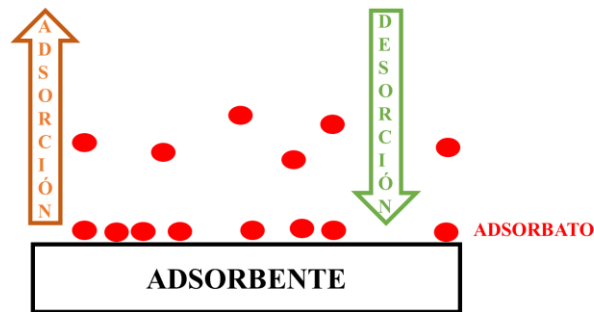
1.1.3. Proceso de adsorción

La adsorción es una operación de separación gas-sólido o líquido-sólido que se da por la concentración de uno o más componentes de un gas o un líquido en la superficie de un sólido. El sólido se denomina adsorbente (carbón activado) y las moléculas adsorbidas en la superficie del sólido con mayor concentración que en la fase fluida, se conocen como adsorbato. [21]

La adsorción es un proceso exotérmico, donde el calor es debido a la condensación del adsorbato más la energía generada en la unión adsorbente-adsorbato y se establece debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas de fluido y la superficie sólida. A su vez, la desorción es el proceso inverso de la adsorción y constituye un proceso endotérmico como se muestra en la Figura 2.[21][22]

Figura 2

Esquema proceso de adsorción y desorción

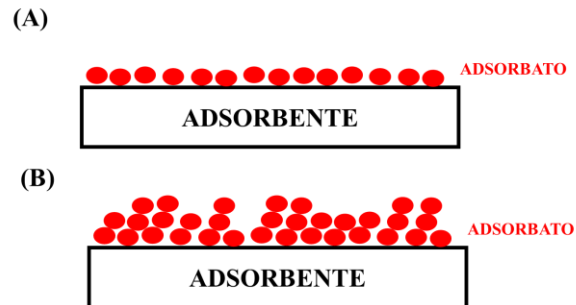


Nota. La figura representa el proceso de adsorción y desorción. Tomado de: N. Drakos, R. Moore, and IUPAC, “Monolayer and multilayer adsorption, micropore filling and capillary condensation,” vol. 8, 2002, [Online]. Available: https://old.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node17.html.

La adsorción se puede clasificar en monocapa y multicapa. En la adsorción monocapa todas las moléculas adsorbidas están en contacto con la capa de la superficie del adsorbente, mientras que en la adsorción multicapa no todas las moléculas adsorbidas están en contacto con la superficie y el espacio de adsorción acomoda más de una capa de moléculas.[23] En la Figura 3 se muestra claramente la diferencia entre adsorción monocapa y multicapa:

Figura 3.

Adsorción monocapa (A) y multicapa (B)



Nota. La figura representa la adsorción monocapa (A) y multicapa (B). Tomado de: N. Drakos, R. Moore, and IUPAC, “Monolayer and multilayer adsorption, micropore filling and capillary condensation,” vol. 8, 2002, [Online]. Available: https://old.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node17.html.

1.1.3.a. Tipos de adsorción. Dependiendo de la naturaleza de la interacción que produce la adsorción podemos definir dos tipos de adsorción: física y química.

- Adsorción física

La adsorción física, también conocida como fisisorción involucra fuerzas intermoleculares relativamente débiles como las fuerzas de dispersión, dipolares o de Van der Waals que mantienen unidas las moléculas del gas a la superficie del sólido y suelen ser interacciones que operan a largo alcance donde la energía liberada es adsorbida en forma de vibración por la red del sólido y puede estar entre los 20-40 kJ·mol⁻¹. Este proceso se produce en multicapas y no es específico ya que no existe una selectividad marcada entre adsorbato y adsorbente.

La fisisorción no proporciona una gran redistribución de las densidades de electrones en la superficie adsorbente y en términos de cinética, las tasas de adsorción son relativamente rápidas porque el proceso no está asociado a grandes barreras de energía de activación. En general los gases muy polarizables son adsorbidos más fácilmente, donde la molécula fisisorbida mantiene su

identidad ya que la energía es insuficiente para romper el enlace, aunque su geometría puede ser distorsionada. [24] [25]

- Adsorción química:

La adsorción química, también conocida como quimisorción se logra mediante el intercambio de electrones entre la superficie del adsorbente y el adsorbato formando un enlace covalente o iónico que implica un cambio en la estructura electrónica. La energía de quimisorción entre las moléculas de gas y los adsorbentes puede variar significativamente dependiendo de la fuerza de unión entre el adsorbente y las especies adsorbidas donde sus entalpías se encuentran entre 100-500 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. [24] [26]

Debido a que la quimisorción implica la formación de un enlace entre adsorbato y el adsorbente, el proceso se detiene tras la formación de una monocapa sobre la superficie y por la fuerza de sus enlaces es difícilmente reversible. En términos de cinética, las tasas de adsorción generalmente involucran barreras de energía de activación y si estas llegan a ser lo suficientemente altas se puede llegar a un estado de equilibrio práctico. A diferencia de la fisorción es específica y únicamente se da entre ciertas especies de adsorbatos y adsorbentes dado que implica la formación de un enlace entre adsorbato y el adsorbente, el proceso se detiene tras la formación de una monocapa sobre la superficie. [25]

1.1.3.b. Mecanismo del proceso de adsorción. El proceso de adsorción se ocupa del transporte de adsorbatos desde la fase de la solución al interior de la superficie de los adsorbentes. Este proceso consta de dos partes: desde el centro de la solución a la superficie externa del adsorbente (transferencia de masa externa) y luego la difusión intraparticular hacia el interior del adsorbente (transferencia de masa interna). [27] Estos dos momentos principales que tiene la adsorción, se explican a continuación:

- Transferencia de masa externa: El transporte de un adsorbato desde la solución a la superficie externa del adsorbente constituye un paso importante en el proceso de captación y este puede depender de varios factores, por ejemplo, la naturaleza y forma del adsorbente (esférica, diamante...), concentración y estado de la solución (líquido o gas).[27]
- Transferencia de masa intraparticular: La estructura de los pellets de un adsorbente son normalmente microporosos y la adsorción tiene lugar exclusivamente en las superficies vacías

internas de los pellets. En consecuencia, la captación de adsorbatos requiere su transporte al interior de granulos adsorbentes y el espacio poroso de estos se llena con la solución que se va a tratar. La fase fluida puede difundirse de dos formas, a través del solido poroso debido al gradiente de concentración del fluido a lo largo de la dirección radial (difusión del poro) o de manera similar puede haber un gradiente de concentración de adsorbato en la fase adsorbida, lo que conduce a la difusión de las moléculas de adsorbato (difusión superficial). Ambos tipos de difusión pueden ser operados simultánea y/o individualmente. [27]

1.1.4. Factores que afectan la adsorción en un carbón activado

Los factores que influyen en la adsorción en fase líquida son muy diversos. A continuación, se enumeran los más significativos:

- Superficie específica: es uno de los factores que más afectan la adsorción debido a que es un fenómeno de superficie, donde a mayor superficie específica del adsorbente, mayor será la retención del adsorbato que se traduce en una mayor capacidad de adsorción. Se puede definir como el área de la superficie por unidad de masa en $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ y constituye la suma del área de la superficie de todas las partículas que forman un gramo de materia y está en función del tamaño de los granos, entre más fino sea el grano, mayor será la superficie de adsorción [28][29].
- Naturaleza del adsorbente: la adsorción del gas depende de la naturaleza del adsorbente, ya que un gas o líquido puede ser adsorbido sobre diferentes superficies adsorbentes en diferentes cantidades y la naturaleza química de la superficie del adsorbente influirá en los enlaces que se formen entre éste y el adsorbato. Por ejemplo, el hidrogeno se adsorbe mejor sobre superficies de níquel bajo ciertas condiciones, en comparación con una superficie de alúmina. [28] [30].
- Naturaleza del adsorbato: algunos factores como la solubilidad del adsorbato, su estructura química, o su naturaleza iónica son parámetros para tener en cuenta en el proceso de adsorción. Así, cuanto mayor sea la solubilidad de este, menor será el grado de adsorción (regla de Lundelius). La presencia de grupos funcionales es también de gran importancia ya que pueden interaccionar con otros grupos polares del adsorbente dando lugar a una adsorción específica. Por otro lado, la carga superficial asociada a algunos adsorbentes (i.e., carbones activados, zeolitas) puede asimismo determinar la capacidad de retención en función del grado de ionización del adsorbato[28].

En el caso de los gases los más licuables son adsorbidos más fácilmente, este es el caso de gases como el NH_3 , HCl , Cl_2 y CO_2 , los cuales se adsorben más fácilmente en la superficie de los sólidos que los gases permanentes como el O_2 y H_2 [30]

- pH: la importancia del pH está relacionada a la adsorción de los iones hidronio e hidroxilo, dado que esta afecta el grado de disociación del adsorbato que es de gran importancia cuando los contaminantes que se desean adsorber son fenoles. Por otra parte, el pH es uno de los factores que controla el proceso de adsorción de electrolitos orgánicos débiles y polielectrolitos en materiales carbonosos ya que controla las interacciones electrostáticas entre el adsorbente y el adsorbato. No obstante, este factor no afecta por igual a todos los sistemas adsorbato-adsorbente, por lo que debe determinarse experimentalmente. [28] [31]
- Temperatura: al ser la adsorción un fenómeno exotérmico y según el principio de Le Chatelier a una presión dada las bajas temperaturas favorecen la adsorción y un aumento en la temperatura daría lugar a una disminución en la capacidad de adsorción. Por tanto, la adsorción es inversamente proporcional a la temperatura en el caso de la adsorción física y para la adsorción química debido a la alta energía de activación, el grado de adsorción aumenta inicialmente y disminuye a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, la entalpía de adsorción suele ser muy baja, por lo que las variaciones con la temperatura no son muy significativas. [28] [32]
- Competencia entre adsorbatos: en la práctica se suele trabajar con fases líquidas multicomponentes, donde la competencia entre los distintos adsorbatos adquiere gran importancia. Esta competencia no solo puede afectar a la capacidad de adsorción, sino también a la velocidad del proceso global de adsorción. Generalmente, el compuesto con mayor capacidad de retención cuando es el único adsorbato es también el que se adsorbe con preferencia en una mezcla binaria equimolecular de dos adsorbatos. Cuando la naturaleza de los adsorbatos es similar, los efectos competitivos suelen ser mucho menores, comportándose la mezcla como un sistema de un solo componente.[28]
- Naturaleza del disolvente: es otro factor a tener en cuenta donde se distinguen dos aspectos, el primero tiene que ver con la naturaleza química del disolvente que influye en las interacciones con el adsorbente y con el soluto, tanto en la disolución como en la fase adsorbida, haciendo que el grado de adsorción del adsorbato varíe dependiendo del disolvente en el que se encuentre disuelto. El segundo aspecto a tener en cuenta es la tensión superficial del disolvente donde los

adsorbatos que disminuyen la tensión superficial tienden a acumularse en la interfase haciendo que se favorezca la adsorción y por otro lado influye en el ángulo de contacto entre el sólido y el líquido, por lo tanto, determinará la superficie eficaz para la adsorción. [28] [31]

1.1.5. Selección de un adsorbente

El carbón activado es conocido por su aplicación en la remoción y purificación de líquidos y gases. Actualmente se busca la utilización del carbón activado en unidades de operación muy específicas y es por esto por lo que es de gran importancia la selección de un buen carbón activado considerando los siguientes aspectos:

- Capacidad de adsorción: es la característica más importante de un adsorbente que indica la cantidad de sólido necesario por unidad de masa en la fase fluida y depende de factores como la concentración del fluido, la temperatura y otros inherentes al sólido que normalmente se expresan en isothermas que relacionan la concentración con la cantidad de adsorbente requerido para tal fin. Adicionalmente existen otras formas de medir la capacidad del adsorbente como las isobaras, superficie específica por distribución y tamaño de poro, etc. La capacidad de un adsorbente puede variar entre 5 y 3000 m² · g⁻¹. [33]
- Selectividad: la selectividad se puede definir como el cociente entre la capacidad de adsorción de un componente con respecto a otro en una mezcla dada. En otras palabras, la selectividad relativa de un compuesto i respecto de otro j (S_{ij}) se define como el cociente de sus relaciones molares en las fases adsorbida y fluida como se muestra en la Ecuación 5. [25] [34] Para el proceso de adsorción, el adsorbente debe mostrar alta selectividad hacia los componentes a separar, por lo que habrá grandes diferencias en las velocidades de migración. [35]

Ecuación 5.

Selectividad de un adsorbente

$$S_{ij} = \frac{x_i/x_j}{y_i/y_j}$$

Nota. Selectividad de un adsorbente. Tomado de: F. Fernandez Pino and Universidad de Sevilla, “Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción,” pp. 53–105, 2011, [Online]. Available:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/indice.pdf>.

Donde x es la fracción molar para el compuesto i y j en la fase adsorbida y y es la fracción molar en la fase fluida.

- **Regenerabilidad:** es la capacidad de mantener sus propiedades texturales y adsorbentes después de un número finito de ciclos de utilización. La regeneración de un adsorbente se puede llevar a cabo mediante la elución de un disolvente que tenga mayor afinidad que el adsorbente por el adsorbato; este proceso se conoce como regeneración química. También puede hacerse por calefacción mediante un gas inerte o haciendo vacío. Es frecuente el uso de ciclos de presión y temperatura integrando en un sistema continuo las etapas de adsorción y desorción». [36] “Todos los ciclos de adsorción requieren para su aplicación de la regeneración del adsorbente y además deben tener un comportamiento uniforme en los ciclos, aquí interviene la física con los materiales orgánicos, inorgánicos y las consideraciones de diseño. [33]
- **Cinética:** la cinética de transferencia de materia se relaciona directamente con la resistencia al transporte en las zonas interparticulares. Resulta muy relevante, pues controlar el tiempo de un ciclo en los procesos de adsorción en lecho fijo. En general, la velocidad del proceso de adsorción queda determinada por la difusión interna. Para solventar problemas difusionales se puede hacer uso de un tamaño de partícula inferior, pero este tipo de soluciones suele conllevar un aumento de la pérdida de carga del sistema, lo que en última instancia afecta notablemente al coste de operación. A veces, suele ser más efectivo aumentar la cantidad de adsorbente y mantener el tamaño de partícula. [36] “El adsorbente no debe reaccionar irreversiblemente con los componentes a separar o con el disolvente. Tampoco debe actuar como un catalizador para su descomposición, dimerización, rearrreglo, o isomerización”. [35]
- **Propiedades mecánicas:** respecto de las propiedades mecánicas, un buen material adsorbente debe presentar una adecuada resistencia mecánica, si se va a utilizar en un lecho fijo, y una buena resistencia a la abrasión, en el caso de adsorbentes para lechos móviles, fluidizados o tanques agitados. [37]
- **Costo:** es de suma importancia explorar formas o métodos económicos para la remoción de contaminantes, por esto se ha buscado dentro de la metodología más económica como es la adsorción, otros tipos de adsorbentes que permitan una implementación real. Para esto es importante establecer ciertas características que debe presentar un adsorbente de bajo costo

como: estar altamente disponibles, no causar daño al medio ambiente, tener una disponibilidad local en caso de que tenga origen natural y que se obtenga a un bajo costo.[38]

1.1.6. Modos de operación del proceso de adsorción

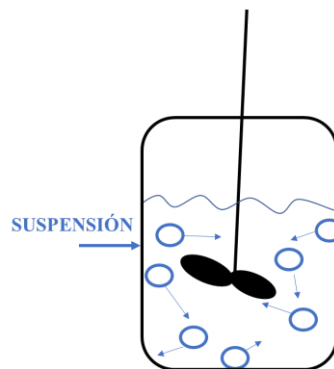
La separación por adsorción se realiza poniendo en contacto las soluciones a tratar con adsorbentes seleccionados. Existen diferentes formas de lograr el contacto fluido-sólido, estas formas se explican brevemente a continuación:

- Adsorción en vasos agitados:

La adsorción *batch* en vasos agitados como se muestra en la Figura 4 representa la manera más simple de poner en contacto el fluido con el adsorbente. Una cantidad fija de adsorbente se agrega a un volumen de solución con una concentración de un soluto conocida en un vaso cerrado. La agitación se hace mediante la rotación de agitadores para asegurar que las partículas están completamente suspendidas y la concentración del adsorbente es uniforme. Este método no es adecuado para tratar grandes volúmenes de soluciones. Normalmente sería utilizado en la caracterización y pruebas de nuevos adsorbentes para diferentes aplicaciones. [17]

Figura 4.

Adsorción en vasos agitados (batch)



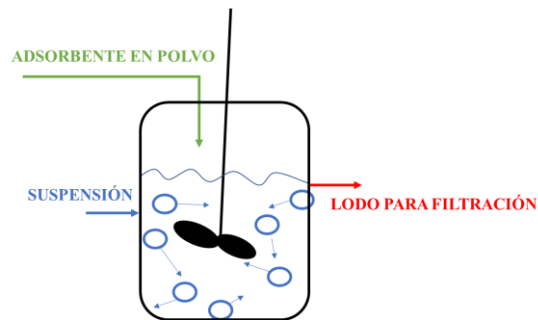
Nota. La figura representa la adsorción en vasos agitados (*batch*). Tomado de: C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

- Adsorción en tanques de flujo continuo

En la adsorción en tanques de flujo continuo una corriente de líquido y una corriente de partículas de adsorbente fluyen a una tasa constante, donde la corriente líquida contiene especies adsorbibles que pueden ser removidas por las partículas de adsorbente. La adsorción en tanques de flujo continuo se utiliza en procesos para prevenir la excesiva acumulación de una especie en particular. Por ejemplo, en el tratamiento de aguas residuales donde el adsorbente es agregado directamente en un paso particular del tratamiento que puede ser biológico o fisicoquímico para remover un contaminante específico como se muestra en la Figura 5. [17][39]

Figura 5.

Adsorción en tanques de flujo continuo



Nota. La figura representa la adsorción en tanques de flujo continuo. Tomado de: C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85

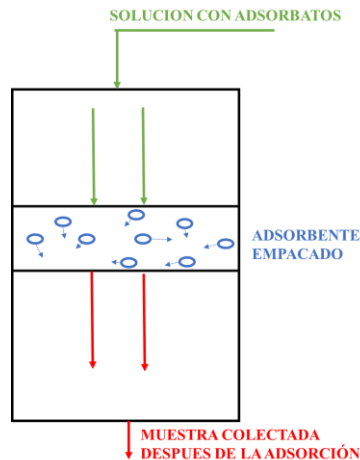
- Adsorción de lecho fijo

La adsorción de lecho fijo consiste en el paso de una solución a través de una columna empacada con adsorbentes como se muestra en la Figura 6 y es comúnmente aplicada para eliminar trazas de contaminantes en una solución líquida o vapores tóxicos y volátiles de una corriente gaseosa. La adsorción de lecho fijo es un proceso *batch* por naturaleza donde los adsorbentes después de cierto uso llegan a estar saturados a un punto en donde la activación (desorción) llega a ser necesaria y

la operación cesa. Sin embargo, una operación continua puede ser implementada mediante la implementación de columnas y arreglos en la secuencia.[17]

Figura 6.

Adsorción de lecho fijo



Nota. La figura representa la adsorción de lecho fijo.

Tomado de: C. Tien and Syracuse University,
“INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and
Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019,
pp. 23–85

- Adsorción de lecho móvil

La adsorción de lecho móvil es llevada a cabo con el adsorbente (sólido) y la fase fluida en movimiento. Los movimientos de ambas fases pueden ser paralelos, contra corriente, o perpendicular (cross-flow), aunque el contra corriente es el más utilizado en práctica. Este es un proceso de estado estable y tiene como ventaja la utilización más favorable de las fuerzas de conducción disponibles de transferencia de masa. Sin embargo, es difícil mantener un estado estable cuando se manejan grandes cantidades.[17][40]

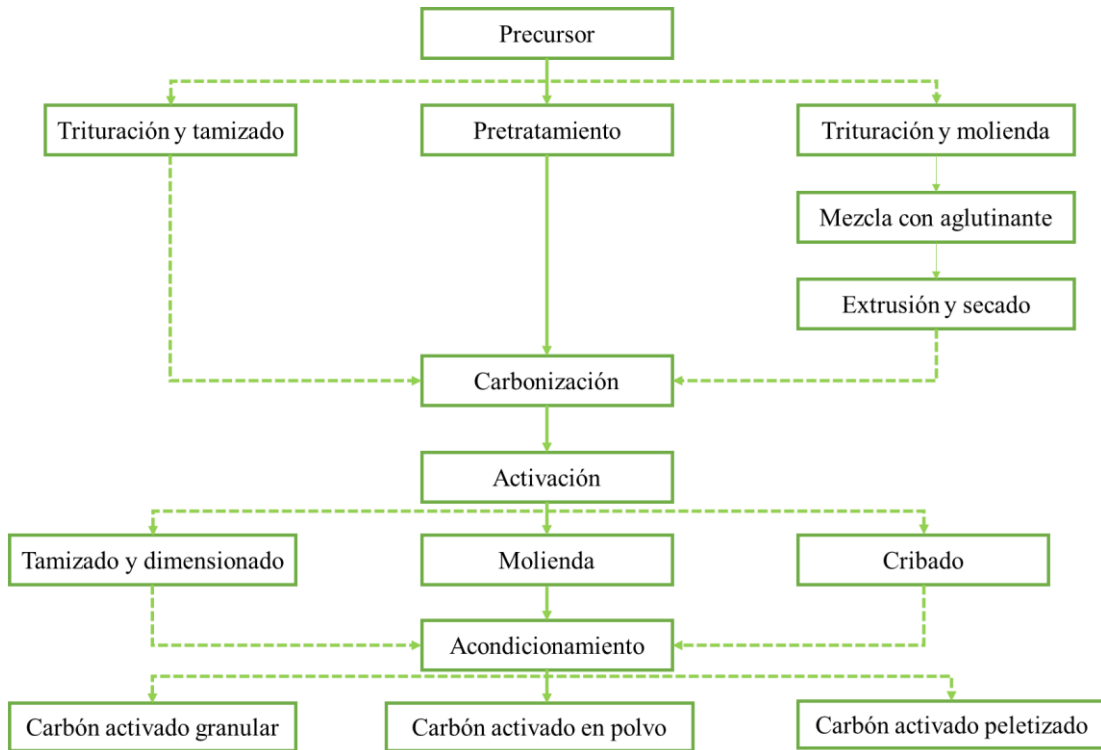
1.1.7. Obtención de carbón activado

El carbón activado se produce a partir de casi todos los materiales orgánicos que contienen carbón, principalmente madera, cáscaras de nueces, huesos de frutas, lignito, coque de petróleo,

entre otros.[13] La obtención del carbón activado se puede realizar de diferentes formas dependiendo de la materia prima que se esté utilizando, a continuación se muestra en la Figura 7 un diagrama general de producción de carbón activado, explicando cada etapa posteriormente.

Figura 7.

Diagrama general de producción de carbón activado



Nota. La figura muestra un diagrama general para la preparación de carbón activado.

1.1.7.a. Precursor. El precursor es la materia prima principal que se utiliza para obtener el carbón activado y que normalmente debe contar con un alto contenido de carbono fijo y de materia volátil, alta densidad de empaquetamiento y bajo contenido de cenizas. El uso de un precursor adecuado está condicionado principalmente por su disponibilidad y costo, aunque también depende de las principales aplicaciones del carbón activado que va a ser fabricado y del tipo de tratamiento dado.[13] [41]

La mayoría de los materiales orgánicos ricos en carbono que no se funden cuando se carbonizan producen un carbón poroso muchas veces conocido como *charcoal*. Para la selección de un precursor se deben tener en cuenta los siguientes criterios[13]:

- Baja cantidad de materia orgánica: el precursor debe tener baja cantidad de materia orgánica, para de esta forma obtener un carbón con bajo contenido de cenizas.
- Disponibilidad y costo: es importante ya que da viabilidad y factibilidad a la producción.
- Baja degradación durante el almacenamiento: garantiza que la materia prima sea aprovechada en su gran mayoría
- Facilidad de activación: muestra ventajas en la adsorción y cinética de las reacciones.

Los materiales lignocelulósicos constituyen los precursores más comúnmente usados y son el 45 wt% del total de materiales crudos usados en la manufactura de carbón activado, contando con un rendimiento que va del 20-30 wt%, que después de la activación puede llegar alrededor de un 10 wt%. Dentro de los más usados se encuentra la madera de pino y cáscara de coco por su relativamente alta densidad, dureza y contenido volátil que los hace ideal para la manufactura de carbón activado.[13] Además, las propiedades finales del adsorbente están determinadas por el material precursor en gran medida, debido a que este proporciona características estructurales del material con el objetivo de optimizar su capacidad adsorbente.[42]

1.1.7.b. Pretratamiento. En el pretratamiento para la producción de carbón activado se pueden tomar dos caminos con el fin de llegar a condiciones óptimas estándar como áreas superficiales de 300 a 1200 m²·g⁻¹ con un promedio de diámetro de poro de 10 a 60 nm como se había mencionado anteriormente. En el camino 1 se realiza una trituración, molienda y tamizado; mientras que en el camino 2 se realiza una trituración y molienda, seguida de una mezcla con aglutinante, extrusión y secado. A continuación, se describe cada una de las operaciones realizadas que se llevan a cabo.

- Trituración: este proceso tiene como objetivo la reducción burda de grandes cantidades de sólidos en máquinas trituradoras a baja velocidad. Los principales tipos son trituradores de mandíbulas, trituradores giratorios, de rodillos lisos y rodillos dentados. Los primeros tres trabajan por compresión y pueden quebrar piezas grandes de materiales muy duros[43].
- Molienda: es el último proceso de reducción de tamaño de partícula que se hace hasta tener una granulometría final deseada, mediante los diferentes aparatos que trabajan por choques, aplastamiento o deterioro. La operación de molienda se realiza utilizando grandes equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica. El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto, y por esta razón a menudo se dice que una

molienda correcta es clave de una buena recuperación de la especie útil. Es importante recalcar que una buena molienda es vital para el desarrollo de la etapa de desplazamiento[43].

- Tamizado: es una operación unitaria o método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de estas, específicamente consiste en la separación de una mezcla de partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones, cada una de las cuales estará formado por partículas de tamaño más uniforme que la mezcla original. En principio se puede considerar como tamiz toda superficie agujereada, siendo necesario para que se efectúe dicha operación un movimiento relativo, para con ello dar oportunidad a las partículas del sólido a que coincidan con las aberturas del tamiz y que pasen a través de estas las de menor tamaño[43].
- Mezcla con aglutinante: la mezcla con aglutinante se hace cuando se desea un carbón granular o pellet si la materia prima no es suficientemente dura, entonces se puede reaglomerar con un agente ligante/aglutinante que imparte dureza para evitar que se rompa al paso del fluido.[44]

El ligante seleccionado depende de las propiedades de este con relación a las propiedades del carbón que va a ser briquetado, el uso final de las briquetas y el valor de muchos ligantes con frecuencia restringe su uso al ser una fracción importante del costo del procesamiento. Por lo tanto, se requieren hacer pruebas para la selección del tipo de ligante y determinar la concentración mínima para obtener las propiedades de la briqueta deseado[45].

«Los ligantes comunes usados en la briquetación de carbones finos incluyen las películas inactivas, por ejemplo, agua, aceites, lignosulfatos, varios almidones, y goma; películas químicas, por ejemplo, sodio, silicato y caliza; matrices químicas, por ejemplo, molasas y caliza, alcohol polivinil y almidón; matriz inactiva, por ejemplo, brea (de alquitrán de carbón y petróleo), bitumen, arcillas, viscosa (xantato de celulosa de sodio). En las últimas dos décadas, muchos ligantes nuevos se han desarrollado para usar con el carbón y materiales asociados. Esos ligantes se han basado en polímeros, y residuos de desechos orgánicos tales como resina, suero de la leche (película inactiva). Papel, solo y con almidón, se ha empleado en algunas ocasiones como un ligante barato y efectivo para aglomerar carbón y coque de petróleo»[45].

Los factores que son importantes para la selección de ligantes para producir briquetas de carbón de buena calidad incluyen: alta resistencia del ligante a baja concentración, desarrollo de una buena resistencia verde, durabilidad impartida (por ejemplo, a prueba de agua), características

ambientales favorables (tanto durante la preparación como en el uso posterior), conveniencia de manejo, compatibilidad con la aplicación deseada, y la relación costo beneficio. Al seleccionar un ligante es importante que no se tenga en cuenta solamente la combinación ligante-alimentación, sino también el uso final deseado. El costo del ligante será luego visto en relación con el valor agregado que el producto aglomerado puede obtener en el lugar de mercado[45].

- **Secado y extrusión:** el secado en el pretratamiento se hace para tener un contenido de agua del carbón crudo generalmente de 50 a 55%. Para la briquetación sin ligantes de lignito, el contenido óptimo de agua es alrededor del 17 al 18%. Esto significa que por cada tonelada de briquetas aproximadamente 0,8 toneladas de agua se deben remover. Así el secado es la etapa que consume la mayor energía y es la más costosa en el proceso de briquetación [45].

Después de enfriarse y molerse de nuevo, el carbón seco se moldea en briquetas a alta presión. Hoy se usan solamente para este propósito presas de extrusión. La principal característica de las presas de extrusión es el canal de molde de abertura horizontal y el estampado de moldeo interior, el cual se maneja alternativamente hacia atrás y hacia adelante. El carbón que va a hacer presionado entra el molde a través de un eje de alimentación y se comprime. Solamente cuando la presión necesaria se ha obtenido y la briqueta se ha presionado, la briqueta previa se mueve fuera de la prensa. La resistencia necesaria se proporciona principalmente por la fricción de las briquetas en el molde. Hay un estrechamiento en el molde con el fin de proporcionar suficiente resistencia en el molde [45].

1.1.7.c. Carbonización. En la carbonización el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800°C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad “incipiente” en el carbonizado, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación[46].

En esta etapa se logra la deshidratación y la desvolatilización de forma controlada, obteniéndose un carbonizado con elevado por ciento en carbono fijo y una estructura porosa inicial. Durante la carbonización los elementos no carbonosos, como el hidrógeno y oxígeno, presentes en la materia prima, son eliminados en parte por la pirólisis del material y los átomos de carbono se organizan en estructuras microcristalinas conocidas como "cristalitas gráficas elementales". Entre estos microcristales hay espacios libres, debido a que su ordenamiento es irregular. Estos espacios o

intersticios son bloqueados por carbono amorfo, alquitranes y otros residuos de la descomposición pirolítica del material celulósico. Como resultado de ello, los carbones producto de la carbonización sólo presentan una pequeña capacidad de adsorción aumentándose esta capacidad a través del proceso de activación»[16].

1.1.7.d. Activación. El carbón activado puede fabricarse a partir de todo tipo de material carbonoso, o bien, a partir de cualquier carbón mineral no grafitico. Sin embargo, cada materia prima brindará características y calidades distintas al producto. El proceso de activación consiste en el desarrollo de la estructura porosa, mediante la adición de agentes oxidantes. La activación puede llevarse a cabo tanto por métodos denominados físicos (activación térmica) y químicos (deshidratación química), explicados a continuación: [16].

- Activación física

El método de activación física tiene lugar en dos etapas: carbonización y activación del carbonizado mediante la acción de gases oxidantes como vapor de agua, dióxido de carbono, aire o mezcla de los mismos, siendo el oxígeno activo del agente activante el responsable de quemar las partes más reactivas del esqueleto carbonoso y el alquitrán retenido dentro de la estructura porosa; y la extensión del quemado depende de la naturaleza del gas empleado y de la temperatura de activación. Es característico en este método un bajo rendimiento en la etapa de activación (30%) [46].

El rango de las temperaturas de carbonización esta entre 400°C – 850°C llegando algunas veces a alcanzar los 1000°C algunas veces y la temperatura de activación se encuentra entre los 600°C-900°C con una duración de 1 a 3 horas, donde a mayor duración del proceso de activación se dará un mejor resultado en la capacidad de adsorción del adsorbente. El gas que por lo general se utiliza en la activación es el CO₂, debido a que es limpio, fácil de manejar y facilita el control de los procesos de activación ya que no reacciona rápidamente a temperaturas alrededor de los 800°C. [11]

- Activación química

El método de activación química se caracteriza porque la carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa, llevada a cabo por la descomposición térmica de la materia prima impregnada con agentes químicos, tales como ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de

potasio o tiocianato potásico. La activación química se realiza casi exclusivamente para carbones producidos de materia prima vegetal de origen reciente. Se obtienen rendimientos de hasta un 50%, y la economía del proceso depende, principalmente de la recuperación del agente activante utilizado[46]

La activación química ha sido usada con precursores como elote de maíz, olivas o aceitunas, cascarilla de arroz y cascaras para diferentes frutos secos como la macadamia, maní, entre otros, donde los agentes activantes más usados fueron $ZnCl_2$, KOH , H_3PO_4 y K_2CO_3 . [11] A diferencia de la activación física, en la activación química se tienen temperaturas más bajas, un mayor rendimiento y selectividad del carbón activado, una mayor área superficial, mayor microporosidad y por lo tanto una mayor eficiencia. Sin embargo, la activación química puede dañar los equipos debido a la corrosión causada por los agentes químicos a altas temperaturas.[47]

1.1.7.e. Acondicionamiento. Las propiedades superficiales que se obtienen como resultado dependen del material inicialmente empleado y del proceso exacto de elaboración, de modo que las variaciones posibles son muchas. El tipo de material base con el que se produce el carbón activado también puede afectar al tamaño de los poros y a las características de regeneración del carbón activado. Tras el proceso de activación, el carbón se puede separar o dividir en diferentes tamaños con diferentes capacidades de adsorción. Los dos tipos de clasificación son: carbón activado en polvo y granular[46].

La diferencia básica entre el carbón activado granular y el carbón activado en polvo está en el costo de fabricación y el tamaño de partícula. Se consideran carbones activados granulares cuando se encuentran entre un tamaño de malla de 4 y 40 Mesh, y se trituran o pulverizan físicamente para reducirlos a polvos que normalmente pasan a través de una malla de 325 Mesh [48].

1.1.8. Caracterización de carbón activado

La aplicación de carbón activado en muchos procesos industriales requiere un conocimiento preciso de las propiedades físicas y de adsorción. La mayoría de los métodos de prueba han sido desarrollados y aprobados por la American Society for Testing Materials (ASTM), la American Water Works Association (AWWA, 1990), the International Organization for Standardization (ISO, 1999) o el Deutsches Institut für Normung (DIN, 1986). En muchas empresas de fabricación, las pruebas se modifican ligeramente, pero solo en partes no esenciales.[13]

Desde el punto de vista del productor y del usuario, es necesario conocer muchas propiedades del carbón activado. Las pruebas físicas relevantes se resumen a continuación:

1.1.8.a. Densidad bulk, densidad real y densidad aparente.

- Densidad bulk: se define como la masa de una unidad de volumen de la muestra en el aire, incluyendo tanto el sistema de poros como los vacíos entre las partículas. Es muy útil para estimar el volumen de empaque o para determinar el grado de carbono necesario para un sistema existente. Los carbones en polvo usados para la decoloración generalmente tienen una densidad aparente en el rango de $0.25-0.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, mientras que los grados granulares usados en la adsorción de gas tienen una densidad aparente de alrededor de $0.40-0.50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [13].
- Densidad real: también se denomina densidad absoluta o de helio y se define como la masa de una unidad de volumen del esqueleto de carbono sólido, inaccesible al helio. En este método se asume que el helio entra en los poros más pequeños presentes, sin ser adsorbido. Sin embargo, está bien documentado que el helio puede ser adsorbido en carbonos microporosos y, en consecuencia, esta posibilidad debe verificarse y tomarse en consideración para obtener un valor realista. Esta no es una prueba de rutina; el principal problema es que los equipos disponibles comercialmente muestran una escasa reproducibilidad [13].
- Densidad aparente: también conocida como densidad de partículas o mercurio, se define como la masa de volumen unitario de la partícula de carbono, incluido su sistema de poros. A partir de este valor es posible obtener la porosidad del lecho. Esta porosidad del lecho, o volumen vacío, es un valor importante con respecto a las características de flujo del lecho de carbón activado. El método utiliza un picnómetro. Si se conocen tanto la densidad aparente como la real, la diferencia de sus inversas proporcionará el volumen total de poros del carbón activado[13].

1.1.8.b. Tamaño de partícula. Es una propiedad importante porque influye en las características de flujo, cinética de adsorción, etc. La tasa de adsorción del carbón activado depende inversamente del tamaño de partícula: las partículas pequeñas tienen la tasa de adsorción más rápida. La separación entre carbón activado en polvo y granular se establece según la definición de AST D2652-74 como malla 80 o aproximadamente $0,18 \text{ mm}$ [13].

1.1.8.c. Fuerza mecánica. La fuerza mecánica es un factor importante para la mayoría de las aplicaciones técnicas del carbón activado granular y está determinado a simular la resistencia a la abrasión o al desgaste en condiciones prácticas. El carbón activado necesita una alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste donde la caída de presión y las pérdidas de carbón pueden ser significativas[13].

1.1.8.d. Contenido de humedad. Esta prueba proporciona el contenido total de agua en la muestra y se determina de forma convencional pesando antes y después de calentar a 100 ° C [13].

1.1.8.e. Contenido de cenizas. Esta prueba proporciona el contenido total de cenizas, aunque en algunos casos se necesita un análisis más detallado de las cenizas. El contenido de cenizas aumenta en proporción directa al grado de activación y se puede utilizar para determinar la materia prima utilizada para producir un carbón activado. Por ejemplo, los carbonos de cáscara de coco contienen 1-3% en peso de cenizas, mientras que los carbonos a base de carbón tienen un contenido de cenizas del 6-20% en peso. [13]

1.1.8.f. Temperatura de ignición. La temperatura de ignición puede ser fundamental en la recuperación de disolventes u otras aplicaciones en las que interviene aire caliente; debe ser lo suficientemente alto para evitar una oxidación excesiva del carbono en la adsorción en fase gaseosa, donde se trata de una alta evolución de calor. Depende en gran medida del procedimiento de activación utilizado y, por lo tanto, generalmente se encuentran altas temperaturas de ignición[13].

1.1.8.g. pH. El pH es importante ya que en la superficie del carbón activado se presenta un intercambio iónico, lo que genera cargas positivas o negativas en la superficie del carbón. Así pues, las condiciones en las que un carbón activado tiene una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes, y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones [13].

1.1.8.h. Contenido soluble en agua. El contenido soluble en agua da una estimación de la pureza del carbón activado en relación con las sustancias extraíbles en agua e indica el nivel de actividad de la adsorción que depende de la concentración de la sustancia que se desea remover en el agua. Por lo general una sustancia polar, es decir soluble en agua, no es normalmente eliminada por el carbón activado [46] [13].

1.1.8.i. Regeneración del carbón activado. El principal mecanismo por el cual el carbón activado elimina las impurezas es el de adsorción física, siendo este un proceso reversible. En consecuencia, se puede esperar que la desorción de las impurezas haga que la superficie del carbono vuelva a estar disponible para la adsorción. La regeneración del carbón activado usado no solo es importante desde el punto de vista de restaurar la capacidad de adsorción del carbón, sino también porque en muchos casos es importante la recuperación de las especies adsorbidas. Si la adsorción es de tipo químico (quimisorción), la formación de un enlace entre el carbono y el adsorbato hace que el proceso no sea reversible, e incluso si la desorción es posible, las especies desorbidas serán diferentes a las adsorbidas originalmente. Además, la adsorción (especialmente en fase líquida) suele ir acompañada de la precipitación de especies que no pueden eliminarse por simple desorción[13].

La regeneración del carbón activado se basa en el principio de que el carbón es un material estable que puede soportar cambios de temperatura y es resistente a medios ácidos y básicos. La regeneración de carbón activado normalmente se lleva a cabo solo sobre carbón activado granular porque no es económico para el carbón activado en polvo, generalmente se desecha después de su uso. El proceso de regeneración más común es hacer pasar un flujo de vapor sobrecalentado a través del lecho de carbón a una temperatura más baja que la utilizada durante la activación. A medida que aumenta la temperatura durante la regeneración, se produce una desorción de los compuestos adsorbidos más volátiles; por encima de los 400°C también se produce la descomposición de la materia orgánica adsorbida, dejando así un poco de carbono menos organizado, que se elimina por reacción con vapor a alrededor de 600°C. Por supuesto, aunque el carbón menos organizado es más reactivo, una parte del carbón activado también se gasifica y la regeneración generalmente significa una pérdida del 8-15% en peso del carbón activado original. Por este motivo, cuando la regeneración se realiza en estas condiciones también se denomina reactivación. Es importante señalar que los gases de escape deben ser manipulados adecuadamente, pasándolos por un post-quemador y un depurador, donde se lavan adecuadamente[13].

Los procedimientos de regeneración adicionales incluyen la desorción mediante gases inertes calientes, la desorción al vacío y, lo que es más importante, el uso de disolventes líquidos convencionales. El principal problema de estos últimos es la lenta desorción y la difícil

regeneración del solvente, y en los últimos años se ha visto el desarrollo de la regeneración con solventes supercríticos, principalmente dióxido de carbono y agua. Los informes sobre el uso de agua supercrítica parecen indicar que este es un enfoque interesante para la regeneración de carbón activado utilizado en tratamientos de agua[13].

1.1.9. Aplicaciones industriales

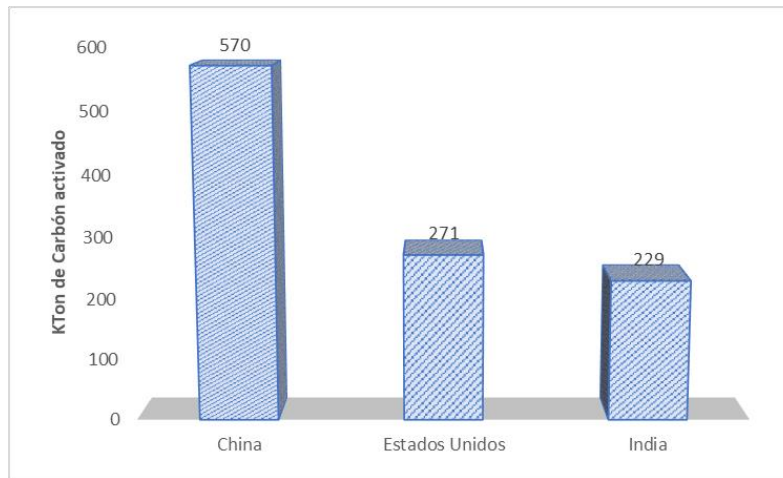
“Los principales mercados para el carbón activado en orden decreciente de importancia son: tratamiento de agua, decoloración, procesamiento químico y farmacéutico, procesamiento de alimentos, purificación de aire y gas y recuperación de vapor de solvente. El mercado ha ido aumentando constantemente como consecuencia de problemas ambientales, especialmente para la purificación de agua y aire”. [13] Además, a medida que más y más países se industrialicen, la necesidad de carbón activado para cumplir con la normativa medioambiental crecerá a un ritmo más rápido. [13]

El mayor mercado de carbón activado es la purificación de los suministros de agua municipales. Los filtros de carbón activado se utilizan en el tratamiento del agua para eliminar los compuestos orgánicos que producen carcinógenos durante la desinfección del agua. El segundo mercado más grande para el carbón activado es la eliminación de metales pesados en las plantas de polvo de carbón en Estados Unidos y Canadá. A partir de 2014, el nuevo mercado de carbón activado es para uso doméstico, para eliminar el olor y mantener el aire fresco. [21]

1.1.9.a. Mercado del carbón activado. El mercado global del carbón activado tuvo una producción de \$ 4.7 billones de dólares para el 2019 con un crecimiento de 5.4% comparado con el 2018. En general se ve un fuerte crecimiento desde el año 2007 con un promedio anual de crecimiento de 2.9% al 2019. China permanece como el mayor productor de carbón activado (570 Kton), seguido de Estados Unidos (271 Kton) e India (229 Kton) como se muestra en la Gráfica 1 a continuación [49]:

Figura 8.

Principales países productores de carbón activado para el 2019



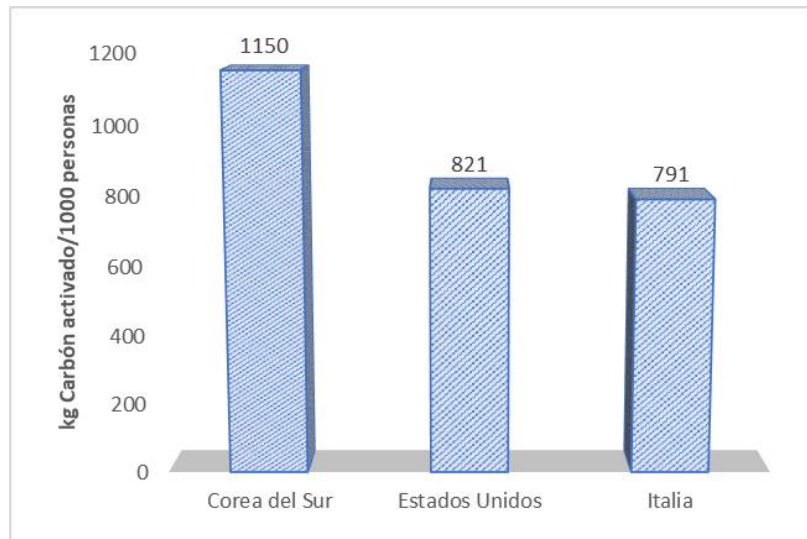
Nota. La figura muestra una gráfica de los principales países productores de carbón activado para el 2019. Tomado de: GlobalTrade, “Previously Driven by the Growth of the Chemical Industry and Construction, the Global Activated Carbon Market to Struggle with the Pandemic,” 2020.

[https://www.globaltrademag.com/previoursly-driven-by-the-growth-of-the-chemical-industry-and-construction-the-global-activated-carbon-market-to-struggle-with-the-pandemic/#:~:text=China \(801K tonnes\) remains the,\(309K tonnes\)%2C threefold.](https://www.globaltrademag.com/previoursly-driven-by-the-growth-of-the-chemical-industry-and-construction-the-global-activated-carbon-market-to-struggle-with-the-pandemic/#:~:text=China (801K tonnes) remains the,(309K tonnes)%2C threefold.)

China produce aproximadamente el 25% del consumo global de carbón activado. Los países con el mayor consumo de carbón activado per cápita para el 2019 son Corea del sur, Estados Unidos e Italia. En la Grafica 2 se muestra el consumo de carbón activado en kilogramos por cada mil habitantes [49]:

Figura 9.

Países con el mayor consumo de carbón activado per cápita para el 2019



Nota. La grafica representa los países con el mayor consumo de carbón activado per cápita para el 2019. Tomado de: IBISWorld, “Activated Carbon Manufacturing in the US Market Size 2003–2026,” 2020. <https://www.ibisworld.com/industry-statistics/market-size/activated-carbon-manufacturing-united-states/>.

Colombia es el país con mayor producción de carbón mineral en América Latina; tiene carbón térmico en el norte, cerca del mar Caribe, y carbón coquizable en la región central. Normalmente, el carbón coquizable bajo en cenizas se emplea en la producción de carbón activado, sin embargo, el contenido intrínseco de cenizas de este tipo de carbón en Colombia es mayor al 5 %, lo cual es alto para la producción de carbón activado[50] [51].

1.2. Maíz

El maíz es uno de los cereales más importantes del mundo ya que suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales, y es una materia prima básica de la industria de transformación, con la que se producen almidón, aceite y proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes alimenticios y, desde hace poco, combustible. [52] Es conocido de diferentes maneras, dependiendo del país y de la cultura. En América es conocido como elote, choclo, jojoto,

sara o zara. En las diferentes regiones de España es llamado danza, millo, mijo, panizo, borona u oroña.[53]

1.2.1. Antecedentes históricos

El maíz (*Zea Mays*) es una planta gramínea anual, originaria de México. [53] La evidencia más antigua de la existencia del maíz es de unos 7 000 años de antigüedad y fue encontrada por arqueólogos en el valle de Tehuacán (México). Este cereal era un artículo esencial en las civilizaciones maya y azteca y tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición; ambos pueblos incluso afirmaban que la carne y la sangre estaban formadas por maíz. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano fue introducido en Europa a través de España. Se difundió entonces por los lugares de clima más cálido del Mediterráneo y posteriormente a Europa septentrional. [52]

Estas migraciones del cereal permitieron desarrollar nuevas formas que dieron origen una gran variedad de maíces; en la actualidad existen más de 300 tipos.[53]

1.2.1. Generalidades del maíz

El maíz es una especie que pertenece a la familia Gramineae que está compuesta por unos 450 a 530 géneros y casi 5.000 especies, es una de las más importantes en la alimentación mundial, pues a ella además del maíz, pertenecen: el trigo, arroz, avena, triticale y centeno. [54]

1.2.1.a. Composición química y nutricional. La importancia de los cereales en la nutrición de millones de personas de todo el mundo es ampliamente reconocida. Debido a su ingesta relativamente elevada en los países en desarrollo, no se les puede considerar sólo una fuente de energía, sino que además suministran proteínas, aunque los granos de este cereal tienen una baja concentración de proteínas y la calidad de éstas se halla limitada por la deficiencia de algunos aminoácidos esenciales, sobre todo lisina. [52]

El maíz es un alimento muy completo, que contiene muchas vitaminas y minerales que favorecen nuestro metabolismo. Algunas de las propiedades con las que cuenta el maíz son:

- Es fuente de antioxidantes que combaten los radicales libres y el envejecimiento celular.
- Es saciante al ser rico en fibra e hidratos de carbono. El maíz da saciedad y ayuda a controlar nuestro apetito. [54]

- Es bueno para la actividad cerebral al ser rico en ácido fólico y otras vitaminas, el maíz es un aliado de diversas funciones cerebrales.
- Es bueno para la salud cardiovascular ya que la vitamina B1 que contiene el maíz disminuye la homocisteína y, por lo tanto, reduce también el riesgo de sufrir un ataque cardiovascular.
- Es recomendado para las embarazadas principalmente durante la lactancia debido a que es rico en ácido fólico.[55]

En la Tabla 2 a continuación se muestra información nutricional para 100g de maíz:

Tabla 2.

Información nutricional del maíz por cada 100 gramos

	Maíz
Energía	98 kcal
Proteína	3.28 g
Carbohidratos	23.5g
Fibra	2.8 g
Azúcar	3.78 g
Grasa	0.78 g
Grasa insaturada	0.12 g
Grasa monosaturada	0.367 g
Grasa polisaturada	0.228 g
Colesterol	0
Sodio	0.005 g
Potasio	0.294 g

Nota. La tabla muestra la Información nutricional del maíz por cada 100 gramos. Tomado de: L. Penelo, “Maíz: propiedades, beneficios y valor nutricional,” 2018.

<https://www.lavanguardia.com/comer/20180906/451618009383/maiz-valor-nutricional-propiedades-beneficios.html>.

1.2.1.b. Cultivo. El maíz es una planta dotada de una amplia capacidad de respuesta a las oportunidades que ofrece el medio ambiente, y tiene alto nivel de respuesta a los efectos de la luz. Actualmente, existen diversidad de abonos útiles para su cultivo bajo condiciones naturales muy distintas de las propias de su hábitat original.[56]

- Adaptación.

El maíz posee buen desarrollo vegetativo que puede alcanzar hasta los 5 metros de altura en altitudes superiores a los 1,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Como cultivo comercial, crece entre las latitudes 55° N y 40° S.[56]

- Suelo

El maíz se adapta a una amplia variedad de suelos donde puede producir buenas cosechas, si se emplean los abonos adecuados y técnicas de cultivo apropiadas. En general, los suelos más idóneos para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención para el agua. [56]

El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5.5 y 7.8. Fuera de estos límites suele aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad o carencia. Cuando el pH es inferior a 5.5 a menudo hay problemas de toxicidad por aluminio y manganeso, además de carencia de fósforo y magnesio; con un pH superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos), tiende a presentarse carencia de hierro, manganeso y zinc. Los síntomas en el campo, de un pH inadecuado, en general se asemejan a los problemas de micro nutrientes.[56]

- Agua

La falta de agua es el factor más limitante en la producción de maíz en las zonas tropicales. Cuando hay estrés hídrico o sequía durante las primeras etapas (15 a 30 días) de establecido del cultivo puede ocasionar pérdidas de plantas jóvenes, reduciendo así la densidad poblacional o estancar su crecimiento. Sin embargo, el cultivo puede recuperarse sin afectar seriamente el rendimiento. Cerca de la floración (desde unas dos semanas antes de la emisión de estigmas, hasta dos semanas después de ésta) el maíz es muy sensible al estrés hídrico, y el rendimiento de grano puede ser seriamente afectado si se produce sequía durante este período. En general, el maíz necesita por lo menos de 500 a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo del cultivo. El maíz es muy sensible también al aniego o encharcamiento; es decir, a los suelos saturados y sobresaturados. Desde la siembra, hasta aproximadamente los 15-20 días, el aniego por más de 24 horas puede dañar el cultivo (especialmente si las temperaturas son altas) porque el meristemo está debajo de la superficie del suelo en esos momentos. Más tarde, en el ciclo de

cultivo, el aniego puede ser tolerado durante períodos de hasta una semana, pero se reduce considerablemente el rendimiento.[56]

1.2.4. Producción de maíz en Colombia

El maíz se cultiva en todo el territorio nacional y sus siembras se realizan en dos grandes temporadas del año, coincidiendo con las épocas de lluvia de cada semestre, por lo que se puede decir que Colombia produce maíz durante todo el año.[57]

En Colombia se siembra maíz blanco y maíz amarillo que tienen variados usos como:

- La molinería para la producción de harina y sémola.
- Alimentos para el desayuno en especial arepas y hojuelas.
- Refinería para la producción de almidón, azúcar, aceite, jarabe, dextrina, gluten y salvado.
- Destilería y fermentación para la producción de licores, chicha y licores de malta.
- Fabricación de piensos (alimentos balanceados). [57]

El maíz tiene una dimensión social importante en la alimentación de millones de colombianos, aportando el 9% del suministro diario de energía de su dieta, a través del consumo de alimentos como arepas y mazamorra, entre otros. En promedio, un colombiano consume 30 kg de maíz al año. Sin embargo, la demanda creciente de este grano responde en mayor medida al consumo de proteína animal de este cereal. Y a su vez, esta demanda se explica por el incremento significativo en el consumo de productos de origen animal, que ha aumentado drásticamente en los últimos años. Los patrones de consumo en la alimentación de los colombianos responden a los cambios en el ingreso, y, por tanto, en sus hábitos de consumo y el gasto en productos animales de la población global.[58]

A pesar de su relevancia, Colombia presenta bajos índices de productividad promedio de maíz en comparación con los principales países productores. En 2016, el rendimiento promedio para maíz en Colombia se situó en $3.6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, mientras que en Estados Unidos fue de $11 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, siendo el promedio mundial de $5.4 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ [58]. En la Tabla 3 se muestran los rendimientos promedios de la producción de maíz en diferentes países:

Tabla 3.*Rendimientos promedios de la producción de maíz 2015-2019*

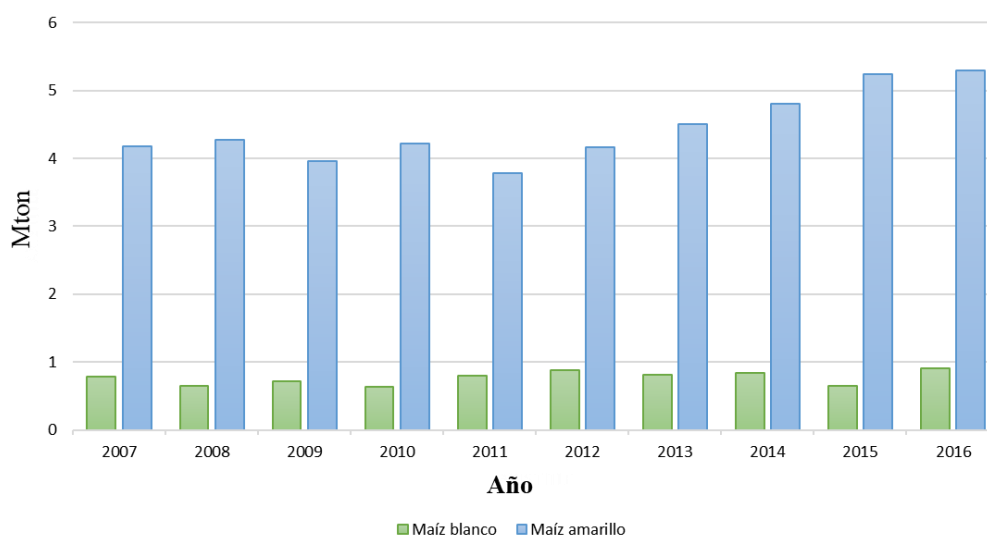
POSICIÓN	PAÍS	PRODUCCIÓN (Mton)			
		2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019
1	Estados Unidos	345.5	384.8	371.1	366.3
2	China	265.0	263.6	259.1	257.3
3	Brasil	67.0	98.5	82.0	96.0
4	UE	58.7	61.9	62.1	63.0
5	Argentina	29.5	41.0	32.0	47.0
6	Ucrania	23.3	28.0	24.1	35.8
7	India	22.6	25.9	28.7	27.8
8	México	25971.0	27.6	27.6	26.7
9	Canadá	13.7	13.9	14.1	13.9
10	Indonesia	10.5	10.9	11.4	12.6
11	Rusia	13.2	15.6	13.2	11.4
12	Nigeria	10.6	10.4	11.0	11.0
13	Sudafrica	8.2	17.6	13.1	11.0
14	Filipinas	7.0	8.1	8.0	7.7
15	Etiopia	7.3	7.3	7.0	7.1
16	Servia	6.0	7.6	4.0	7.0
17	Colombia	1.2	1.6	1.6	1.5
-	Otros	98.0	99.8	106.3	104.2
TOTAL		26958.2	1124.0	1076.4	1107.4

Nota. La tabla muestra los rendimientos promedios de la producción de maíz en diferentes países. Tomado de: CIMMYT, CIAT, and Fenalce, “Maíz para Colombia. Visión 2030,” 2019, [Online]. Available: <https://fenalce.org/archivos/maiz2030.pdf>.

En Colombia, los principales tipos de maíz que se consumen son amarillo y blanco. De estos, el maíz amarillo se usa principalmente para alimentación animal, mientras que el maíz blanco se destina sobre todo para consumo humano[57]. Los cambios en los patrones de dieta en estas últimas décadas han impactado en la demanda de maíz amarillo y blanco. Como se muestra en la Gráfica 3 y la Tabla 4 entre 2007 y 2016 el aumento total de la demanda de ambos tipos de maíz fue de 25%, creciendo en este período con una tasa anual del 3%. Sin embargo, la demanda de maíz amarillo fue mayor (85%) que para maíz blanco (15%) en el mismo período.[58][59]

Figura 10.

Demanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016



Nota. La gráfica muestra la demanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016. Tomado de: CIMMYT, CIAT, and Fenalce, “Maíz para Colombia. Visión 2030,” 2019, [Online]. Available: <https://fenalce.org/archivos/maiz2030.pdf>.

Tabla 4.

Demanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016

Demanda (Mton)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Aumento Total	Aumento anual
Blanco	0.79	0.65	0.71	0.64	0.8	0.88	0.81	0.84	0.65	0.91	15%	2%
Amarillo	4.18	4.27	3.96	4.22	3.79	4.17	4.5	4.8	5.24	5.3	27%	3%
Total	4.97	4.92	4.67	4.86	4.59	5.05	5.31	5.64	5.89	6.21	25%	3%

Nota. La tabla muestra la ddemanda de maíz blanco y amarillo en Colombia entre 2007 y 2016 para la gráfica anterior. Tomado de: CIMMYT, CIAT, and Fenalce, “Maíz para Colombia. Visión 2030,” 2019, [Online]. Available: <https://fenalce.org/archivos/maiz2030.pdf>.

El cultivo del maíz concentra el 13% del área agrícola nacional. El 60% de los productores son pequeños (hasta 10 hectáreas), 30% medianos (hasta 30 hectáreas) y el 10% se considera grande;

lo que permite concluir que es un cultivo de pequeños productores.[57] El área cultivada de maíz tecnificado entre el 2010 y el 2017 fue en promedio de 224.290 hectáreas, ocupando el tercer lugar en área en cultivos transitorios.[58]

En Colombia, el maíz es el tercer cultivo con mayor superficie de siembra después del café y el arroz. A pesar de ello, es el país con mayor volumen de importaciones en Suramérica y el séptimo en el mundo. La producción de maíz en Colombia aumentó 76% entre 1961 y 2016, mientras la demanda creció a un ritmo más acelerado que la producción. Entre 1991 y 2016 la demanda creció en 515%, en ese mismo periodo de tiempo la producción aumentó en 27% con fluctuaciones significativas a lo largo de 25 años. En otras palabras, Colombia consume maíz a un ritmo mayor al que lo produce, dependiendo cada vez más de las importaciones desde Estados Unidos, principalmente.[58]

En 2012, se alcanzó un máximo histórico de producción de 1.8 Mton (millones de toneladas). De acuerdo con los datos más recientes, la producción cayó a 1.6 Mton (2016). En ese mismo año, se importó el 74% de la demanda nacional, es decir, 4.6 Mton de las 6.2 Mton que se requieren en el país. De mantenerse dicha tendencia, se espera que la producción crezca alrededor de 6% y la demanda en 9% entre 2018 y 2030. [58]

1.2.5. Elote de maíz como bioadsorbente

El elote de maíz es una materia prima de biomasa generada como residuo agroindustrial durante el procesamiento del maíz. La cantidad de elote (tusa) de maíz generado en todo el mundo es de aproximadamente 144 millones de toneladas por año, y la mayor parte se desecha o se quema, lo que provoca una grave contaminación ambiental y ningún beneficio.[60]

1.2.5.a. Composición del elote de maíz. La tusa de maíz es una fibra cruda que está compuesta de carbohidratos con 4 partes: la pectina que se fermenta rápidamente y junto con extractivos como los terpenos hacen parte de un 3% de la tusa de maíz, la hemicelulosa está en la pared de la célula y se forma por monosacáridos entre los que se destacan las hexosas, glucosa y galactosa y las pentosas: xilona, arabinosa y ramnosa, que a su vez forman polisacáridos constituyendo un 43% de la tusa de maíz, la celulosa tiene una estructura lineal y fibrosa, se encuentra en las paredes de la célula y constituye el 25% del elote de maíz y finalmente la lignina que asegura la protección

contra la humedad y los agentes atmosféricos y actúa como agente aglomerante de las fibras constituyendo un 29% de la tusa de maíz [61].

La tusa o elote de maíz tiene la siguiente composición física y química, de acuerdo con 4 estudios diferentes como se muestra en la Tabla 5 y la Tabla 6 respectivamente:

Tabla 5.

Características físicas del elote (tusa) de maíz para diferentes estudios

Estudio	Contenido de humedad (wt%)	Materia volátil (wt%)	Contenido de cenizas (wt%)	Contenido de carbon fijo (wt%)
1	4.6	79.9	1.8	13.7
2	11.74	72.33	10.67	4.97
3	---	78.7	0.9	16.2
4	5.1	65.1	8.5	21.3

Nota. La tabla muestra las características físicas del elote (tusa) de maíz para 4 estudios diferentes. Tomado de: G. Janqui Guzman, “REMOCION DE MOLIBDENO DEL AGUA DEL RÍO CHALLHUAHUACHO DE COTABAMBAS-APURIMAC CON CARBON ACTIVADO DE TUSA DE MAIZ (zea mays),” Universidad Nacional del altiplano, 2018.

A pesar de pequeñas variaciones que se hicieron evidentes en algunas oportunidades en los estudios incluidos en la Tabla anterior, es claro que las propiedades del elote conservan una tendencia a mantener un comportamiento común en cuanto a sus características de composición física, lo anterior resulta bastante conveniente a la hora de iniciar pruebas y análisis de estos grupos de tusa para determinar si son viables o no para proceder a incluirlos como bioadsorbentes en el proceso de producción de carbón activado magnético

Tabla 6.

Componentes elementales del elote (tusa) de maíz

Estudio	C (wt%)	H (wt%)	N (wt%)	S (wt%)	O (wt%)
1	50.2	5.9	0.42	0.03	43.5
2	46.2	5.42	0.92	0.24	47.22
3	45.5	6.2	1.3	---	47
4	44.4	5.6	0.43	1.3	48.27

Nota. La tabla muestra la composición de carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno en porcentaje peso/peso para 4 estudios diferentes. Tomado de:

<https://www.hindawi.com/journals/jchem/2017/6478389/tab2/>,

<https://www.hindawi.com/journals/jchem/2017/6478389/tab5/>

1.2.5.b. Elote de maíz como bioadsorbente. El elote de maíz es un excelente bioadsorbente ya que es denso y uniforme, cuenta con alta porosidad, tiene un alto contenido energético y como se puede ver en las tablas anteriores tiene bajas concentraciones de azufre y nitrógeno.[60] Además su contenido de cenizas en general es bajo y está entre los parámetros de un carbón activado (5-10%), el contenido de materia volátil es alto lo que permite que se carbonice mucho más fácil y su contenido de carbono esta alrededor del 50%.

Teniendo en cuenta las anteriores características los elotes (tusa) de maíz pueden usarse como bioadsorbentes de valor agregado para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos tóxicos de las aguas residuales.

1.2.5.c. Usos del elote de maíz en la industria. En los cultivos de maíz, se genera una gran cantidad de materia orgánica la cual alrededor del 50% se cosecha en forma de grano y el porcentaje restante corresponde a residuos como la caña, hojas, tusa, panoja, capacho, entre otras. Estos residuos pueden ser utilizados en diferentes procesos como en la obtención de fibra para alimentación animal, producción de etanol, como combustible para diferentes procesos, para la cobertura del suelo con el fin de protegerlo de las condiciones ambientales o como bioadsorbente para la remoción de contaminantes en aguas industriales y municipales. [62]

2. DISEÑO METODOLOGICO

A continuación, se desarrolla una propuesta para la obtención de carbón activado magnético a nivel laboratorio mediante la activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4), que según la literatura en el desarrollo de carbones activados a partir de residuos agroindustriales ha demostrado tener excelentes rendimientos cercanos al 100% en la remoción de contaminantes como metales pesados [11] y la magnetización mediante un método de co-precipitación con una suspensión metálica de sulfato ferroso y cloruro férrico partiendo de 200 g de elote de maíz que será utilizado como precursor por sus propiedades y características mencionadas anteriormente.

2.1. Materiales

A continuación, se detallan los materiales utilizados para la obtención de carbón activado magnético.

- Elote de maíz (tusa)

El adsorbente utilizado para la obtención de carbón activado magnético es el elote de maíz (tusa) po.

- Agua destilada:

El agua destilada está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuya molécula se representa químicamente por la fórmula H_2O y a la que, mediante el proceso de destilación, se le han eliminado las impurezas e iones. Al estar limpia de electrolitos, sales minerales, microorganismos y otras sustancias contaminantes, tiene aspecto muy transparente y también desaparece radicalmente todo sabor y olor.[63]

- Ácido fosfórico 85%

El ácido fosfórico es incoloro e inodoro y se utiliza para proteger los metales contra la corrosión, en fertilizantes, detergentes, alimentos, bebidas y el tratamiento del agua.[64]

El ácido fosfórico puede presentarse en diferentes estados físicos dependiendo de la temperatura y de su pureza. A 20 °C y una concentración entre 50 y 70% es un líquido transparente móvil; a una concentración de 85% es un líquido viscoso, transparente incoloro o ligeramente amarillento;

y a una concentración del 100% es un sólido higroscópico e inestable, formado por cristales ortorómbicos[64]. Algunas de sus propiedades más importantes son:

- Punto de ebullición: 213 °C
- Punto de fusión: 42.35 °C
- Densidad específica: 1.8741 g·cm⁻³ a 25 °C
- pH: 1.5
- Solubilidad: (548 g/100 mL)
- Presión de vapor: 4 Pa (0.0285 torr) a 20 °C. Su pH es de 1.5
- Cloruro férrico

El Cloruro férrico es un sólido volátil que forma cristales moleculares de tipo laminar por lo que presenta un aspecto de escamas brillantes de color verde y es usado en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales como un excelente floculante, muy usado por su alta eficiencia en remoción de orgánicos y de metales pesados; usado también como agente de grabado en litografías y fotografía, catalizador, mordiente, agente oxidante, desinfectante, pigmento, y aditivo.[65]

Algunas de sus propiedades más importantes son:

- Peso Molecular: 162.2 g
- Densidad a 20°C: 1,40 0.02 g·cm⁻³
- Punto de ebullición: 102.5 °C
- Solubilidad: En agua En todas sus proporciones. No es soluble en solventes orgánicos.[66]
- Sulfato ferroso

El sulfato de hierro (II) es un compuesto químico que se presenta en forma sólida, es de color amarillento y es soluble en agua. Entre las principales aplicaciones del sulfato férrico se encuentran: la medicina, colorantes, horticultura y plantas de tratamiento de aguas.[67]

Algunas de sus propiedades más importantes son:

- Peso Molecular: 399.87 g·mol⁻¹
- Densidad a 20°C: 1,40 g·cm⁻³
- Punto de ebullición: 102.5 °C

- Hidróxido de sodio 10 M

Se encuentra como un líquido viscoso, transparente, inodoro, que se emplea en la industria papelera, farmacéutica, alimenticia, jabonera y química. El hidróxido de sodio reacciona con muchos compuestos orgánicos para la producción de tensoactivos y con ácidos para formar sales, también se usa en la descarbonación de gases y en la industria metalúrgica para la limpieza, desengrase y decapado de metales y en la elaboración de limpiadores y desinfectantes, regeneración de resinas, tratamiento de aguas, efluentes líquidos y gaseosos.[68]

Algunas de sus propiedades más importantes son:

- Peso Molecular: $399.87 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Densidad a 25°C : $2.13 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- Punto de fusión: 318.4°C
- Punto de ebullición: 1388°C a 760 mm de Hg
- Presión de vapor: 1 mm (739°C) [69]

2.2. Equipos

A continuación, se detallan los equipos y herramientas importantes para el desarrollo del carbón activado magnético:

- Molino de cuchillas:

El molino de cuchillas se utiliza para la disminución de tamaño de diferentes materiales, orgánicos e inorgánicos son ideales para triturar materiales blandos y semiduros como el elote de maíz, quebradizos, fibrosos, resistentes y sensibles a la temperatura, así como plásticos y también para la preparación de mezclas heterogéneas.[70]

El principio de funcionamiento se basa en el impacto de un metal duro (como las cuchillas fijadas en el eje) contra cierto producto frágil y/o blando, dependiendo la carga -o fuerza- del impacto de la longitud de la cuchilla en relación con el momento torsor (cupla, torque) del motor. Ese impacto se realiza dentro de la cámara de triturado, que limita el recorrido del producto tantas veces como resulte necesario hasta que la secuencia de impactos reduzca el material al tamaño deseado. [71]

- Tamizador electromagnético:

El tamizador electromagnético se utiliza para obtener partículas entre 0.1 mm – 0.3 mm en el pretratamiento del elote de maíz. Este equipo se activa mediante impulsos electromagnéticos, y puede alojar hasta 10 tamices. El tamizador magnético se recomienda para ensayos de tamizado precisos y también en materiales finos donde se requiere un gran rendimiento y alta precisión, y cuando el uso sea intenso y continuado, ya que gracias a su triple acción vibradora (vertical, lateral y rotacional) es indicada para realizar este tipo de ensayos de tamizado. Además se pueden ajustar variables como: el tiempo de tamizado de 1 a 999 minutos, la intensidad de vibrado y las pausas entre una vibración y la siguiente.[72]

- Mufla:

Para las etapas de carbonización y activación del carbono activado magnético se utiliza la mufla que es una cámara cerrada construida con materiales refractarios que se compone de una puerta por la que se accede al interior de la cámara de cocción, en la que existe un pequeño orificio de observación, un agujero por donde salen los gases de la cámara, ubicado en el techo del horno y las paredes del horno mufla están hechas de placas de materiales térmicos y aislantes.[73]

Este horno es utilizado cuando se requiere alcanzar temperaturas mayores a 200 °C y es necesario tener en cuenta que solo se pueden usar materiales de laboratorio refractarios, debido a las altas temperaturas que el horno puede alcanzar (1200 °C).[73]

- Agitador magnético:

Un agitador magnético es un dispositivo electrónico que utiliza un campo magnético para mezclar de manera automatizada un solvente y uno o más solutos y suelen estar equipados con calefacción que puede llegar hasta los 300°C.

Este dispositivo se compone de una pequeña barra magnética o barra de agitación, que, dependiendo su tamaño y la forma, determinan la efectividad del proceso de agitación y una placa debajo de la cual se tiene un magneto rotatorio o una serie de electromagnetos dispuestos en forma circular a fin de crear un campo magnético rotatorio.

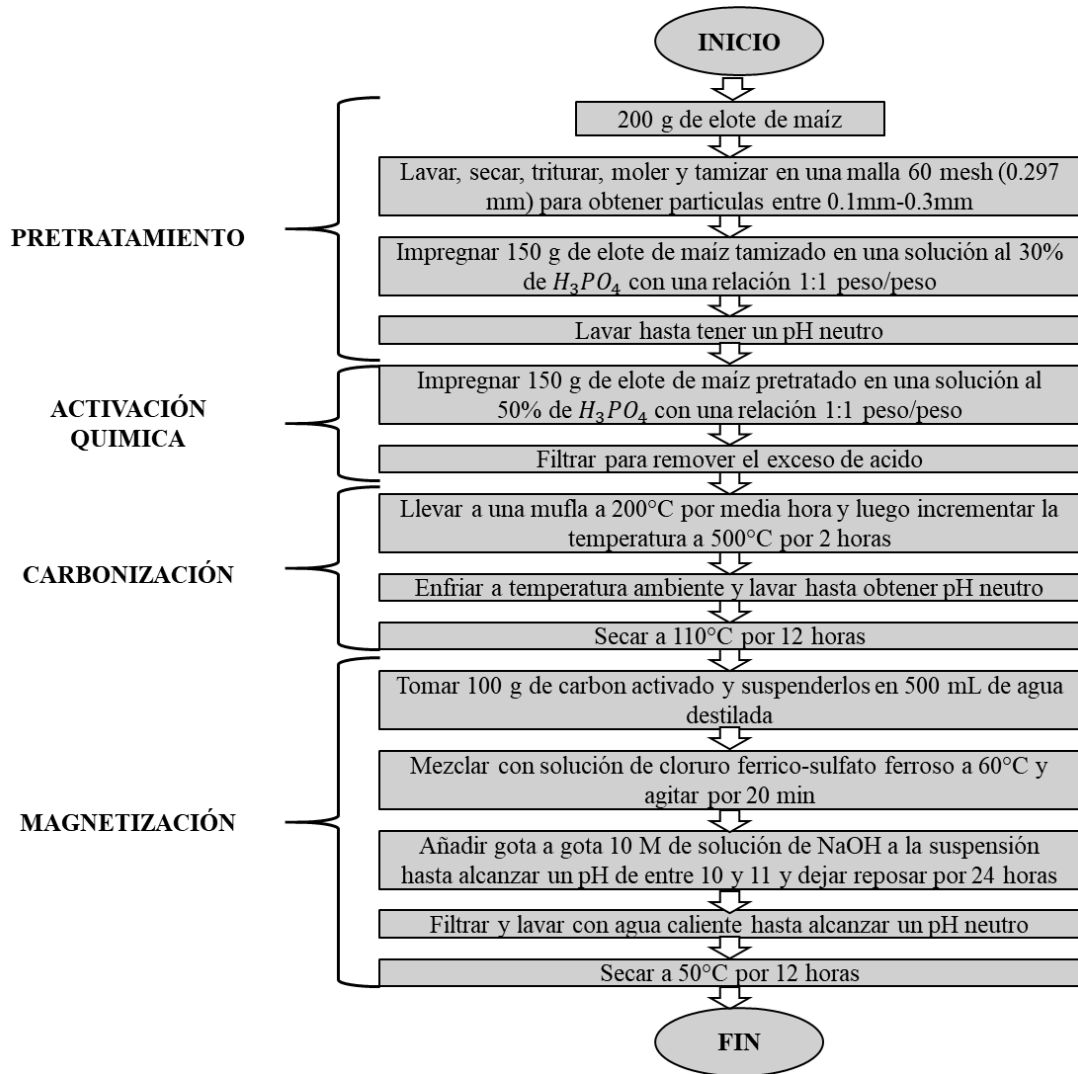
La barra de agitación se deja deslizar dentro de un contenedor, ya sea un matraz o un vaso de precipitado conteniendo algún líquido para agitarlo, el cual se pone encima de la placa donde el campo magnético rotatorio ejerce su influencia sobre la barra de agitación y propicia su rotación.

2.3. Propuesta para la síntesis de carbón activado magnético

Con respecto a la Figura 7 y en base a la revisión bibliográfica, se plantea un camino para la obtención de carbón activado magnético como se muestra en la Figura 8, con el fin de que se puedan tener los mayores rendimientos posibles en la eliminación de contaminantes como por ejemplo metales pesados en aguas residuales. A continuación, se explican cada uno de los pasos que se debe seguir.

Figura 11.

Diagrama de síntesis de carbón activado magnético a nivel laboratorio



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo para la síntesis de carbón activado magnético a nivel laboratorio

2.3.1. Pretratamiento

El pretratamiento que se sigue para la producción de carbón activado magnético con el fin de llegar a condiciones óptimas estándar como lo son áreas superficiales de 300 a 1200 $m^2 \cdot g^{-1}$ con un promedio de diámetro de poro de 10 a 60 nm es el siguiente: [16]

2.3.1.a. Trituración y molienda. Se toman 200 g de elote de maíz que se limpia manualmente, lavando con agua y se seca durante una semana a condiciones ambiente. Una vez seco se tritura manualmente hasta obtener partículas entre 0.5cm – 3 cm, para posteriormente pasar estas partículas por un molino de cuchillas y hacer la reducción final de tamaño de partícula que debería estar entre 0.1 mm - 0.3 mm. [74]

2.3.1.b. Tamizado. El elote de maíz anteriormente triturado y molido se tamiza en un tamizador magnético de laboratorio a un tamaño de malla 60 mesh (0.297 mm de abertura).[75]

2.3.1.c. Impregnación con H_3PO_4 . Se toman 150 g del elote de maíz anteriormente tamizado y se impregnan durante 24 horas con una relación 1:1 peso/peso de ácido fosfórico 30 wt% a temperatura ambiente[76] con el fin de destruir la lignina y la celulosa presentes en la tusa de maíz [29].

Para preparar la disolución de ácido fosfórico al 30%, se utiliza una solución de ácido fosfórico al 85%, para esto se hacen los siguientes cálculos, donde en base a la literatura, el ácido fosfórico al 85% tiene una densidad de $1.71\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ($1710\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) y el ácido fosfórico al 30% tiene una densidad de $1.28\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. [77][78]

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

$$\%pureza = \frac{g \text{ de soluto}}{100 g \text{ disolución}}$$

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$\rho_{H_3PO_4 85\%} = 1710 \text{ g solución} \cdot L^{-1}$$

$$\rho_{H_3PO_4 30\%} = 1280 \text{ g solución} \cdot L^{-1}$$

$$m_2 = 150.0 \text{ g}$$

$$C_1 = \frac{85 \text{ g } H_3PO_4}{100 \text{ g solución}} * \frac{1 \text{ mol } H_3PO_4}{97.99 \text{ g } H_3PO_4} * \frac{1710 \text{ g solución}}{1 L}$$

$$C_1 = 14.83 \text{ mol } H_3PO_4 \cdot L^{-1}$$

$$C_2 = \frac{30 \text{ gH}_3\text{PO}_4}{100 \text{ gH}_3\text{PO}_4} * \frac{1 \text{ molH}_3\text{PO}_4}{97.99 \text{ gH}_3\text{PO}_4} * \frac{1280 \text{ gsolución}}{1 \text{ L}}$$

$$C_2 = 3.918 \text{ molH}_3\text{PO}_4 \cdot \text{L}^{-1}$$

$$1280 \text{ gsolución} \cdot \text{L}^{-1} = \frac{150.0 \text{ g}}{V_2}$$

$$V_2 = 0.1172 \text{ L}$$

$$14.83 \text{ molH}_3\text{PO}_4 \cdot \text{L}^{-1} * V_1 = 3.919 \text{ molH}_3\text{PO}_4 \cdot \text{L}^{-1} * 0.1172 \text{ L}$$

$$V_1 = \mathbf{0.03096 \text{ L}}$$

$$V_{\text{agua}} = 0.1172 \text{ L} - 0.03096 \text{ L}$$

$$V_{\text{agua}} = \mathbf{0.08624 \text{ L}}$$

Es decir, para preparar 150 g de una solución de ácido fosfórico al 30% se debe agregar 0.08624 L de agua destilada a 0.03096 L de ácido fosfórico al 85%.

Luego de que han pasado las 24 horas, se lava con agua destilada hasta tener un pH neutro y se deja secar 12 horas a temperatura ambiente.[76]

2.3.2. Activación química

La activación química se basa en la deshidratación mediante sustancias químicas, en este caso ácido fosfórico H_3PO_4 , que se utiliza para oxidar el carbono.[46]

En anteriores estudios se tomaron soluciones de ácido fosfórico a diferentes concentraciones (10%, 20%, 30%, 40% y 50%) en donde el mayor rendimiento se obtuvo con una solución de 50 wt % [79], es por esto por lo que para la activación química se decide utilizar una solución de ácido fosfórico al 50% en una relación 1:1 peso/peso, tomando 120 g del elote (tusa) pretratada.[76]

Para la preparación de 150 g del agente activante (H_3PO_4 al 50%) se toman 0.0516L de H_3PO_4 al 85% y 0.0533 L de agua destilada, basado en los cálculos que se muestran a continuación:

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

$$\% \text{pureza} = \frac{\text{g de soluto}}{100 \text{ g disolución}}$$

$$C_3 * V_3 = C_4 * V_4$$

$$\rho_{H_3PO_4 85\%} = 1710 \text{ g solución} \cdot L^{-1}$$

$$\rho_{H_3PO_4 50\%} = 1430 \text{ g solución} \cdot L^{-1}$$

$$m_4 = 120.0 \text{ g}$$

$$C_3 = \frac{85 \text{ g } H_3PO_4}{100 \text{ g solución}} * \frac{1 \text{ mol } H_3PO_4}{97.99 \text{ g } H_3PO_4} * \frac{1710 \text{ g solución}}{1 \text{ L}}$$

$$C_3 = 14.83 \text{ mol } H_3PO_4 \cdot L^{-1}$$

$$C_4 = \frac{50 \text{ g } H_3PO_4}{100 \text{ g solución}} * \frac{1 \text{ mol } H_3PO_4}{97.99 \text{ g } H_3PO_4} * \frac{1430 \text{ g solución}}{1 \text{ L}}$$

$$C_4 = 7.296 \text{ mol } H_3PO_4 \cdot L^{-1}$$

$$1430 \text{ g solución} \cdot L^{-1} = \frac{150 \text{ g}}{V_2}$$

$$V_2 = 0.1049 \text{ L}$$

$$14.83 \text{ mol } H_3PO_4 \cdot L^{-1} * V_1 = 7.296 \text{ mol } H_3PO_4 \cdot L^{-1} * 0.1049 \text{ L}$$

$$V_1 = 0.05161 \text{ L}$$

$$V_{\text{agua}} = 0.1049 \text{ L} - 0.05161 \text{ L}$$

$$V_{\text{agua}} = 0.05329 \text{ L}$$

Una vez se tiene la solución del agente activado se adicionan 150 g de elote (tusa) antes pretratada y se deja impregnar durante 24 horas. Después de que han pasado 24 horas, el producto activado se lava con agua para recuperar el ácido y luego se filtra para retirar el exceso de ácido. El ácido recuperado se concentra de nuevo a la concentración requerida para su reutilización.[76]

2.3.3. Carbonización

Una vez se tiene el producto activado y filtrado, lo siguiente que se debe hacer es llevarlo a una mufla a 200°C durante media hora para iniciar la carbonización. Luego de esto se aumenta la temperatura a 500°C durante dos horas para carbonizarlo y hacer que el carbono se oxide gracias

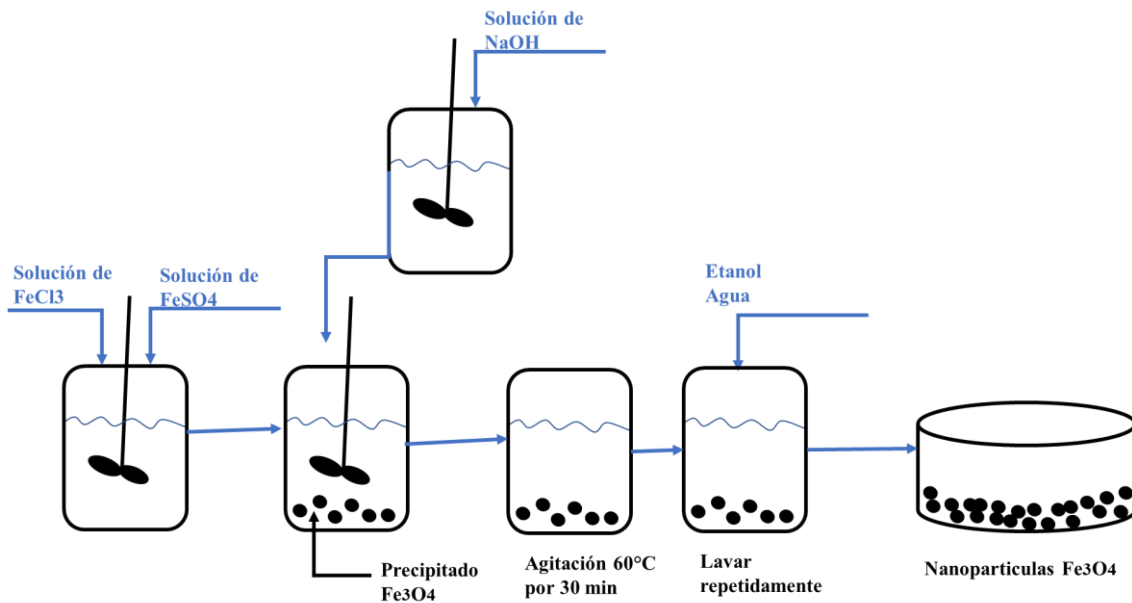
a la presencia del agente activante.[76][16] Pasadas estas dos horas se lleva a temperatura ambiente durante dos horas y se lava con agua destilada hasta obtener un pH de aproximadamente 7. Cuando se alcanza este pH se vuelve a llevar a la mufla para secar a 110°C durante 12 horas para terminar de oxidar y retirar la humedad del mismo.[76]

2.3.4. Magnetización

Para la magnetización de este carbón activado se sintetizan nanopartículas de óxido de hierro Fe_3O_4 mediante el método de co-precipitación donde se mezclan soluciones de cloruro férrico y sulfato ferroso para reaccionar y formar iones de Fe^{3+} y Fe^{2+} , donde estos iones reaccionan con bases como el NaOH para formar la precipitación como se puede ver en la Figura 9, este método es conocido como co-precipitación y de acuerdo con diferentes estudios es el que brinda mejores resultados [79].

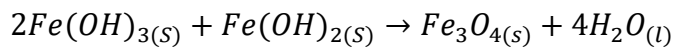
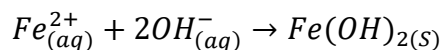
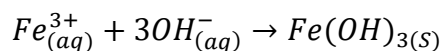
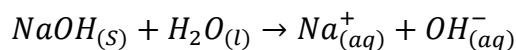
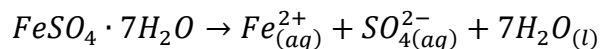
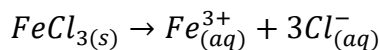
Figura 12.

Esquema del proceso de co-precipitación para la obtención de nanopartículas de Fe_3O_4



Nota. La figura representa Esquema del proceso de co-precipitación para la obtención de nanopartículas de Fe_3O_4

El mecanismo de reacción que ocurre durante el proceso de síntesis de nanopartículas de hierro es el siguiente:[80]



Lo primero que se debe hacer es suspender 100 g de carbón activado previamente en 1 L de agua destilada. Posteriormente se prepara la disolución de cloruro férrico-sulfato ferroso de la siguiente forma:

- Agregar 36 g de cloruro férrico en 2.6 L de agua destilada
- Agregar 40 g de sulfato ferroso a 0.3 L de agua destilada ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- Mezclar las dos soluciones anteriormente preparadas y calentar a una temperatura entre 60 y 70 ° C
- Llevar a un agitador magnético por 20 minutos.

La suspensión formada a partir de una solución de cloruro férrico y una solución de sulfato ferroso se añade a la suspensión acuosa anterior de carbón activado y agua agitándose lentamente a una temperatura ambiente durante 30 min para asegurar una mezcla adecuada. Después de mezclar esta solución, se añade gota a gota 10 M de solución de NaOH a la suspensión hasta que alcanzó un pH de entre 10 y 11 y luego se deja reposar durante aproximadamente 24 horas. [81]

Una vez han pasado las 24 horas, los materiales suspendidos obtenidos de la reacción entre carbón activado y la suspensión de hierro se lavaron repetidamente con agua destilada y etanol al 70% hasta que el pH del filtrado fue aproximadamente 7.[76] [80]

Por último, el carbón activado magnético obtenido es filtrado y secado a 50°C por 12 horas.[76]

2.4. Ventajas, desventajas y aplicaciones del carbón activado magnético

El uso de carbón activado magnético para la remoción de contaminantes puede considerarse como un método emergente para el tratamiento de aguas debido a su bajo costo, simplicidad y porque puede proporcionar una eliminación rápida y eficiente de contaminantes en el agua. Este ha sido estudiado anteriormente para la remoción de metales preciosos como oro y plata en el sector minero, en la remoción de productos farmacéuticos, remoción de metales pesados, colorantes, antibióticos y As(V).[82][81]

A continuación, se caracterizan algunas aplicaciones que han sido estudiadas para la remoción de contaminantes con carbones activados magnéticos:

- Aplicación de carbón activado magnético en la remoción de productos farmacéuticos del agua: en el artículo de investigación que lleva por título “*Recent advances on the development and application of magnetic activated carbon and char for the removal of pharmaceutical compounds from waters: A review*”, se proporciona una reseña de la siguiente información: ruta de síntesis, precursor carbonoso y su preparación, condiciones experimentales utilizadas en la producción de carbón activado, superficie específica, propiedades magnéticas y fármacos objetivo a remover, donde la coprecipitación es la vía de síntesis más utilizada para obtener un carbón activado magnético (44% de los trabajos reportados en la literatura), debido a su sencillez, su importancia industrial porque no requiere equipos costosos y generalmente opera a temperaturas por debajo de los 100 ° C. Además de eso, este proceso no produce productos intermedios tóxicos ni disolventes, siendo ecológico, reproducible y fácil de escalar. Con respecto al tipo de precursor carbonoso utilizado para producir carbón activado magnético, el 57% consiste en carbón activado comercial, el 32 % utiliza biomasa renovable resultante de actividades agrícolas y el 11 % restante incluye otro tipo de precursores como algas, hongos, entre otros.[83]
- Aplicación de carbón activado magnético para la adsorción de metales preciosos: en el artículo de investigación titulado “*Obtención de carbones activados magnéticos para la adsorción de metales preciosos*” se obtiene un carbón activado magnético en polvo para ser utilizado en el sector minero en la adsorción de metales preciosos, donde la eficiencia alcanzada en la adsorción de metales preciosos de oro y plata estuvo en el orden de 21.15 kg/ton para oro y de 5.2 kg/ton para la plata. El carbón activado obtenido en las formas inicialmente descritas es

una de las formas más extendidas de aplicación en fase líquida para la mitigación de contaminantes, purificación de productos y adsorción selectiva de compuestos de interés.[82]

- Aplicación de carbón activado magnético en derrames de petróleo: el carbón nanoactivado en el artículo “*Eco-friendly magnetic activated carbon nano-hybrid for facile oil spills separation*” se extrajo de las raíces del jacinto de agua después de la activación alcalina y seguido de un tratamiento con cloruro de zinc antes de su carbonización. Se indujo nanomagnetita en los nanomateriales obteniendo el carbón activado magnético el cual registró una afinidad máxima de adsorción de aceite de 30,2 g de aceite/g y este carbón se separó del medio de tratamiento fácilmente mediante un campo magnético externo.[84]
- Aplicación de carbón activado magnético para la remoción de Pb(II), Cu(II) y Ni(II) de una solución acuosa: en el artículo “*Magnetic Activated Carbon for Efficient Removal of Pb(II), Cu(II) y Ni(II) from Aqueous Solution*” se desarrolla un carbón activado con un área superficial de 1219 m²/g que puede separarse fácilmente de un sistema suspendido utilizando un imán ordinario, donde la adsorción de estos metales dependió del tiempo de contacto, el pH de la solución, cantidad de adsorbente, concentración inicial de Pb(II), Cu(II), Ni(II) con una cantidad máxima de adsorción en la monocapa de 146.20 mg/g, 152.67 mg/g y 158.73 mg/g respectivamente. [85]

Un factor importante para tener en cuenta es que la recuperación del carbón activado magnético se logra aplicando un campo magnético externo que permite un fácil aislamiento y lavado. Lo anterior representa una gran ventaja de los adsorbentes magnéticos en comparación con los no magnéticos ya que para estos carbones convencionales la separación se logra comúnmente mediante filtración o centrifugación, lo que aumenta el costo del proceso en general sin garantizar que sea completamente eficiente para aislar el adsorbente de la muestra. Lo anterior aumenta las posibilidades de aplicación de carbones activados magnéticos en el tratamiento de aguas residuales a gran escala (aplicación industrial). Además, la presencia de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro, como el caso del Fe₃O₄, confiere estabilidad química, baja toxicidad y excelente reutilización del material adsorbente.[82]

La principal desventaja de producir carbón activado magnético es la disminución o bloqueo de los poros en la superficie por compuestos como Fe₃O₄ u otras nanopartículas magnéticas que se adsorben también en la superficie del carbón activado magnético, dejando a algunos sitios en la

superficie sin disponibilidad para la adsorción de contaminantes, lo cual hace que estos presenten un área de superficie específica menor en comparación con carbones activados no magnéticos y como resultado, se reduce la capacidad de adsorción en la eliminación de contaminantes en el agua. También se debe tener en cuenta que la producción de carbón activado magnético implica mayores costos de producción en comparación con otros carbones activados no magnéticos.[81] A continuación en la Tabla 7 se listan las principales ventajas y desventajas del carbón activado magnético.

Tabla 7.

Ventajas y desventajas de un carbón activado magnético

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente reutilización del material adsorbente • Estabilidad química • Baja toxicidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución o bloqueo de los poros en la superficie • Mayores costos de producción

Nota. La tabla muestra las principales ventajas y desventajas de un carbón activado magnético

Finalmente, debido a las ventajas asociadas con el uso de carbones activados magnéticos se puede deducir que estos materiales representan una alternativa sostenible para la purificación del agua. Sin embargo y con base en los trabajos reportados en la literatura, aún existe una falta de información sobre la eficiencia de adsorción de carbón activado magnético en sistemas multicomponente y en matrices de agua natural. Dicha información es esencial con respecto al uso de carbón activado magnético en aplicaciones de tratamiento reales. Por lo tanto, serán necesarios más estudios para comprender el impacto de la materia orgánica natural, los compuestos inorgánicos y otros contaminantes presentes en aguas. Además, la regeneración de carbón activado magnético debe investigarse a fondo, con el objetivo de encontrar procesos de regeneración eficientes y respetuosos con el medio ambiente, que permitan la reutilización de carbón activado magnético.

3. ANÁLISIS DE COSTOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO MAGNÉTICO

Se realiza un análisis de costos para la producción de carbón activado magnético partiendo de 3 kg·h⁻¹ de tusa de maíz que se estipula de acuerdo con el conocimiento y recomendaciones del autor de la tesis doctoral “*Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio*”. [86] Es importante mencionar que, aunque la relevancia de este análisis es indiscutible, el hecho de que no se haya dado lugar a la experimentación debido a la situación global actual es una gran limitación para la precisión de los costos de esta propuesta .

A continuación, se lleva a cabo una descripción del proceso donde se escaló a nivel planta piloto la propuesta metodológica a nivel laboratorio descrita en el capítulo anterior.

3.1. Descripción del proceso

El proceso de producción de carbón activado magnético, partiendo del elote (tusa) de maíz se divide en 4 pasos principales que contiene las operaciones descritas a continuación:

3.1.1. *Pretratamiento.*

- Lavado: se debe lavar la tusa de maíz para retirar cualquier tipo de impurezas como tierra, hojas, cascaras y otros contaminantes.
- Secado: el secado se hace por 1 hora a 100°C y permite eliminar la humedad con el fin de interrumpir el proceso de degradación que presenta la materia prima evitando la proliferación de microorganismos.
- Molienda: Una vez la tusa de maíz está seca, se lleva a un molino donde se hace la reducción de partículas entre 0.1 mm – 0.3 mm
- Tamizado: el elote de maíz anteriormente molido se lleva a un tamizador electromagnético y se pasa por una malla 60 mesh (0.297 mm), donde el elote que no pase por esta malla se vuelve a recircular al molino para ser posteriormente utilizado
- Mezclado: por cada 3 kg de elote de maíz se agregan 2.3438 L de una solución de H₃PO₄ al 30% y se deja reposar por 12 horas. La solución de H₃PO₄ se separa de la tusa de maíz y se vuelve a reutilizar en el proceso.
- Lavado: se lava con agua hasta tener un pH neutro para posteriormente ser llevado a la etapa de activación.

3.1.2. Activación química:

- Mezclado: por cada 3 kg de elote de maíz se agregan 2.098 L de una solución de H_3PO_4 al 50% y se deja reposar por 12 horas. Una vez han pasado las 12 horas, se separa la solución de H_3PO_4 de la tusa de maíz y se retorna la solución de H_3PO_4 para volver a ser utilizada.

3.1.3. Carbonización:

- Carbonizado: Una vez se tiene el producto activado y filtrado, lo siguiente que se debe hacer es llevarlo a un horno rotatorio a $200^{\circ}C$ durante media hora para iniciar la carbonización. Luego de esto se aumenta la temperatura a $500^{\circ}C$ durante dos horas para carbonizarlo y hacer que el carbono se oxide gracias a la presencia del agente activante. [76]

Cuando el ácido fosfórico se calienta para descomponerse, emite humos altamente tóxicos de óxidos de fósforo y polifosfatos que pueden ser tratados por un precipitador electrostático que se utilizan para el control de la contaminación del aire, particularmente para eliminar partículas de gases residuales en instalaciones industriales y estaciones de generación de energía.

- Lavado: se lava con agua destilada hasta obtener un pH de aproximadamente 7.
- Secado: Cuando se alcanza este pH se vuelve a llevar al horno rotatorio para secar a $110^{\circ}C$ durante 12 horas para terminar de oxidar y retirar la humedad de este. [79]

3.1.4. Magnetización:

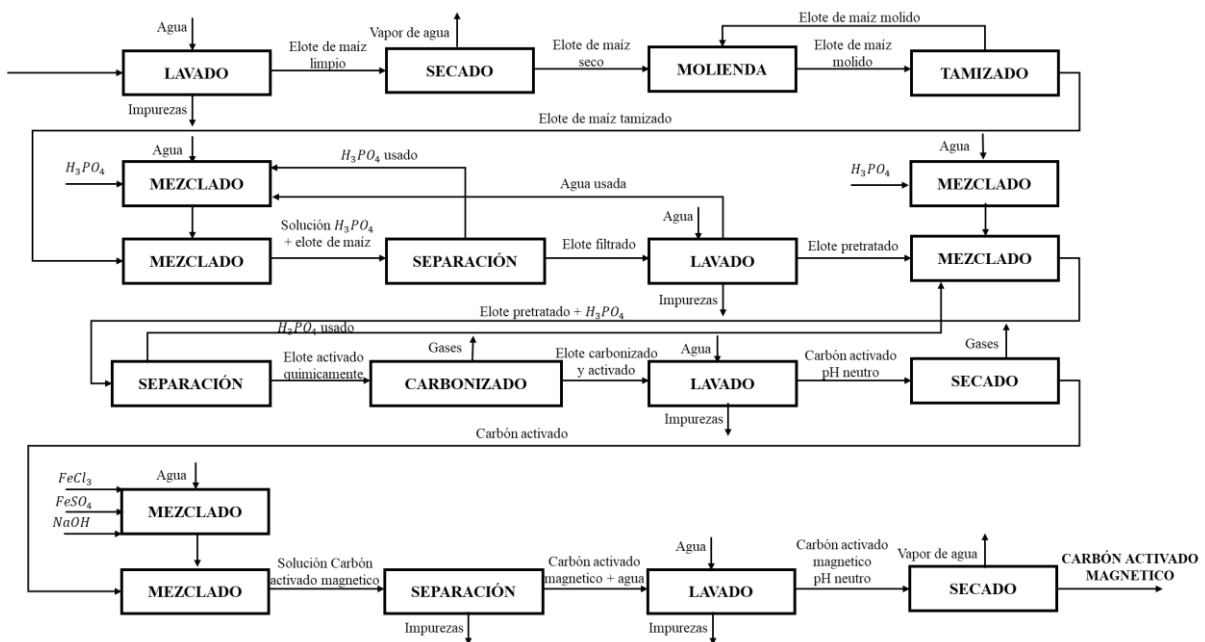
- Mezclado: Para la magnetización de este carbón activado se utilizará una suspensión de cloruro férrico y sulfato ferroso. Lo primero que se debe hacer es agregar por cada 1.5 kg de carbón activado 15 L de agua destilada. Posteriormente se prepara la disolución de cloruro férrico-sulfato ferroso de la siguiente forma: se agrega 540 g de cloruro férrico en 39 L de agua destilada y 600 g de sulfato ferroso en 4.5 L de agua destilada. Mezclar y agitar las dos soluciones anteriormente preparadas y calentar a una temperatura entre 60 y $70^{\circ}C$. [83]
- Mezclado: La suspensión formada a partir de una solución de cloruro férrico y una solución de sulfato ferroso se añade a la suspensión acuosa de carbón activado, agitándose lentamente a una temperatura ambiente durante 30 min para asegurar una mezcla adecuada. Después de mezclar esta solución, se añade gota a gota 10 M de solución de NaOH a la suspensión hasta que alcanzó un pH de entre 10 y 11 y luego se deja reposar durante aproximadamente 24 horas.

- Lavado: Una vez han pasado las 24 horas, los materiales suspendidos obtenidos de la reacción entre carbón activado y la suspensión de hierro se lavaron repetidamente con agua destilada y etanol hasta que el pH del filtrado fue aproximadamente 7
- Secado: Por último, el carbón activado magnético obtenido fue filtrado y secado a 50°C por 12 horas. [47]

Las operaciones descritas anteriormente se representan en el diagrama de bloques en la Figura 10, donde el flujo es continuo ya que lo que se quiere con esto es producir carbón activado constantemente y de esta forma nivelar los requisitos del cliente a lo largo del tiempo, con el fin de asegurar una producción continua que pueda ser implementada luego a nivel industrial. Además de reducir los residuos del proceso desde el comienzo hasta el final de la línea de producción ya que se requiere la integración de todos los elementos del sistema de producción para lograr un movimiento continuo del producto a través del sistema sin separarlo en lotes.

Figura 13.

Diagrama de bloques para la producción de carbón activado magnético

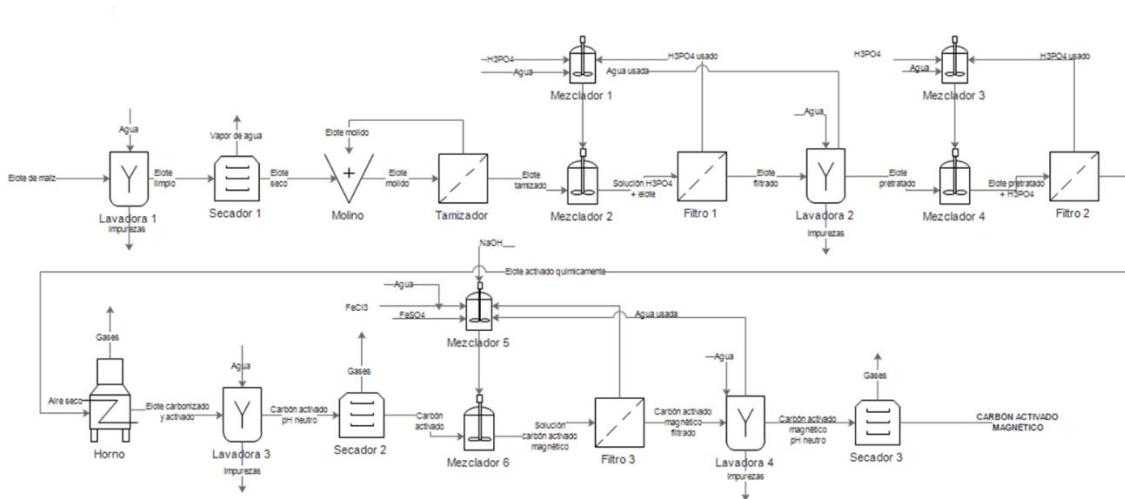


Nota. La figura representa un diagrama de bloques para la producción de carbón activado magnético

Partiendo del diagrama de bloques anterior, se realiza el diagrama de flujo para la producción de carbón activado magnético como se puede ver en la Figura 11 a continuación.

Figura 14.

Diagrama de flujo para la producción de carbón activado magnético



Nota. La figura representa un diagrama de flujo para la producción de carbón activado magnético.

3.2.Equipos

Los equipos que se utilizarán para la planta piloto se escogieron teniendo en cuenta la capacidad requerida ($3 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$), material y especificaciones técnicas como el consumo energético.

- Horno deshidratador

Para el secado de las tusas de maíz en el pretratamiento del material se dispone de un horno deshidratador común con capacidad para secar altas cantidades de materia, este proceso dura alrededor de una hora a 100°C . Este equipo cuenta con 10 bandejas, sus dimensiones son de $80 \times 60 \text{ cm}$ y genera un consumo de $15 \text{ kW}\cdot\text{h}^{-1}$. [87]

Figura 15.

Horno deshidratador.



Nota. La figura representa un horno deshidratado.
Tomado de: Comek, “Horno deshidratador.”
<https://www.comek.com.co/index.php/productos/equipo-para-frutas/horno-deshidratador-.html>.

- Molino

Para moler el elote de maíz, se utiliza un molino de perlas de tipo disco de laboratorio RTSM-0.5AD, que se aplica principalmente a molienda de grado micrónico (1-15 μm) y submicrónico (0.8-1 μm). Este equipo es en acero inoxidable y aleación de zirconia para el rotor de molienda, con dimensiones de 55x40x46 cm, tiene un peso de 80 kg y su fuerza de motor es de 2.2 kw y un voltaje de 220V – 50 Hz.[88]

Figura 16.

Molino de perlas



Nota. La figura representa un molino de perlas.
Tomado de: Root Group, “RTSM-0.5AD(D) Molino de perlas de laboratorio,” 2018. <https://es.root-asia.com/product/ad-laboratorio-perlas-molino/>.

- Tamizador

Para tamizar el elote de maíz durante el pretratamiento con el fin de obtener un tamaño de partícula que pase por una malla 60 mesh (0.297 mm), se utiliza un tamizador electromagnético que puede contener hasta 6 tamices de altura completa o 13 de altura media. Sus dimensiones son 71.1x63.5x53.3 cm, cuenta con un voltaje de 220V - 50 Hz.[72]

Figura 17.

Tamizador



Nota. La figura representa un tamizador de 8" 220 V-50 Hz. Tomado de: Cole-Parmer, "W.S. Tyler Ro-Tap Shaker for 8" Diameter Sieves, 220 VAC, 50 hz." <https://www.coleparmer.com/i/w-s-tyler-ro-tap-shaker-for-8-diameter-sieves-220-vac-50-hz/5998662>.

- Mezclador

Los mezcladores en este proceso son utilizados en diferentes pasos de la preparación del carbón activado magnético donde se quieren preparar soluciones bien sea para activar el carbón activado magnético o magnetizarlo. Es importante destacar que hablamos de un tipo de maquinaria que se caracteriza por la simplicidad mecánica de todas sus partes, y por no necesitar grandes tareas de mantenimiento, consiguiendo siempre los mejores resultados en cuanto al producto resultante de sus mezclas.

En el mezclador que se muestra en la Figura 15, el líquido es conducido y bombeado por la cámara de mezcla, dando lugar a la aspiración necesaria para efectuar la homogenización y la

correcta incorporación de las partículas sólidas al fluido base. Una vez incorporado todo el producto, se cierra la válvula de regulación y mediante un sistema basado en aplicarle múltiples recirculaciones al líquido resultante, se consigue una mezcla totalmente homogénea, evitando así tanto la humectación como el apelmazamiento del polvo en el fondo.[89]

Figura 18.

Mezclador industrial para líquidos y sólidos



Nota. La figura representa un mezclador industrial para líquidos y sólidos. Tomado de: InoxMIM, “Mezcladores industriales para líquidos y sólidos EMTB de InoxMIM,” 2020.

[https://www.inoxmim.com/blog-c/mezcladores-industriales-para-liquidos.](https://www.inoxmim.com/blog-c/mezcladores-industriales-para-liquidos)

- Horno rotatorio

El horno rotatorio es el equipo principal para la producción de carbón activado magnético ya que se encuentra en la etapa de carbonización y activación que dan las características físicas y químicas de este. Este horno permite calentar y mezclar muestras simultáneamente en una atmósfera controlada y tiene una inclinación ajustable que está entre $0.5 - 2^\circ$ y un tubo de trabajo que se puede desmontar y reemplazar fácilmente. El medidor normalmente tiene un flujo de nitrógeno y puede llegar hasta una temperatura máxima de 1100°C . Para este caso el horno rotatorio se debería mandar a hacer con todas las especificaciones que no son objetivo de este proyecto de investigación.[86]

Figura 19.

Horno rotatorio tubular



Nota. Cole-Parmer, “W.S. Tyler Ro-Tap Shaker for 8" Diameter Sieves, 220 VAC, 50 hz.”

<https://www.coleparmer.com/i/w-s-tyler-ro-tap-shaker-for-8-diameter-sieves-220-vac-50-hz/5998662>.

- Precipitador electrostático

Se utiliza un precipitador electrostático para atrapar partículas mediante su ionización, atrayéndolas por una carga electrostática inducida. Los precipitadores electrostáticos son equipos que presentan una elevada eficiencia de captación (cercana al 99%) para todo el espectro de tamaño de partículas de material particulado. Sin embargo, presentan una gran sensibilidad a variables eléctricas, como el voltaje y la frecuencia de suministro de electricidad. Este instrumento se debe mandar a hacer al igual que el horno rotatorio con todas las especificaciones del proceso y es utilizado para tratar los humos tóxicos de polifosfatos y óxidos de fosforo que se liberan en el horno rotatorio.[90]

Figura 20.

Precipitador electrostático



Nota. La figura representa un precipitador electrostático.

Tomado de: Alibaba, “industrial fume scrubber air electrostatic exhaust smoke filter.”

[https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-fume-scrubber-air-electrostatic-exhaust-smoke-filter-62214490055.html?spm=a2700.8699010.normalList.8.775d442096J8uW&s=p.](https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-fume-scrubber-air-electrostatic-exhaust-smoke-filter-62214490055.html?spm=a2700.8699010.normalList.8.775d442096J8uW&s=p)

3.3. Análisis de costos de producción

Por medio del siguiente análisis de costos se identifican los principales recursos involucrados en la producción de carbón activado magnético partiendo del elote de maíz y se asocia su costo.

3.3.1. Costo de los equipos

En la Tabla 8 se estipulan los costos de los equipos anteriormente descritos, cotizados mediante diferentes páginas web de fabricantes y distribuidores a nivel nacional e internacional [86][87][90][91][88][89]. Además, el costo del horno rotatorio se estipula de acuerdo con el conocimiento del autor de la tesis doctoral “*Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio*”. [86] La cotización de estos equipos se hizo en dólares y se pasó a pesos colombianos con la TRM del día (\$3558.57COP).

Tabla 8.

Cotización equipos para la producción de carbón activado magnético para el año 2020

Equipo	Costo (\$COP)
Horno deshidratador	8.900.000
Molino de perlas	8,259,000
Tamizador	12,000,000
Mezcladores	20,000,000
Horno rotatorio	200,000,000
Precipitador electrostático	1,500,000
Total	250,659,000

Nota. La tabla muestra la cotización de los equipos para la producción de carbón activado magnético.

Se debe tener en cuenta que la construcción de la anterior tabla se realizó con los valores comerciales del equipo que fue más cercano a los requerimientos del proceso de producción para esta planta piloto.

3.3.2. Costo de reactivos

Partiendo del hecho de que la materia prima principal (elote de maíz o tusa) es un residuo agroindustrial que no tiene ningún costo de adquisición, se cotizaron los siguientes reactivos utilizados en la activación y magnetización del carbón, como se muestra en la Tabla 9. La cotización de estos equipos se realizó mediante un proveedor nacional en pesos colombianos por cada kilogramo de reactivo, los cuales luego se llevaron a las cantidades necesarias descritas en el proceso de producción partiendo de $3 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de elote de maíz. [92]

Tabla 9.

Cotización de reactivos para la producción de carbón activado magnético

Reactivo	Costo (\$ COP/kg)	Costo por cada 3 kg·hr⁻¹ de elote de maíz (\$ COP)
Ácido fosfórico	7,259	4,252.6
Cloruro férrico	4,105	2,216.97
Sulfato ferroso	2,856	1,713.6
Hidróxido de sodio	4,165	833
Total	18,385	9,016.17

Nota. La tabla muestra la cotización de reactivos para la producción de carbón activado magnético

3.3.3. Gastos adicionales

Para la operación de la planta piloto, se asume que se requieren 3 operarios, a los cuales se les realizará el pago del salario mínimo legal vigente para el año en curso además de todas las prestaciones de ley según el ministerio de trabajo como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.

Salario y prestaciones salariales operarios planta piloto

CONCEPTO	COSTO (\$COP)
Salario	877,803
Vacaciones	36,575.125
Cesantías	73,150.25
Interés a las cesantías	731.50
Prima de servicios	73,150.25
Subsidio de transporte	102,854
Pensión	74,613.25
Dotación	70,000
Salud	105,336.36
TOTAL	1,414,213.735
TOTAL 3 OPERARIOS	4,242,641.205

Nota. La tabla muestra los valores para el salario y prestaciones salariales de 3 operarios que se requieren para el funcionamiento de la planta piloto

Cómo consecuencia inevitable de la situación de pandemia mundial que actualmente afecta la regularidad del modo en que el comercio y la industria funcionan, resulta inviable realizar al detalle la experimentación para el desarrollo del carbón activado magnético, debido a la inaccesibilidad a la información necesaria para generar datos detallados de numerosos elementos indispensables para producir un análisis de costos idóneo.

Esta situación, desafortunadamente, genera una irreparable ausencia de precisión en los datos que estructuran el análisis de costos ya aludido, Aun así y como se pudo apreciar, esfuerzos se han labrado con el fin de incluir un estudio al área de costos que permita proporcionar una idea acertada de lo que se espera alcanzar con la totalidad de este trabajo, una vez más, todo lo anterior fue ejecutado a pesar de los retos que propone adelantar una investigación sin una disposición completa de los reportes y documentos que se deberían revisar.

Del mismo modo, se debe resaltar que a pesar de que se ha logrado llegar a una idea muy cercana a la realidad en cuanto a las máquinas que se deben utilizar, estos problemas ya

mencionados han incurrido en un déficit de información acerca de las especificaciones técnicas de maquinaria, necesarias para el funcionamiento de estas.

Aparte de los temas ya abordados, se debe ser claro en qué, después de considerarlo, se concluyó que todo lo relacionado con el área de diseño de planta concerniente a este estudio, no es de ninguna forma un objetivo del proyecto ya que el diseñar una planta está sujeto a desarrollar plenamente una experimentación íntegra y completa, incluso, la totalidad de esta sección citada podría considerarse como un trabajo netamente nuevo y de una tesis adicional, que propondría una investigación totalmente aparte de la que nos ocupa, y es por esta razón que no se abunda al describir este t3pico en particular.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló una propuesta para la obtención de carbón activado magnético, donde el carbón obtenido del elote de maíz se activa químicamente por la impregnación de una solución de ácido fosfórico al 50% en una relación 1:1 peso/ peso con respecto al elote de maíz y se magnetiza mediante el método de coprecipitación usando una solución acuosa de cloruro férrico y sulfato ferroso.

Se realizó la identificación de parámetros para el desarrollo de carbón activado magnético con base en la literatura, donde se decide utilizar el elote de maíz como precursor debido a su alta porosidad, alto contenido de carbono y bajo contenido de materia orgánica lo que facilita su carbonización al producir menos cenizas y lo vuelve un excelente adsorbente. Además, basado en investigaciones previas donde se desarrollaron carbones activados convencionales partiendo del elote de maíz, este ha demostrado tener cerca de un 100% de rendimiento en la remoción de metales pesados como Cr (VI), Cd⁺², Pb⁺² y As(V).

Se identificaron las aplicaciones del carbón activado magnético en el tratamiento de aguas industriales para la remoción de contaminantes como metales pesados, iones y colorantes debido a las ventajas que este tiene en la recuperación del adsorbente mediante campos magnéticos en el proceso, lo que trae beneficios económicos, ya que normalmente se utilizan centrifugaciones y filtraciones que no son altamente efectivas y además son costosas.

Se estimó el costo de una planta piloto para la producción de carbón activado magnético partiendo de la tusa de maíz con una capacidad de producción de 3 kg·h⁻¹, donde la inversión inicial de los equipos sería de alrededor \$250,659,000 COP, los costos de reactivos sería de \$9016.17 COP y la mano de obra mensual suponiendo que se requieran 3 operarios sería de \$4,242,641.205 COP. Es importante notar que algunos costos como el gasto energético, el gasto de agua y precisión en el costo de los equipos está sujeto a experimentación para un mejor y más detallado análisis.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Centro de aprendizaje Carbotecnia, “¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción?” *Carbotecnia*, 2020, [Online]. Available: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/>.
- [2] D. Ruthven and University of New Brunswick, *Principles of adsorption and adsorption processes*. 1984.
- [3] Real academia española, “Adsorbente,” 2014. <https://dle.rae.es/adsorbente>.
- [4] Lenntech, “Adsorción / Carbón activo,” 2014. <https://www.lenntech.es/adsorcion.htm>.
- [5] H. Marsh and F. Rodriguez, “Production and Reference Material,” in *Activated Carbon*, 2006, pp. 454–508.
- [6] GreenFacts, “Contaminante(s),” 2001. <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/contaminante.htm>.
- [7] H. Khalid and A. Anwar, “Basics of hydroxyapatite—structure, synthesis, properties, and clinical applications,” in *Handbook of Ionic Substituted Hydroxyapatites*, 2020, pp. 85–115.
- [8] C. sectoriales Interempresas, “Equipos para el cribado,” 2008. <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/22529-Equipos-para-el-cribado.html>.
- [9] A. A. Refaat, “Biofuels from Waste Materials,” in *Comprehensive Renewable Energy*, 2012, pp. 217–261.
- [10] READE, “PRODUCTS Binders, Chemical (Inorganic & Organic) Binder Materials, Organic Binder Materials, Organic,” 2020. <https://www.reade.com/products/binder-materials-organic>.
- [11] O. Ioannidou and A. Zabanioutou, “Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, 2006, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403210600061X>.
- [12] UB EDU, “TIPO DE SECADO.” http://www.ub.edu/oblq/oblq-castellano/dessecacio_tip.html.

- [13] H. Marsh and F. Rodriguez Reinoso, “Activated carbon. Production and Reference Material,” in *Activated Carbon*, United Kingdom, 2006, pp. 454–480.
- [14] S. Tang, Y. Chen, R. Xie, W. Jiang, and W. Jiang, “Preparation of activated carbon from corn cob and its adsorption behavior on Cr(VI) removal,” *Water Sci Technol*, vol. 73, 2016, [Online]. Available: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/73/11/2654/19107/Preparation-of-activated-carbon-from-corn-cob-and?redirectedFrom=fulltext>.
- [15] W. Buah, J. MacCarthy, and S. Ndur, “Conversion of Corn Cobs Waste into Activated Carbons for Adsorption of Heavy Metals from Minerals Processing Wastewater,” *Sci. Publ. Gr.*, vol. 4, no. 4, pp. 98–103, 2016, [Online]. Available: <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ijepp.20160404.11.html>.
- [16] Universidad de Sevilla and Aguapedia, “Manual del carbon activado,” Universidad de Sevilla, 2015.
- [17] C. Tien and Syracuse University, “INTRODUCTION TO ADSORPTION. Basics, Analysis, and Applications,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019, pp. 23–85.
- [18] L. Atares Huerta, “Determinación de la porosidad,” *Univ. Politécnica Val.*, 2017, [Online]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52102/20. Articulo docente. Determinación de la porosidad.pdf?sequence=1#:~:text=La densidad aparente es el,los granos\)%5B2%5D](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52102/20. Articulo docente. Determinación de la porosidad.pdf?sequence=1#:~:text=La densidad aparente es el,los granos)%5B2%5D).
- [19] Maquimex, “ALUMINA, ¡PURIFICADOR POR EXCELENCIA!” <https://maquimex.com/blog/alumina>.
- [20] G. Blanco, “Adsorción y absorción,” 2013, [Online]. Available: <https://www.canscience.com/vector-clipart/adsorption.html>.
- [21] P. Ollero de Castro, Ingeniería, and Escuela Técnica Superior de Sevilla, “FUNDAMENTOS DE LAS OPERACIONES DE SEPARACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA,” *Editor. Univ. Sevilla*, vol. 0, no. 0, pp. 219–247, 2020.
- [22] F. Fernandez Pino and Universidad de Sevilla, “Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción,” pp. 53–105, 2011, [Online]. Available:

- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/indice.pdf>.
- [23] N. Drakos, R. Moore, and IUPAC, “Monolayer and multilayer adsorption, micropore filling and capillary condensation,” vol. 8, 2002, [Online]. Available: https://old.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node17.html.
- [24] S. Kwon, M. Fan, H. Dacosta, A. Russell, K. Berchtold, and M. Dubey, “CO₂ Sorption,” in *Coal gasification and its applications*, William An., 2011, pp. 293–339.
- [25] Universidad de Valencia, “Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea,” *Dep. Química Física*, vol. 0, pp. 2–28, 2015, [Online]. Available: https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Superficies_Solidas_A.pdf.
- [26] P. Webb, “Introduction to Chemical Adsorption Analytical Techniques and their Applications to Catalysis,” *MIC Tech. Publ.*, 2003, [Online]. Available: https://www.micromeritics.com/Repository/Files/intro_to_chemical_adsorption.pdf.
- [27] C. Tien, “Adsorbate Uptake and Equations Describing Adsorption Processes,” in *INTRODUCTION TO ADSORPTION*, 2019.
- [28] N. Garcia Asenjo, “UNA NUEVA GENERACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS DE ALTAS PRESTACIONES PARA APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES,” Universidad de Oviedo, 2014.
- [29] C. G. Barbosa Basto and S. A. Romero Cajamarca, “DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA EN SUELOS CAOLÍNÍICOS Y BENTONÍICOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO APLICANDO DIFERENTES GRADIENTES TÉRMICOS.,” Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [30] BYJUS, “Factors Affecting Adsorption of Gases on Solids,” 2020. <https://byjus.com/chemistry/factors-affecting-the-extent-of-adsorption/#:~:text=Nature of adsorbent,nickel surface under certain conditions.>
- [31] P. D. Humpola, “ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE COMPUESTOS BIORREFRACTARIOS EN SOLUCIONES ACUOSAS,” Universidad Nacional del Litoral, 2013.

- [32] H. More, “Factors affecting adsorption,” 2020. https://thefactfactor.com/facts/pure_science/chemistry/physical-chemistry/factors-affecting-adsorption/11184/.
- [33] R. de Simone, “SELECCIÓN Y DISEÑO DEL ADSORBENTE,” *Tecnología PSA. Adsorción por balance de presiones*, 2003. http://www.ricardodesimone.com.ar/NacEspanol/PSA/seleccion_y_diseno.html.
- [34] N. Shaik and A. Firdausi, “Surface Chemistry. Adsorption.” <https://www.toppr.com/guides/chemistry/surface-chemistry/adsorption/>.
- [35] University of Puerto Rico, “Criterios de selección del adsorbente,” 2005. <https://www.coursehero.com/file/p7kt1dg/Criterios-de-Selección-del-adsorbente-1-El-adsorbente-no-debe-reaccionar/#:~:text=Criterios de Selección del adsorbente 1.,separar o con el disolvente.&text=El adsorbente debe ser insoluble,No tóxico y económico.>
- [36] Scribd, “Tipos y selección del adsorbente,” 2019. <https://www.scribd.com/document/404208481/TIPOS-Y-SELECCION-DEL-ADSORBENTE-4-2-docx>.
- [37] Kayser, “Adsorción,” pp. 5–19.
- [38] S. A. Iturria Campano and Universidad de Concepción, “UTILIZACIÓN DE UN ADSORBENTE DE BAJO COSTO PARA LA ADSORCIÓN DE COBRE,” Universidad de Concepción, 2018.
- [39] S. Chatterjee and C. Tien, “Adsorption in continuous-flow well-mixed tanks-the effect of residence time distribution of adsorbents,” *Sep. Technol.*, vol. 1, 1991, [Online]. Available: <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/095696189180003I>.
- [40] H. Patel, “Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review,” *Appl. Water Sci.*, 2019, [Online]. Available: file:///C:/Users/kelly/Downloads/Patel2019_Article_Fixed-bedColumnAdsorptionStudy.pdf.
- [41] G. Delgadillo Gamboa and M. del R. Sun Kou, “ADSORCIÓN DE FENOL CON CARBONES ACTIVADOS PREPARADOS A PARTIR DE PEPAS DE NÍSPERO DE

- PALO POR ACTIVACIÓN QUÍMICA,” *Rev. SOC Química*, vol. 75, pp. 64–75, 2009, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v75n1/a09v75n1.pdf>.
- [42] A. C. Rodriguez, A. M. Campos Rosario, and A. Perez Flores, “Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz,” *MUTIS*, vol. 9, pp. 29–39, 2019, [Online]. Available: <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/download/1515/1487/>.
- [43] J. L. Rodriguez Gía, “Definiciones: Leyes, conceptos de las operaciones de molienda, trituración, pulverización y tamizado,” Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí, 2017.
- [44] Carbotecnia, “¿Qué es el carbón activado?,” 2020. .
- [45] L. Mall, “Tipos de ligantes y selección,” 2005, pp. 44–60.
- [46] Universidad de Sevilla, “Manual del carbón activo,” E.U. Politecnica Universidad de Sevilla, 2014.
- [47] A. K. Sakhiya, A. Anand, and K. Priyanka, “Production, activation, and applications of biochar in recent times,” *Shenyang Agric. Univ.*, 2020, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-020-00047-1#:~:text=Chemical activation is a heat,with respect to physical activation.>
- [48] J. Knepper and M. Greenbank, “No TitleGAC/PAC: Use of Powdered Activated Carbon for Potable Water Treatment in Small Systems,” 2002. .
- [49] GlobalTrade, “Previously Driven by the Growth of the Chemical Industry and Construction, the Global Activated Carbon Market to Struggle with the Pandemic,” 2020. [https://www.globaltrademag.com/previoursly-driven-by-the-growth-of-the-chemical-industry-and-construction-the-global-activated-carbon-market-to-struggle-with-the-pandemic/#:~:text=China \(801K tonnes\) remains the,\(309K tonnes\)%2C threefold.](https://www.globaltrademag.com/previoursly-driven-by-the-growth-of-the-chemical-industry-and-construction-the-global-activated-carbon-market-to-struggle-with-the-pandemic/#:~:text=China (801K tonnes) remains the,(309K tonnes)%2C threefold.)
- [50] J. Rincon, S. Rincon, P. Guevara, D. Ballen, J. C. Morales, and N. Monroy, “Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías,” *Rev. Acad. Colomb.*, 2015, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v39n151/v39n151a04.pdf>.

- [51] IBISWorld, “Activated Carbon Manufacturing in the US Market Size 2003–2026,” 2020. <https://www.ibisworld.com/industry-statistics/market-size/activated-carbon-manufacturing-united-states/>.
- [52] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, “El maíz en la nutrición humana,” 1995. <http://www.fao.org/3/t0395s/T0395S00.htm#Contents>.
- [53] E. Pliego, “El maíz: su origen, historia y expansión,” *Panorama cultural*, 2020. [https://panoramacultural.com.co/gastronomia/3676/el-maiz-su-origen-historia-y-expansion#:~:text=El maíz \(Zea Mays\) es,del trigo y el arroz.&text=El maíz es llamado de,país y de la cultura](https://panoramacultural.com.co/gastronomia/3676/el-maiz-su-origen-historia-y-expansion#:~:text=El maíz (Zea Mays) es,del trigo y el arroz.&text=El maíz es llamado de,país y de la cultura).
- [54] I. Ortega Sanchez, “Maíz I (Zea mays),” *Reduca*, vol. 7, pp. 151–167, 2014, [Online]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/27974/1/MAIZ I.pdf>.
- [55] L. Penelo, “Maíz: propiedades, beneficios y valor nutricional,” 2018. <https://www.lavanguardia.com/comer/20180906/451618009383/maiz-valor-nutricional-propiedades-beneficios.html>.
- [56] H. Deras Flores, *Guia técnica. El cultivo del maíz*. El Salvador, 2017.
- [57] Fenalce, “FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE CEREALES Y LEGUMINOSAS – FENALCE, 22 DE JUNIO DE 2018,” 2018. <http://www.agroinsumossa.com/cultivo-del-maiz-en-colombia/>.
- [58] CIMMYT, CIAT, and Fenalce, “Maíz para Colombia. Visión 2030,” 2019, [Online]. Available: <https://fenalce.org/archivos/maiz2030.pdf>.
- [59] G. Saavedra del Real and M. González Yáñez, *El cultivo de Maíz choclero y dulce*, Boletín N°. Santiago, Chile, 2014.
- [60] N. K. Berber Villamizar, L. Morales Barrera, G. Chavez Camarillo, and E. Cristiani Urbina, “Corn cob as an effective, eco-friendly, and economic biosorbent for removing the azo dye Direct Yellow 27 from aqueous solutions,” *PLoS One*, 2018, [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5919615/>.
- [61] G. Janqui Guzman, “REMOCION DE MOLIBDENO DEL AGUA DEL RÍO

CHALLHUAHUACHO DE COTABAMBAS-APURIMAC CON CARBON ACTIVADO DE TUSA DE MAIZ (zea mays),” Universidad Nacional del altiplano, 2018.

- [62] L. V. Peñaranda Gonzales, S. P. Montenegro Gomez, and P. A. Giraldo Abad, “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia,” 2017, [Online]. Available: <file:///C:/Users/kelly/Downloads/Dialnet-AprovechamientoDeResiduosAgroindustrialesEnColombi-6285350.pdf>.
- [63] Aqueae Fundación, “Agua destilada: definición y propiedades.” <https://www.fundacionaqueae.org/que-es-agua-destilada/>.
- [64] New Jersey department of health, “Hoja informativa sobre sustancias peligrosas,” 1997. <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1516sp.pdf>.
- [65] Q. de C. S.A, “Cloruro Férrico,” 2012. <https://www.quimpac.com.co/index.php/cloruro-ferrico>.
- [66] EcuRed, “Cloruro de hierro III,” 2012. https://www.ecured.cu/Cloruro_de_hierro_III.
- [67] Formulación química online, “Fe₂(SO₄)₃ / sulfato de hierro (III),” 2018. [https://www.formulacionquimica.com/Fe2\(SO4\)3/](https://www.formulacionquimica.com/Fe2(SO4)3/).
- [68] Q. de C. S.A, “Soda Caústica,” 2012. <https://www.quimpac.com.co/index.php/soda-caustica>.
- [69] R. Química, “HOJA DE SEGURIDAD II HIDROXIDO DE SODIO.” <http://www.regenciaquimica.ucr.ac.cr/sites/default/files/Hidroxidodesodio.pdf>.
- [70] FRITSCH, “MOLINOS DE CORTE - UNA LIMPIEZA INCOMPARABLEMENTE SENCILLA,” 2020. .
- [71] T. Kresisch, *Molino de Cuchillas*, Editorial. 2016.
- [72] Mecanica científica S.A, “TAMIZADORA ELECTROMAGNÉTICA,” 2016. <http://www.mecacisa.com/es/portfolio/tamizadora-electromagnetica/>.
- [73] TP Laboratorio Químico, “Mufla,” 2020. <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/horno-mufla.html#:~:text=Este horno es utilizado cuando,alcanzar>

(1200 °C).

- [74] Industrias 1, “Industrias 1. Trituración,” vol. 1, 2015, [Online]. Available: http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/05_Apunte Trituracion.pdf.
- [75] A. RAMIREZ, “Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para a remoción de colorantes,” 2016, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v46n1/0120-2804-rcq-46-01-00033.pdf>.
- [76] C. Anyika, Z. Abdul Majid, and N. A. Mohd Asri, “Synthesis and characterization of magnetic activated carbon developed from palm kernel shells,” *SpringerLink*, 2017, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41204-017-0027-6>.
- [77] Merck, “Ácido orto-fosfórico 85% SDS,” 2019. https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-100573?Origin=PDP.
- [78] PRODUCTOS QUÍMICOS PANAMERICANOS S.A., “ÁCIDO FOSFÓRICO 34-55%,” 2006. <https://www.pqp.com.co/wp-content/uploads/2020/02/HS-CC-32-Ácido-fosfórico-al-34-y-55.pdf>.
- [79] N. Rattanachueskul, A. Saning, and S. Kaowphong, “Magnetic carbon composites with a hierarchical structure for adsorption of tetracycline, prepared from sugarcane bagasse via hydrothermal carbonization coupled with simple heat treatment process,” *Bioresour. Technol.*, 2016, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720307828>.
- [80] B. Prabowo, K. Thiya, and A. Dani, “Economic Perspective in the Production of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles by Co-precipitation Method,” *World Chem. Eng. J.*, vol. 2, pp. 1–4, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ/article/download/4478/3275>.
- [81] L. Rocha, D. Pereira, E. Sousa, M. Otero, V. Esteves, and V. Calisto, “Recent advances on the development and application of magnetic activated carbon and char for the removal of pharmaceutical compounds from waters: A review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 718, 2020, [Online]. Available:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720307828>.
- [82] I. Garcia Fernandez, A. Fernandez Rodriguez, C. Deiana, and M. F. Saldella, “OBTENCIÓN DE CARBONES ACTIVADOS MAGNÉTICOS PARA LA ADSORCIÓN DE METALES PRECIOSOS,” *Cent. Investig. Ind. Min. Met.*, [Online]. Available: <http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015-Fernandez-MIN6-O5.pdf>.
- [83] L. Rocha, D. Pereira, E. Sousa, M. Otero, and V. Esteves, “Recent advances on the development and application of magnetic activated carbon and char for the removal of pharmaceutical compounds from waters: A review,” *Sci. Total Environ.*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720307828>.
- [84] H. Shorky, M. Elkady, and E. Salama, “Eco-friendly magnetic activated carbon nano-hybrid for facile oil spills separation,” *Sci. Rep.*, vol. 10, 2020, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-67231-y>.
- [85] S. Zhang, H. Chen, L. Tao, and C. Huang, “Magnetic Activated Carbon for Efficient Removal of Pb(II) from Aqueous Solution,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 35, 2018, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/318434046_Magnetic_Activated_Carbon_for_Efficient_Removal_of_PbII_from_Aqueous_Solution.
- [86] L. E. Mendoza Geney, “Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio,” Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [87] Comek, “Horno deshidratador.” <https://www.comek.com.co/index.php/productos/equipospara-frutas/horno-deshidratador.html>.
- [88] Root Group, “RTSM-0.5AD(D) Molino de perlas de laboratorio,” 2018. <https://es.root-asia.com/product/ad-laboratorio-perlas-molino/>.
- [89] InoxMIM, “Mezcladores industriales para líquidos y sólidos EMTB de InoxMIM,” 2020. <https://www.inoxmim.com/blog-c/mezcladores-industriales-para-liquidos>.
- [90] Alibaba, “industrial fume scrubber air electrostatic exhaust smoke filter.” <https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-fume-scrubber-air-electrostatic->

exhaust-smoke-filter-

62214490055.html?spm=a2700.8699010.normalList.8.775d442096J8uW&s=p.

- [91] Cole-Parmer, “W.S. Tyler Ro-Tap Shaker for 8" Diameter Sieves, 220 VAC, 50 Hz.”
<https://www.coleparmer.com/i/w-s-tyler-ro-tap-shaker-for-8-diameter-sieves-220-vac-50-hz/5998662>.
- [92] D. Aliados, “Productos químicos - Materias primas.” <http://www.distribuidoraaliados.com/>.

GLOSARIO

Adsorción: fenómeno de superficie por el cual un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.[1]

Adsorbato: sustancia que se adhiere a la superficie del sólido en el proceso de adsorción, generalmente se encuentra en forma de líquido o gas. [2]

Adsorbente: sustancia, generalmente sólida y de estructura porosa, que posee una gran capacidad de adsorción. [3]

Capacidad de adsorción: es la relación de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso de adsorbente, depende de las condiciones de humedad, presión y temperatura. [4]

Carbonización: es un proceso por el cual los residuos sólidos incrementan su contenido de carbono a partir de material orgánico, generalmente por pirolisis en una atmósfera inerte. [5]

Contaminante: sustancia que se encuentra en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos (adversos) para la salud o el medio ambiente. [6]

Co- precipitación: es un proceso en el cual dos o más componentes son precipitados simultáneamente en un solvente. [7]

Cribado: proceso de tratamiento mediante el cual se separan materiales sólidos dependiendo su tamaño de partícula, pueden ser en grano, en polvo o en suspensión acuosa utilizando mallas de metal en máquinas que vibran. [8]

Extrusión: es un método de pretratamiento físico donde los materiales se someten a calentamiento, mezclado y cizallamiento, lo que da lugar a modificaciones físicas y químicas durante su paso por la extrusora. [9]

Ligante: es un compuesto que se utiliza para unir dos o más materiales en una mezcla y se caracteriza por tener una buena adherencia y cohesión. [10]

Molienda: proceso que consiste en reducir el tamaño de partícula de una materia sólida a menos de 0.2 mm. [5]

Precursor: material de partida para la formación de carbón activado con propiedades definidas como dureza, estructura y tamaño de poros, contenido de carbono, contenido de ceniza, entre otros. [11]

Secado: proceso que consiste en la eliminación de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. [12]

Tamizado: método simple que permite separar partículas de diferentes tamaños al pasarlas a través de un tamiz (un filtro con malla de alambre) o colador fino. [5]

Tasa de adsorción: velocidad con la que el adsorbente, adsorbe una sustancia y la cual está sujeta a cambios de temperatura y la velocidad de difusión del soluto en el proceso principalmente. [4]

Trituración: proceso de pretratamiento para la reducción de partículas con tamaño de entrada de hasta 1 m y salida de 1 cm. [13]