

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

“Obtención de carbón activado a partir del bagazo del café
como una propuesta de utilización del residuo de una
industria cafetera”

Previo a la obtención del título de
INGENIERO QUÍMICO

Autores

CARLA SOLANGE HIDALGO SEGOVIA
SOLANGE GIULIANA RIVERA GARCÉS

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2017

RESUMEN

El bagazo de café es un desecho orgánico constituido por el grano molido, tostado y procesado para la extracción del café, siendo de gran volumen que si no se trata y se conserva durante un tiempo prolongado, expulsa olores desagradables y se transforma en un medio óptimo para la proliferación de moscas y otras plagas. El carbón activado tiene la característica de ser poroso en su superficie y es utilizado en la adsorción, la cual se refiere a la retención de átomos, iones y moléculas en la superficie de un material. Esta tesis se basa en la obtención de carbón activado a partir del bagazo de café por medio de la activación física en un horno pirolítico a temperatura de 500°C y con el agente oxidante, vapor de agua, así mismo, por medio de activación química con ácido fosfórico al 20% y 40% (m/m) a 400°C. El bagazo de café utilizado fue el desecho proveniente de la industria Solubles Instantáneos C.A. Los carbones activados obtenidos se los caracterizaron mediante las normas INEN, se comparó la capacidad de adsorción con un carbón comercial utilizando azul de metileno para finalmente realizar una propuesta de aprovechamiento de este residuo agroindustrial.

Palabras claves: carbón activado, bagazo, activación, carbonización, adsorción.

ABSTRACT

The coffee bagasse is an organic residue compounded by the ground, roasted and processed grain from the extraction of coffee, this bagasse has a great volume that if not treated and is preserved for a long time expels unpleasant odors and becomes an optimal medium for the proliferation of flies and other plagues. Activated charcoal has the characteristic of being porous on its surface and is used in adsorption, which refers to the retention of atoms, ions and molecules on the surface of a material. This thesis is based on the production of activated charcoal from the coffee bagasse by means of physical activation in a pyrolytic furnace at a temperature of 500°C and with an oxidizing agent, water vapor, besides, through the chemical activation with 20% and 40% (w/w) phosphoric acid at 400°C. The coffee bagasse used is the solid waste from the Solubles Instantáneos C.A company. The activated charcoals obtained were characterized by the INEN standards; the adsorption capacity was compared with a commercial carbon using methylene blue to finally make a proposal of use to this agroindustrial residue.

Keywords: Activated charcoal, bagasse, activation, carbonization, adsorption.

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a:

Nuestros padres, José Rivera Carrión y Elena Garcés Vélez; César Hidalgo Larrea y María Segovia Peralta, demostrándonos nuestros logros alcanzados, llenándonos de orgullo y felicidad.

A nuestros hermanos y abuelas, con quienes compartimos momentos en familia, están siempre a nuestro lado y han sido nuestro ejemplo a seguir.

Solubles Instantáneos para que nuestro proyecto sea de uso futuro para mejorar la gestión de sus residuos.

ESPOL para que nuestra tesis sea una utilizada para futuras investigaciones o continuación de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

Dios, por habernos bendecido para culminar nuestra carrera universitaria.

Nuestras familias, que nos impulsan a cumplir nuestras metas, dándonos apoyo.

ESPOL y a nuestros maestros, que nos transmitieron sus conocimientos y sabiduría durante el tiempo de nuestra formación profesional.

Aquellas personas que contribuyeron con el desarrollo de nuestro proyecto, como la industria Solubles Instantáneos C.A., los encargados del laboratorio de Hidrocarburos, laboratorio de Operaciones Unitarias, laboratorio de Espectrometría, taller de la FIMCP, CEMA, y especialmente a nuestro tutor de tesis M.Sc. Bernardo Mora Andrade.

Finalmente a nuestros compañeros por compartir junto con nosotras toda la etapa de formación profesional, estableciendo una gran amistad en este período.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Carla Solange Hidalgo Segovia

Solange Giuliana Rivera Garcés

Y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Carla Solange Hidalgo Segovia

Solange Giuliana Rivera Garcés

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

| | |
|--|---|
| DQO | Demanda Bioquímica de Oxígeno. |
| S.I.C.A. | Solubles Instantáneos Compañía Anónima. |
| FIMCP | Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencia de la Producción |
| CEMA | Centro de Estudios del Medio Ambiente |
| MAGAP | Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca |
| SINAGAP | Sistema Nacional de Información Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca |
| NTE | Norma Técnica Ecuatoriana |
| INEN | Instituto Ecuatoriano de Normalización |
| ASTM | American Society of Testing Materials |
| USD | Dólar norteamericano |
| Av. | Avenida |
| Ec. | Ecuación |
| Reac. | Reacción |
| %b.s. | Porcentaje en base seca |
| pH | Potencial de Hidrógeno |
| AM | Azul de metileno |
| H ₃ PO ₄ | Ácido fosfórico |
| NaOH | Hidróxido de sodio |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| HCl | Ácido clorhídrico |
| CH ₃ COOH | Ácido acético |
| KI | Yoduro de potasio |
| Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O | Tiosulfato de sodio pentahidratado |
| KIO ₃ | Yodato de potasio |
| P ₂ O ₅ | Pentóxido de fósforo |
| H ₂ O | Agua |

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| ACRÓNIMOS Y SIGLAS..... | VI |
| TABLA DE CONTENIDO | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | X |
| ÍNDICE DE TABLAS | XII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 8 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 1.1. Definición del carbón activado..... | 8 |
| 1.2. Composición química del carbón activado | 8 |
| 1.3. Estructura física del carbón activado..... | 9 |
| 1.4. Tamaño de poros | 9 |
| 1.5. Tipos de carbón activado | 10 |
| 1.5.1. Pulverizado..... | 10 |
| 1.5.2. Granulado..... | 10 |
| 1.6. El café como materia prima de producción de carbón activado | 11 |
| 1.6.1. Bagazo de café..... | 12 |
| 1.7. Métodos de producción de carbón activado | 14 |
| 1.7.1. Activación física..... | 15 |
| 1.7.2. Activación química..... | 15 |
| 1.8. Aplicaciones del carbón activado | 16 |
| 1.8.1. El carbón activado en el tratamiento de aguas residuales | 17 |
| 1.9. Regeneración del carbón activado | 18 |
| 1.10. Adsorción | 18 |
| 1.10.1. Adsorción física | 20 |
| 1.10.2. Adsorción química | 21 |
| 1.11. Eficacia de adsorción del carbón activado | 21 |
| 1.12. Factores que influyen la adsorción del carbón activado | 22 |
| 1.13. Caracterización del carbón | 23 |
| 1.13.1. Número de yodo | 23 |

| | |
|--|----|
| 1.13.2. Densidad aparente | 24 |
| 1.13.3. Tamaño de partícula..... | 24 |
| 1.13.4. Contenido de cenizas | 24 |
| 1.13.5. Tamaño del poro | 24 |
| 1.13.6. pH..... | 24 |
| 1.13.7. Contenido de humedad | 24 |
| 1.14. Capacidad de adsorción _____ | 25 |
| 1.14.1. Adsorción de Azul de metileno | 25 |
| 1.14.2. Isotherma de Langmuir..... | 25 |
| CAPÍTULO 2 | 28 |
| 2. METODOLOGÍA | 28 |
| 2.1. Pretratamiento de la materia prima _____ | 28 |
| 2.2. Activación química _____ | 28 |
| 2.3. Activación física_____ | 30 |
| 2.4. Caracterización del carbón activado obtenido_____ | 31 |
| 2.4.1. Rendimiento | 31 |
| 2.4.2. Granulometría..... | 31 |
| 2.4.3. Contenido de humedad | 32 |
| 2.4.4. Densidad aparente | 32 |
| 2.4.5. Cenizas Totales..... | 33 |
| 2.4.6. Número de Yodo | 33 |
| 2.4.7. pH..... | 34 |
| 2.5. Capacidad de adsorción _____ | 35 |
| 2.5.1. Adsorción de Azul de metileno | 35 |
| 2.5.2. Isotherma de adsorción de Langmuir | 35 |
| CAPÍTULO 3 | 39 |
| 3. RESULTADOS..... | 39 |
| 3.1. Pretratamiento de la materia prima _____ | 39 |
| 3.2. Resultados de las activaciones _____ | 39 |
| 3.3. Granulometría _____ | 40 |
| 3.4. Contenido de humedad _____ | 42 |
| 3.5. pH _____ | 44 |
| 3.6. Densidad aparente _____ | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.7. Cenizas totales | 45 |
| 3.8. Número de yodo | 46 |
| 3.9. Isotherma de Langmuir | 48 |
| 3.10. Adsorción de azul de metileno | 52 |
| 3.11. Resultados generales | 57 |
| CAPÍTULO 4 | 59 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 59 |
| 4.1. Discusión..... | 59 |
| CAPÍTULO 5 | 67 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 67 |
| 5.1. Conclusiones..... | 67 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 69 |
| REFERENCIAS..... | 71 |
| GLOSARIO DE TERMINOS..... | 75 |
| SIMBOLOGÍA..... | 79 |
| ANEXOS | 80 |
| ANEXOS | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1-1. Tipos de poros presentes en el carbón activado | 8 |
| Figura 1.5-1. Tipos de carbón activado | 10 |
| Figura 1.6-1. Bagazo o borra de café | 14 |
| Figura 1.8-1. Filtro de carbón activado | 17 |
| Figura 1.12-1. Compuestos con alta y muy alta probabilidad de ser adsorbidos por el carbón activado | 23 |
| Figura 1.14.1-1. Soluciones de AM después de agitar con diferentes cantidades de carbón activado | 25 |
| Figura 2.2-1. Diagrama del proceso de la activación química | 29 |
| Figura 2.3-1. Diagrama del proceso de la activación física | 30 |
| Figura 3.2-1. Curva de calor de la pirólisis del bagazo | 40 |
| Figura 3.3-1. Curva granulométrica del carbón activado por H_3PO_4 al 20% | 41 |
| Figura 3.3-2. Curva granulométrica del carbón activado por H_3PO_4 al 40% | 41 |
| Figura 3.3-3. Curva granulométrica del carbón por activación física | 42 |
| Figura 3.9-1. Isoterma de Langmuir para el carbón activado por H_3PO_4 al 20% | 48 |
| Figura 3.9-2. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado por el H_3PO_4 al 20% | 49 |
| Figura 3.9-3. Isoterma de Langmuir para el carbón activado por H_3PO_4 al 40% | 49 |
| Figura 3.9-4. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado por el H_3PO_4 al 40% | 50 |
| Figura 3.9-5. Isoterma de Langmuir para el carbón activado comercial | 50 |
| Figura 3.9-6. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado comercial | 51 |
| Figura 3.10-1. Recta de calibración para el azul de metileno | 52 |
| Figura 3.10-2. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado por el H_3PO_4 al 20% | 53 |
| Figura 3.10-3. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado por el H_3PO_4 al 20% | 54 |
| Figura 3.10-4. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado por el H_3PO_4 al 40% | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.10-5. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado por el H_3PO_4 al 40% | 55 |
| Figura 3.10-6. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado comercial | 56 |
| Figura 3.10-7. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado comercial | 57 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.3-1. Propiedades físicas y químicas del carbón activado _____ | 9 |
| Tabla 1.5.2-1. Ventajas y desventajas dependiendo del tipo de carbón activado | 11 |
| Tabla 1.6-1. Datos de composición química (%b.s.) para café verde y tostado__ | 12 |
| Tabla 1.6.1-1. Descripción y empleo de los subproductos del café _____ | 13 |
| Tabla 1.6.1-2. Análisis físico-químico del bagazo del café_____ | 14 |
| Tabla 1.10.2-1. Diferencias entre adsorción química y física _____ | 21 |
| Tabla 1.14-1. Características de algunas materias primas del carbón activado _ | 26 |
| Tabla 2.5.1-1. Proporción de las soluciones de azul de metileno _____ | 35 |
| Tabla 2.5.2-1. Proporción para diferentes soluciones de ácido acético _____ | 36 |
| Tabla 3.1-1. Contenido de humedad del bagazo de café_____ | 39 |
| Tabla 3.2-1. Resultados de las activaciones químicas_____ | 39 |
| Tabla 3.2-2. Resultados de la activación física _____ | 40 |
| Tabla 3.3-1. Granulometría del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20%_____ | 40 |
| Tabla 3.3-2. Granulometría del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40%_____ | 41 |
| Tabla 3.3-3. Granulometría del carbón por activación física _____ | 42 |
| Tabla 3.4-1. Humedad del carbón activado por el H ₃ PO ₄ al 20% _____ | 42 |
| Tabla 3.4-2. Humedad del carbón activado por el H ₃ PO ₄ al 40% _____ | 43 |
| Tabla 3.4-3. Humedad del carbón vegetal _____ | 43 |
| Tabla 3.4-4. Humedad del carbón por activación física _____ | 43 |
| Tabla 3.5-1. Potencial de hidrógeno del carbón activado _____ | 44 |
| Tabla 3.6-1. Masa de carbón activado en determinado volumen_____ | 44 |
| Tabla 3.6-2. Densidad aparente del carbón activado obtenido _____ | 44 |
| Tabla 3.7-1. Cenizas totales del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20% _____ | 45 |
| Tabla 3.7-2. Cenizas totales del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40% _____ | 45 |
| Tabla 3.7-3. Cenizas totales del carbón vegetal _____ | 45 |
| Tabla 3.7-4. Cenizas totales del carbón por activación física_____ | 46 |
| Tabla 3.8-1. Normalidad real de las soluciones para el número de yodo_____ | 46 |
| Tabla 3.8-2. Número de yodo del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20% _____ | 46 |
| Tabla 3.8-3. Número de yodo del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40% _____ | 47 |
| Tabla 3.8-4. Número de yodo del carbón vegetal _____ | 47 |
| Tabla 3.8-5. Número de yodo del carbón por activación física _____ | 47 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3.9-1. Datos generales de la isoterma de Langmuir _____ | 48 |
| Tabla 3.9-2. Datos del proceso de adsorción del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20% _____ | 48 |
| Tabla 3.9-3. Datos del proceso de adsorción del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40% _____ | 49 |
| Tabla 3.9-4. Datos del proceso de adsorción del carbón comercial _____ | 50 |
| Tabla 3.9-5. Área superficial resultante para cada tipo de carbón _____ | 51 |
| Tabla 3.10-1. Datos generales de la adsorción de azul de metileno _____ | 52 |
| Tabla 3.10-2. Datos de la recta de calibración de azul de metileno _____ | 52 |
| Tabla 3.10-3. Capacidad adsortiva del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20% _____ | 53 |
| Tabla 3.10-4. Capacidad adsortiva del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40% _____ | 54 |
| Tabla 3.10-5. Capacidad adsortiva del carbón activado comercial _____ | 56 |
| Tabla 3.11-1. Resultados generales de los carbones activados _____ | 57 |

INTRODUCCIÓN

El carbón activado es la denominación al grupo de carbones porosos en su superficie, los primeros carbones activados fueron hechos de madera carbonizada (carbón vegetal) utilizados para aplicaciones médicas y posteriormente para eliminar malos olores y sabores en el agua. La primera aplicación documentada para la mitigación de los olores emanados por la gangrena fue en el año 1793, llevando a cabo la primera aplicación industrial como decolorante en la industria de azúcar en 1794. (Sevilla 2009)

En 1901 se patentaron los dos diferentes métodos para producir carbón activado, por activación física o térmica y activación química, que hasta la actualidad se obtiene a partir de materiales con alto contenido de carbono como madera, cáscaras, semillas, entre otros.

Actualmente el carbón activado es ampliamente utilizado en industrias ya que tiene varias aplicaciones como adsorción de vapores y líquidos, siendo la adsorción de compuestos líquidos la de mayor consumo de carbón activado hasta un 80%. (Luna, y otros 2007)

La industria ecuatoriana no se ha centrado en la producción de carbones activados a pesar que este material tiene múltiples aplicaciones, se ha encontrado información que indica que en el año 1997 se puso en marcha Ekokarbones S.A., una planta productora de carbones activados granulados, cuya capacidad es de 800 toneladas anuales, la cual produce carbón activado por activación física a partir de la estopa del coco, ubicada en Quito-Ecuador (Soto 2007), por lo cual la producción local no satisface la demanda de la cantidad consumida ya que las importaciones del carbón activado en el Ecuador han sido de 706,51 toneladas promedio en los últimos diez años. (MAGAP s.f.)

Por otra parte, Ecuador es un país destacado por su gran capacidad de producción de café de varios tipos como el arábigo lavado, arábigo natural y

robusta, que por su calidad, permiten que el país sea uno de los mejores productores en América del Sur y un gran exportador de este fruto.

Solubles Instantáneos C.A. (S.I.C.A.) es una empresa del mercado mundial que produce variedad de café instantáneo, fundada en Guayaquil-Ecuador, en 1960 y dirigida por el señor Jorge Salcedo, con una inversión que a la tasa de cambio correspondía a USD 214000. Fue una de las primeras compañías de América en instalar y operar una planta de café instantáneo del tipo “Freeze Dried”, método más eficaz de producción de café instantáneo de alta calidad. Esta compañía se encuentra en la Av. Carlos Julio Arosemena Km. 2, tiene un área de 30000 m² y exporta a países como Japón, Taiwán, Holanda, Polonia, Rusia, Inglaterra, Estados Unidos, Francia, Perú, Turquía, entre otros. (Solubles Instantáneos C.A. s.f.)

Durante el proceso de elaboración de café, el grano del mismo es sometido a diversas operaciones desde su recolección hasta el producto final. Este procedimiento denominado “Beneficio del café” produce algunos desechos, que corresponden el 92,5% del peso del grano, empleándose el 7,5% restante como bebida. (McMullan 2001)

Generalmente, el grano de café representa la parte productiva para el procesamiento del extracto de café, éste constituye el 20% del volumen total del fruto, siendo el 80% desechos. Los subproductos generados en el proceso de extracción del café son la pulpa, el mucílago, las aguas de despulpado, el bagazo y las aguas de lavado, los cuales representan una amenaza para el ambiente si no se manejan de una manera inteligente para otros intereses, empleando los principios de producción más limpia. (S. García 2006)

El bagazo de café es un desecho orgánico con alto contenido de energía por lo que se puede convertir en una fuente potencial para la producción de un material orgánico, como lo es el carbón activado. Se considera un residuo de muy difícil disposición final, ya que posee un gran volumen que si no se trata y se conserva durante un tiempo prolongado, expulsa olores desagradables y se transforma en

un medio óptimo para la proliferación de moscas y otras plagas. Tradicionalmente, la pulpa y demás subproductos del café que resultan del proceso de Beneficio han sido dispuestos en las fuentes de agua, lo que ocasiona un aumento significativo de la demanda bioquímica de oxígeno (DQO), aumento de la carga de sólidos totales, incremento de la temperatura del agua, producción de olores y calidad visual afectada. (V.Dietrich 1999)

Durante el proceso de café instantáneo que produce S.I.C.A., se selecciona la materia prima, café arábica y robusta, éstas son llevadas a un procedimiento de limpieza, ventilación y tostado del grano a la temperatura requerida para el desarrollo del sabor, acidez y aroma. Luego que el café está tostado, es molido y llevado a la extracción, donde el extracto es pasado a través de una centrífuga para eliminar sedimentos. Posteriormente se pasa por un evaporador para aumentar su concentración y pasar cierta parte del extracto al secador por aspersion para obtener el café "Spray Dried", mientras que la otra parte pasa a la cámara de liofilización para producir el café "Freeze Dried". (Solubles Instantáneos C.A. s.f.)

En el momento que se lleva a cabo la extracción del café, los granos molidos salen húmedos y procesados, quedando como bagazo de este proceso, por tanto, esto se convierte en un desecho agroindustrial de S.I.C.A., el cual es dispuesto a la empresa Puerto Limpio, encargada de retirar el desecho y llevarlo al depósito de basura.

Solubles Instantáneos C.A. utiliza 7500 toneladas de café en grano produciendo 2700 toneladas de café soluble con un rendimiento alcanzado del 36%. Durante el proceso de tostado se considera una pérdida del 17%, produciendo 6225 toneladas de café tostado, por lo tanto, la cantidad de bagazo anual disponible en base seca es igual a:

$$6225 \text{ Ton} - 2700 \text{ Ton} = 3525 \text{ Ton de Bagazo/año}$$

Tomando en consideración 320 días laborales anuales la cantidad de bagazo diario es igual a 11 toneladas Bagazo/día (base seca) o 458 Kg de Bagazo/hora,

considerando un 50% de humedad en el Bagazo se tiene 916 Kg de Bagazo húmedo/hora. (Solubles Instantáneos C.A. s.f.)

De acuerdo a lo investigado, existen estudios en el que el carbón activado ha sido obtenido de muchas materias orgánicas, especialmente materias lignocelulósicas y sobre todo de subproductos agroindustriales que se han tomado como desechos, por ejemplo, la estopa de coco, cáscaras de arroz y pulpa del fruto del café. A pesar de estos estudios realizados, no se ha encontrado informes o proyectos en el que el carbón activado se obtenga a partir del grano molido procesado del café o también llamado bagazo o borra del café. Entonces, si ya existe una opción de producir carbón activado a partir de la pulpa de café y esta industria cafetalera desecha el bagazo de café, ¿Será apropiado obtener carbón activado a partir del bagazo de café de la industria Solubles Instantáneos C.A. para reutilizar este desecho orgánico?

Se puede contestar esta interrogante si se establecen los usos del carbón activado, el cual posee numerosas aplicaciones en diversos campos de la industria, lo que lo convierte en un producto muy importante en el mercado mundial. La producción del mismo está regulada por los países desarrollados como Holanda, Reino Unido, Japón, Alemania y los Estados Unidos. Éste es empleado en la medicina, el tratamiento de aguas, en la eliminación de olores y sabores, como agente decolorante en la industria del azúcar, en máscaras para la adsorción de gases tóxicos, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes, disolventes o compuestos orgánicos tóxicos de las aguas, en la purificación del aire, en la industria química, en la industria farmacéutica, en la purificación de gases, en la implementación de supercapacitores, en la decoloración de vinos, zumos y vinagres, en la eliminación de cloro libre en agua potable, en la eliminación de ozono en agua potable, en la eliminación de geosminas, antracitas, simazinas, y en la eliminación de dioxinas, debido a las múltiples aplicaciones del carbón activado. (Fernández, y otros 2006) (Sevilla 2009)

El carbón activado puede ser obtenido a partir de numerosas materias primas carbonizables, tales como: carbón mineral, cáscara de coco, madera, lignito, entre otros. Las propiedades características del carbón activado que se obtienen, dependen de la fuente de materia prima usada para producirlo. De tal forma, es muy importante buscar nuevas fuentes de obtención de carbón que proporcionen una demanda sostenible de este producto mundialmente. (Prías, y otros 2011)

Por otro lado, la industria del café es uno de los principales medios de desarrollo de la región cafetalera, pero también es cierto que esta actividad trae consigo una problemática ambiental generada por el manejo inadecuado de los residuos generados. El vertimiento de estos desechos a las fuentes de agua, el esparcimiento de los mismos en los terrenos cercanos de las zonas de cultivo, y la deposición en botaderos a cielo abierto es la alternativa de manejo que se implementa actualmente. El uso de los residuos como abono orgánico es una medida que se aplica en una baja proporción debido al poco conocimiento que se tiene en el proceso de compostaje que se debe aplicar, y porque este material es aún considerado a pesar de los múltiples estudios para su utilización como un desecho de difícil manejo. (Manejo integral de residuos sólidos y peligrosos 1997)

Aproximadamente el 60% de bagazo o borra de café son depositadas en los rellenos sanitarios anualmente en diversos países, si se considera esto se puede establecer que se está desperdiciando su contenido celulósico. Por consiguiente, existen diversos países que han desarrollado proyectos de eco-eficiencia energéticos empleando este residuo, permitiendo el ahorro de combustible y mejorando la sostenibilidad económica. Por ejemplo, las industrias cafetaleras someten a la borra a una prensa para extraer la humedad y posteriormente lo secan para emplearlo como combustible en la caldera. (Díaz 2009)

El uso de adsorbentes a partir de carbón activado está incrementado debido a la implementación de las reglamentaciones ambientales, que han fomentado el tratamiento del agua y el aire por medio de carbón activado. El carbón es considerado un adsorbente general por lo cual se han desarrollado aplicaciones

que satisfacen la demanda de la tecnología actual como en uso de tamices moleculares de carbón y en fibra textil. (Díaz 2009)

Por medio de este proyecto se propone la recuperación de un residuo agroindustrial, generado de la extracción del café soluble, en la producción de carbón activado. Así mismo, el producto obtenido por medio de la activación física y química será empleado en la adsorción del colorante azul de metileno en solución acuosa, de esta manera se evaluará la capacidad de adsorción del carbón activo, para así proponer al bagazo de café como un precursor para la elaboración de carbón activado. El uso de estos residuos para la fabricación del carbón activado reducirá el impacto negativo generado hacia el medio ambiente.

La hipótesis de este proyecto es: La producción del carbón activado disminuirá la cantidad del residuo agroindustrial proveniente de la extracción del café.

El objetivo general de este proyecto es producir carbón activado a partir del bagazo de café para aprovechamiento del residuo de una agroindustria local, siendo los objetivos específicos: 1) Emplear las metodologías de activación química y física para la obtención de carbón activado; 2) Caracterizar los productos obtenidos de acuerdo a la NTE INEN 1991:2013; 3) Comparar la capacidad de adsorción entre el carbón activado obtenido y comercial, utilizando azul de metileno y 4) Seleccionar el método adecuado de obtención de carbón activado de acuerdo a los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Definición del carbón activado

El carbón activado es un mineral que se encuentra conformado por carbono, por lo cual se lo considera de origen orgánico. Se caracteriza por ser altamente poroso, con gran cantidad de agujeros, con una superficie llena de microporos del tamaño de nanómetros. (V. K. García 2011)

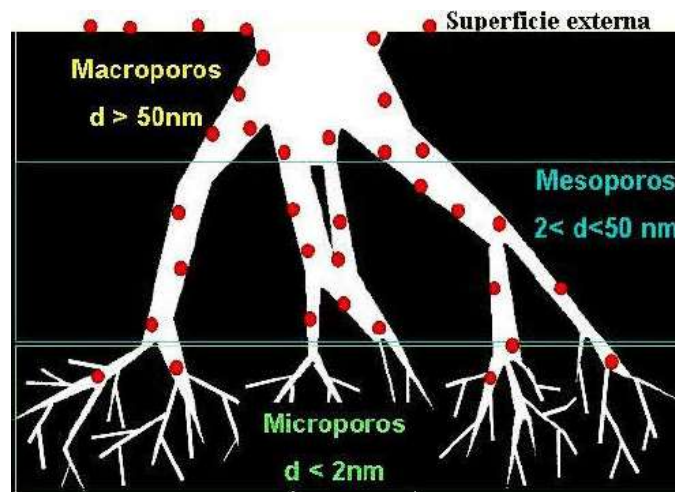


Figura 1.1-1. Tipos de poros presentes en el carbón activado

Fuente: Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales

1.2. Composición química del carbón activado

El carbón activado está compuesto químicamente de un 70 - 80% de carbono y 5 -10% de cenizas. Su composición es prácticamente pura, tal como la del grafito, el negro de humo y el diamante; estos tienen la propiedad de adsorber, la cual consiste en un proceso fisicoquímico en el que el sólido (adsorbente) retiene en su superficie a ciertas moléculas denominadas adsorbatos y que se encuentran en un líquido o gas. (Sevilla 2009)

1.3. Estructura física del carbón activado

Posee una estructura microcristalina similar a la del grafito, ver tabla 1.3-1, lo que permite una distribución de tamaño de poro bien definida. De esta forma, se reconocen tres tipos de poros de acuerdo a su radio: macroporos ($r > 25$ nm), mesoporos ($25 > r > 1$ nm) y microporos ($r < 1$ nm). (V. K. García 2011)

Tabla 1.3-1. Propiedades físicas y químicas del carbón activado

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

Fuente: Ficha de datos de seguridad Carbon activo, polvo, analytical grade

1.4. Tamaño de poros

El carbón activado posee diversos tamaños de poros, los cuales se dividen con respecto a su función, como poros de adsorción y poros de transporte. (Sevilla 2009)

Los poros de adsorción están formados por espacios entre placas graníticas con una división entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que se retiene. Estas placas se encuentran muy cerca, ejerciendo atracción sobre el adsorbato para retenerlo en su superficie.

Los poros de transporte poseen un rango amplio de tamaño (0,1 mm). En estos poros, sólo una placa se encuentra ejerciendo atracción sobre el adsorbato, por lo cual se ejerce menos fuerza. De tal forma, que estos poros son medios de difusión por los cuales transita la molécula hasta los poros de adsorción en los que existe mayor atracción. (Sevilla 2009)

1.5. Tipos de carbón activado

1.5.1. Pulverizado

Los carbones activados pulverizados tienen una gran área superficial y una estructura porosa bien definida, en la cual predominan los medios y macroporos. Éste se añade al fluido a tratar, por lo cual posteriormente se remueve por filtración y/o sedimentación luego de estar en contacto un determinado tiempo. El contacto íntimo que se produce con el fluido es debido al tamaño de sus partículas, así como sus propiedades de humedad y sedimentación. (Lazo 2015)

1.5.2. Granulado

El carbón activo granular es producido en base a materias primas rígidas, lo que le permite al carbón adquirir la dureza requerida para prevenir las pérdidas por fricción y manipulación. Tienen una elevada área superficial, que le confiere una gran capacidad de adsorción dependiendo de su aplicación. Por lo general, son empleados en columnas de lechos fijos o móviles para tratar los fluidos. (Lazo 2015)



Figura 1.5-1. Tipos de carbón activado

a) carbón activado granular, b) carbón activado en polvo

Fuente: Generalidades del carbón activado

Tabla 1.5.2-1. Ventajas y desventajas dependiendo del tipo de carbón activado

| Tipo de carbón | Ventajas | Desventajas |
|----------------|---|---|
| Granulado | Es utilizado para remover entre el 80-98% de la contaminación, por lo tanto tiene mayor cinética de remoción que el carbón activado en polvo. Posee la propiedad de regeneración. | Para la adsorción adecuada, depende de la variación en la concentración del contaminante. Es posible que se desarrollen microorganismos en los lechos de carbón activado. Requiere de instalaciones y estructuras complejas de elevado costo inicial. |
| Pulverizado | Se puede elegir la dosis a emplear de acuerdo al contaminante a eliminar. Su instalación es sencilla y similar a otros productos que se utilizan en la depuración de aguas residuales. Tiene mayor disponibilidad | La dosis de carbón depende de la concentración de equilibrio del contaminante en el agua. Está relacionada con la pendiente de la isoterma y el porcentaje de remoción del contaminante, Es posible que se desarrollen microorganismos en los lechos de carbón activado. Su regeneración es más compleja. |

Fuente: Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante.

En la tabla 1.5.2-1, se describen ventajas y desventajas de los tipos de carbones activados, los cuales, conforme a su característica son utilizados en diferentes ámbitos, ya que difieren de la cinética y capacidad de adsorción. (Navarrete, Quijano y Vélez 2014)

1.6. El café como materia prima de producción de carbón activado

El café verde antes de ser procesado tiene agua, proteínas, cafeína, lípidos, diversos carbohidratos y ácidos, trigonelina y minerales. El café tostado posee en su composición azúcares reductores y caramelizados, hemicelulosa, fibra, proteínas, ácidos no volátiles, cafeína, lípidos, trigonelina y cenizas, los principales elementos que las componen son potasio, fósforo y magnesio. La tabla 1.6-1 expone los

principales componentes químicos en ambos cafés de las dos especies más importantes comercialmente. (Pérez 2011)

Tabla 1.6-1. Datos de composición química (%b.s.) para café verde y tostado

| Componente | Arábica | | Robusta | |
|-------------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | Café verde | Café tostado | Café verde | Café tostado |
| Minerales | 3,0-4,2 | 3,5-4,5 | 4,0-4,5 | 4,6-5,0 |
| Cafeína | 0,9-1,2 | 1,0 | 1,6-2,4 | 2,0 |
| Trigonelina | 1,0-1,2 | 0,5-1,0 | 0,6-0,75 | 0,3-0,6 |
| Lípidos | 12,0-18,0 | 14,5-20 | 9,0-13,0 | 11,0-16,0 |
| Ácido clorogénico | 5,5-8,0 | 1,2-2,3 | 7,0-10,0 | 3,9-4,6 |
| Ácidos alifáticos | 1,5-2,0 | 1,0-1,5 | 1,5-2,0 | 1,0-1,5 |
| Oligosacáridos | 6,0-8,0 | 0-3,5 | 5,0-7,0 | 0-3,5 |
| Polisacáridos | 50,5-55,0 | 24,0-39,0 | 37,4-47,0 | - |
| Aminoácidos | 2,0 | 0 | 2,0 | 0 |
| Proteínas | 11,0-13,0 | 12,0-15,0 | 11,0-13,0 | 13,0-13,5 |

Fuente: Producción de café (Coffea arábica L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades.

1.6.1. Bagazo de café

Durante el proceso de cultivo e industrialización del café se producen grandes cantidades de residuos sólidos, ya que sólo se emplea el 7,5% de su peso fresco en la elaboración de la bebida, lo restante se transforma en residuo. Los subproductos del café son la pulpa, el mucílago, el cisco o pergamino y el bagazo o borra.

La tabla 1.6.1-2 muestra la composición del bagazo de café, que presenta por lo general una humedad del 60% como resultado de la extracción del café. El nivel de humedad del bagazo de café debe ser reducido a rango entre 10% - 5% para que se realice la carbonización en la activación física y para que el activador tenga mayor contacto con la estructura del bagazo de café en la activación química. Presenta un color café oscuro cuando tiene una humedad del 60% y café claro cuando la humedad se ha reducido entre 10% - 5%. El tratamiento de secado antes de la producción del carbón es importante ya que de este proceso depende el rendimiento del mismo. (Pita 2012)

Tabla 1.6.1-1. Descripción y empleo de los subproductos del café

| Residuo | Descripción | Porcentaje de uso |
|-----------------------------|---|---|
| Pulpa de café | Empleada como abono orgánico, se conserva cubierta 3 meses. Es aprovechada como fuente de humus, nitrógeno y carbono, sustituyendo los fertilizantes. | + 95% empleada como compuesto orgánico. |
| Mucílago | Se dificulta su empleo ya que éste queda en malas condiciones por la fermentación del grano. | <10% es reciclado, lo demás es dispuesto en los ríos. |
| Cisco o pergamino | Es quemado en hornos para llevar a cabo la torrefacción y tostado. | 100% |
| Volátiles y líquidos | Son productos de la tosti3n, en la cual se libera vapor, gas carb3nico y aceites del caf3. | Se pierden estos residuos que se producen en peque1a escala. |
| Borra | Es el residuo final, resultante de la torrefacci3n del grano de caf3. Suele ser incinerada para la obtenci3n de energ3a para algunas industrias o dispuesta en rellenos sanitarios y empleada minoritariamente como fertilizante orgánico y enmienda de suelos. | 13% en calderas de industrias. 27% en incineraci3n indefinida 60% en rellenos sanitarios. |

Fuente: Dise1o de productos celul3sicos para el consumo de caf3 en bebida a partir de la Borra del caf3.

En la tabla 1.6.1-1 se describe ciertas utilizaciones de los derivados o subproductos del fruto del caf3, donde la borra o bagazo de caf3 es mayormente utilizada para rellenos sanitarios.

Tabla 1.6.1-2. Análisis físico-químico del bagazo del café

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

Fuente: Tesis de investigación: Obtención de jabón a partir de la extracción del aceite de bagazo de café



Figura 1.6-1. Bagazo o borra de café

Fuente: Cultivo de hongos medicinales en residuos agrícolas de la zona cafetera

1.7. Métodos de producción de carbón activado

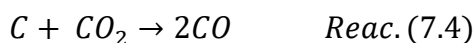
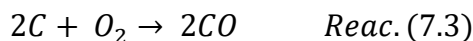
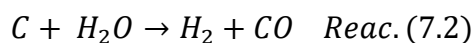
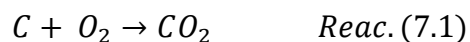
Los carbones activados son elaborados a base de materiales orgánicos ya que son ricos en carbón, en especial el carbón mineral, madera, huesos, cáscaras de frutas, aceites pesados, celulosa, azúcar, aserrín, granos de maíz, entre otros. La elección de la materia prima está relacionada con su disponibilidad, precio, pureza y la probable aplicación de este producto. Existen dos procesos de fabricación: la activación física y la activación química. (Pedrozo, y otros 2011)

1.7.1. Activación física

La activación física se ejecuta en dos fases: la carbonización de la materia prima y la gasificación controlada del carbonizado, las cuales se llevan a cabo en hornos rotatorios fabricados en acero inoxidable y materiales refractarios para resistir temperaturas elevadas. La carbonización es la modificación del precursor a carbón, donde se elimina el hidrógeno y el oxígeno, para dar origen a un esqueleto carbonoso con una conformación porosa. Esta etapa se efectúa en ausencia de oxígeno a temperaturas menores a 700°C. (Soto 2007)

Durante la activación, el sólido es expuesto a una atmósfera oxidante (oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono) a temperaturas entre 800°C y 1000°C, lo cual elimina los compuestos volátiles, incrementando el volumen de poros y área superficial. (Soto 2007)

La activación se puede dar en un proceso independiente a la carbonización o efectuarse a continuación de ésta. Los agentes activantes que se suelen emplear son: oxígeno (escasamente en la industria), vapor de agua y dióxido de carbono. Los cuales producen las siguientes reacciones químicas que eliminan los átomos de carbono lo que da lugar a la porosidad. (León 2012)



1.7.2. Activación química

La activación química se ejecuta en una sola fase, donde la materia prima se pone en contacto con un activador químico, estos pueden ser ácido fosfórico, cloruro de zinc, ácido sulfúrico, entre otros y se calienta a temperaturas entre 400°C y 700°C procurando una

atmósfera inerte. Los activadores químicos que se emplean son capaces de reducir la formación de materiales volátiles y alquitranes, elevando el rendimiento en carbono y dependiendo del activador químico utilizado, el carbón activado tendrá mayor o menor cantidad y volumen de poros. El carbón activado obtenido se lava para eliminar el remanente del activador químico empleado. Además, estos carbones se pueden activar físicamente por gasificación parcial con dióxido de carbono o vapor de agua y así producir carbones activados con mayores áreas superficiales. (Soto 2007)

La activación con ácido fosfórico consta de las siguientes etapas:

- Molienda y clasificación de la materia prima
- Mezcla del precursor con ácido fosfórico
- Tratamiento térmico a una temperatura entre 100-200°C durante 1 hora, posteriormente se realiza un nuevo tratamiento térmico entre 400-500°C durante 1 hora.
- Lavado, secado y segregación del carbón activado. (León 2012)

1.8. Aplicaciones del carbón activado

Las principales aplicaciones del carbón activado son:

- Se emplea en la potabilización de agua, reteniendo los plaguicidas, grasas, aceites, detergentes, subproductos de la desinfección, toxinas y compuestos que producen color.
- Se utiliza en la purificación de aire, como es el caso de los mecanismos para recircular el aire en espacios públicos, lugares donde se aplican solventes y plantas de tratamiento de agua.
- Se considera un antídoto universal, ya que es empleado en el tratamiento de individuos con intoxicaciones agudas.
- Se usa en la refinación del azúcar para retener las proteínas que proporcionan el color al jugo de caña; y así impedir que el azúcar fermente y se desperdicie.
- Es útil en la decoloración de aceites vegetales, glucosa de maíz y otros líquidos de la industria alimenticia.

- Se emplea en la recuperación de oro, el cual se separa de los minerales disolviéndolo en cianuro de sodio para luego ser adsorbido por el carbón activado. (Sevilla 2009)

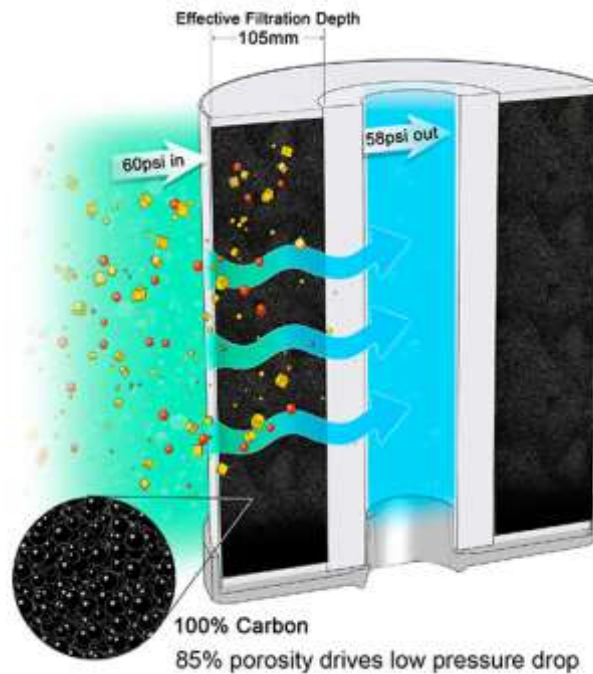


Figura 1.8-1. Filtro de carbón activado

Fuente: Cultivo de hongos medicinales en residuos agrícolas de la zona cafetera

1.8.1. El carbón activado en el tratamiento de aguas residuales

El carbón activado es un sólido que posee dos características que lo han hecho valioso en el tratamiento de aguas. La primera consiste en que retiene todos los contaminantes orgánicos en su superficie, siendo capaz de proporcionar agua prácticamente exenta de estos compuestos. La segunda, es que elimina el cloro libre residual que no reaccionó luego de realizar una acción desinfectante. Por tal motivo, la mayoría de las industrias que demandan agua potable emplean carbón activo como uno de los procesos primordiales de purificación. Actualmente se ha descubierto ya no existe río, lago ni pozo cuyo agua esté libre de contaminantes orgánicos sintéticos. Por otro lado, han surgido pruebas de que estos compuestos, aunque se encuentren en muy bajas concentraciones, a largo plazo,

provocan graves trastornos a la salud, tales como: afectaciones al sistema inmunológico y reproductivo, cáncer, entre otros.

El carbón activo en el tratamiento de aguas residuales elimina las elevadas concentraciones de agentes oxidantes como cloro y ozono, y de los derivados cancerígenos, trihalometanos. Éste actúa adsorbiendo estos compuestos o los cataliza a formas reducidas inocuas. (Sevilla 2009)

1.9. Regeneración del carbón activado

La economía de la aplicación del carbón activado está influenciada por la disponibilidad de un medio eficaz para su regeneración y recuperación, cuando su propiedad de adsorción está saturada. El proceso de regeneración del carbón activo granular consiste en la oxidación de la materia orgánica y su remoción de la superficie del carbón en un horno. Este procedimiento destruye entre 5-10% del carbón, por lo que se debe reemplazar por carbón nuevo. Es importante recalcar que el carbón regenerado posee un potencial de adsorción levemente inferior al carbón virgen. (Sevilla 2009)

1.10. Adsorción

La adsorción es una operación unitaria que consiste en la separación de un componente disuelto en una corriente, gas o líquida, por retención sobre un sólido. Los sólidos adsorbentes requieren de grandes áreas superficiales y una estructura porosa para que el adsorbato ingrese a la superficie.

La propiedad de adsorción de los carbones activados está determinada por su estructura porosa y por su naturaleza química, ya que su estructura posee pequeñas cantidades de heteroátomos como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno. Esto permite que el carbón activado retenga las sustancias polares sobre su superficie, ya que los átomos de carbono ubicados en los bordes de los planos presentan una alta

actividad disponible, ya que no están saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres. (Parejo, y otros 2015)

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

El área superficial del carbón activado está entre 600 y 1200 m²/g, la cual se encuentra en el interior de los poros. Por lo tanto, para que una molécula sea adsorbida, ésta debe migrar a los sitios de adsorción de la partícula.

Por lo general, las moléculas polares son adsorbidas con menos rapidez que los compuestos no polares. Por consiguiente, los iones inorgánicos no se adsorben bien si no hay una interacción química específica con un grupo funcional sobre la superficie del carbón o por intercambio de iones. Un factor que determina la velocidad y el grado de adsorción es el tamaño molecular ya que las moléculas grandes no pueden atravesar algunos de los poros pequeños. (Jenkins 1994)

El efecto del pH sobre la adsorción se atribuye a su efecto en la solubilidad del soluto. Es decir, un compuesto de pH 6 o menos es menos soluble en agua que un compuesto de pH 8 o más, donde presenta influencia aniónica. Las especies cargadas poseen una afinidad mayor por el agua y por ende menor tendencia a almacenarse sobre la superficie del carbón activado. Adicionalmente, la carga negativa de la superficie del carbón disminuye al disminuir el pH, un factor que incide en la efectividad con que el carbón adsorbe las especies cargadas, en especial los aniones. (Jenkins 1994)

Los datos de equilibrio de adsorción se analizan mediante las isothermas de Langmuir o Freundlich. En el año 1916, Langmuir desarrolló un modelo sencillo para lograr estimar el grado de adsorción de un gas sobre una superficie relacionado con la presión del fluido. El modelo de Langmuir supone:

1. El adsorbato forma una capa monomolecular sobre la superficie.
2. Todos los sitios de la superficie son equivalentes.
3. No existe interacción entre las moléculas adsorbidas.
4. Las moléculas adsorbidas no se mueven sobre la superficie (Tubert y Talanquer 1995).

El modelo de Langmuir se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{x}{m} = \frac{(x/m)_{\text{máx}} b C_{\text{eq}}}{1 + b C_{\text{eq}}} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

donde

(x/m) = moles de soluto adsorbidas/g adsorbente

$(x/m)_{\text{máx}}$ = valor máximo de x/m (constante para cualquier sistema)

b = constante (relacionada a la energía de adsorción)

C_{eq} = concentración de soluto de la solución en equilibrio (moles/L)

Esta ecuación se puede expresar de forma lineal:

$$\frac{1}{x/m} = \frac{1}{(x/m)_{\text{máx}} b C_{\text{eq}}} + \frac{1}{(x/m)_{\text{máx}}} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

La cual representa un modelo útil para presentar los datos de adsorción. (Jenkins 1994)

1.10.1. Adsorción física

Es el mecanismo más común, en el cual no hay intercambio de electrones entre el adsorbente y adsorbato, por lo tanto este procedimiento es reversible ya que se conserva la individualidad del sólido y del adsorbato (El carbón activado y sus propiedades s.f.). Las fuerzas intermoleculares que intervienen en este mecanismo son de tipo dispersas o interacciones de van der

Waals, las cuales liberan una energía de la magnitud de la entalpía de condensación. Las velocidades de adsorción de esta operación son parcialmente elevadas ya que no se deben romper grandes niveles de energía de activación. Por otro lado, se requiere un consumo energético inferior para regenerar este tipo de adsorbente, puesto que las fuerzas intermoleculares son débiles, ver tabla 1.10.2-1 (Vilarrasa 2014).

1.10.2. Adsorción química

Es un mecanismo irreversible ya que existen modificaciones en la estructura química del adsorbato y del adsorbente, se establecen enlaces químicos sobre los centros activos del sólido, por lo cual se pierde la individualidad del sólido y del adsorbato, tabla 1.10.2-1 (El carbón activado y sus propiedades s.f.).

Tabla 1.10.2-1. Diferencias entre adsorción química y física

| Adsorción física | Adsorción química |
|---|--|
| Proceso exotérmico | Valores de entalpía elevados similares a los liberados en la formación de enlaces químicos |
| No específica | Altamente específica |
| Formación de mono o multicapa | Formación de monocapa |
| Sin disociación de las moléculas adsorbidas | Disociación de especies adsorbidas |
| Importante únicamente a bajas temperaturas | Posible en un amplio intervalo de temperaturas |
| Rápida, no activada, reversible | Específica, puede ser lenta e irreversible |
| No hay transferencia de electrones | Hay transferencia de electrones |

Fuente: Desarrollo de materiales para adsorción

1.11. Eficacia de adsorción del carbón activado

En el proceso de adsorción está relacionada con:

- El origen de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del carbón activado; además existen dos características fundamentales para determinar la aplicación del

carbón activado: su gran capacidad de remoción de sustancias y baja selectividad de contención.

- La gran capacidad de remoción de sustancias se basa en la considerable superficie interna que tiene, puesto que su porosidad y distribución de poros les adjudica dicha cualidad. Los microporos les confieren una gran superficie específica con la capacidad de retener sustancias, por otro lado los mesoporos y macroporos son fundamentales para retener moléculas grandes, como pueden ser coloides o colorantes. (Navarrete, Quijano y Vélez 2014)

1.12. Factores que influyen la adsorción del carbón activado

1.12.1. De compuestos presentes en agua

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

1.12.2. De compuestos presentes en aire

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

| | | |
|---|--------------------------|-------------------------|
| 1. Compuestos con muy alta probabilidad de ser eliminados por el carbón activo: | | |
| Alacloro | Desetilatraccina | Malation |
| Aldrin | Demeton-O | MCPA |
| Antraceno | Di-n-butiltalato | Mecoprop |
| Antraccina | 1,2-Diclorobenceno | Metazaclor |
| Azinfos-etil | 1,3-Diclorobenceno | 2-Metilbencenammina |
| Bentazona | 1,4-Diclorobenceno | Metilnaftaleno |
| Bifenil | 2,4-Diclorocresol | 2-Metilbutano |
| 2,2-bipiridina | 2,5-Diclorofenol | Monuron |
| Bis(2-etilexil)Ftalato | 3,6-Diclorofenol | Naftaleno |
| Bromacil | 2,4-Diclorofenoxi | Nitrobenceno |
| Bromodiclorometano | Dieldrin | m-Nitrofenol |
| p-Bromofenol | Dietiltalato | o-Nitrofenol |
| Butilbenceno | 2,4-Dinitrocresol | p-Nitrofenol |
| Hipoclorito de calcio | 2,4-Dinitrotolueno | Ozono |
| Carbofurano | 2,6-Dinitrotolueno | Paration |
| Cloro | Diuron | Pentaclorofenol |
| Dióxido de cloro | Endosulfan | Propacina |
| Clorobenceno | Endrin | Simaccina |
| 4-Cloro-2-nitrotolueno | Etilbenceno | Terbutrin |
| 2-Clorofenol | Hezaclorobenceno | Tetracloroetileno |
| Clorotolueno | Hezaclorobutadieno | Triclopir |
| Criseno | Hexano | 1,3,5-Trimetilbenceno |
| m-Cresol | Isodrin | m-Xileno |
| Cinaccina | Isooctano | o-Xileno |
| Diclohexano | Isoproturon | p-Xileno |
| DDT | Lindano | 2,4-Xilenol |
| Deisopropiltatraccina | Linuron | |
| 2. Compuestos con alta probabilidad de ser eliminados por el carbón activo: | | |
| Anilina | Dibromo-3-cloropropano | 1-Pentanol |
| Benceno | Dibromoclorometano | Fenol |
| Alcohol bencílico | 1,1-Dicloroetileno | Fenilalanina |
| Ácido benzoico | cis-1,2-Dicloroetileno | Ácido o-ftálico |
| Bis(2-cloroetil)éter | trans-1,2-Dicloroetileno | Estireno |
| Bromodiclorometano | 1,2-Dicloropropano | 1,1,2,2-Tetracloroetano |
| Bromoformo | Etileno | Tolueno |
| Tetracloruro de carbono | Hidroquinona | 1,1,1-Tricloroetano |
| 1-Cloropropano | Metil Isobutil Ketona | Tricloroetileno |
| Clorotoluron | 4-Metilbencenammina | Acetato de vinilo |

Figura 1.12-1. Compuestos con alta y muy alta probabilidad de ser adsorbidos por el carbón activado

Fuente: Manual del carbón activado

1.13. Caracterización del carbón

La fabricación de un producto conlleva a la evaluación de sus características a través del control de calidad, el cual se basa en métodos estandarizados.

1.13.1. Número de yodo

Constituye un parámetro fundamental que es empleado para identificar el desempeño del carbón activado. Permite cuantificar la porosidad por la adsorción del yodo en disolución, por lo tanto,

mientras más alto es el número de yodo, más alto es el grado de activación del carbón.

1.13.2. Densidad aparente

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

1.13.3. Tamaño de partícula

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

1.13.4. Contenido de cenizas

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

1.13.5. Tamaño del poro

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

1.13.6. pH

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

1.13.7. Contenido de humedad

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

1.14. Capacidad de adsorción

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

1.14.1. Adsorción de Azul de metileno

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

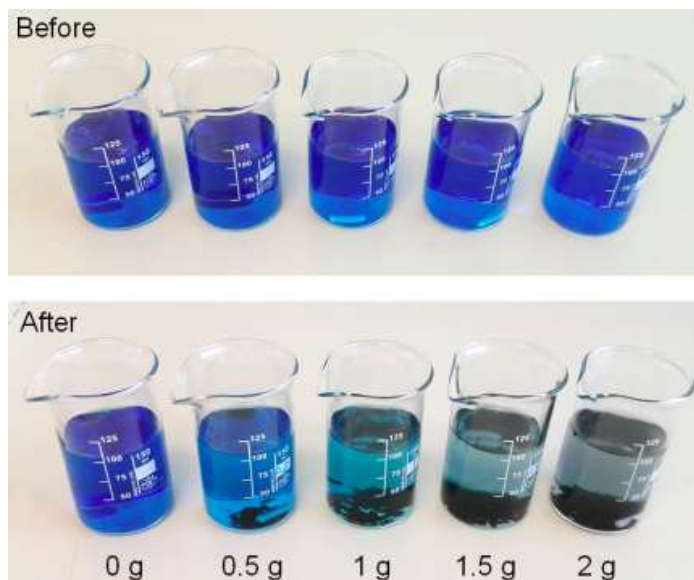


Figura 1.14.1-1. Soluciones de AM después de agitar con diferentes cantidades de carbón activado

Fuente: Chemistry Research for everyone

1.14.2. Isotherma de Langmuir

Representa uno de los modelos más descriptivos del proceso de adsorción, el cual relaciona la adsorción de una molécula en la superficie con la concentración de equilibrio del adsorbente a una temperatura constante. Además permite establecer el área superficial del adsorbente. (Navarrete, Quijano y Vélez 2014)

Tabla 1.14-1. Características de algunas materias primas del carbón activado

| Materia prima | Carbón (%) | Volátiles (%) | Densidad (g/cc) | Ceniza (%) | Textura del carbón activado | Aplicación |
|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------|---|-------------------------------------|
| Madera suave | 40-45 | 55-60 | 0,4-0,5 | 0,3-1,1 | Suave, gran volumen de poro | Adsorción en fase acuosa |
| Madera dura | 40-42 | 55-60 | 0,55-0,80 | 0.3-1.2 | Suave, gran volumen de poro | Adsorción en fase acuosa |
| Lignina | 35-40 | 58-60 | 0,3-0,4 | -- | Suave, gran volumen de poro | Adsorción en fase acuosa |
| Cáscara de nuez | 40-45 | 55-60 | 1,4 | 0,5-0,6 | Duro gran volumen de microporo | Adsorción en fase vapor |
| Lignito | 55-70 | 25-40 | 1,00-1,35 | 5-6 | Duro, reducido volumen de poro | Tratamientos de aguas residuales |
| Carbón suave | 65-80 | 20-30 | 1,25-1,50 | 2-12 | Medianamente duro, volumen de microporo mediano | Adsorción en fase líquida y gaseosa |
| Coque | 70-85 | 15-20 | 1,35 | 0,5-0,7 | Medianamente duro, volumen de poro mediano | Tratamientos de aguas residuales |
| Carbón semiduro | 70-75 | 10-15 | 1,45 | 5-15 | Duro gran volumen de poro | Adsorción en fase gaseosa |
| Carbón duro | 85-95 | 5-10 | 1,5-1,8 | 2-15 | Duro gran volumen de poro | Adsorción en fase gaseosa |

Fuente: Comportamiento de la cinética de adsorción del oro en carbón activado

La tabla 1.14-1 expone diferentes características del carbón activado a partir de diferentes materias primas con rangos de rendimiento de producción, así mismo muestra diferentes aplicaciones de acuerdo a su textura y volumen de los poros de cada carbón activado.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para la obtención del carbón activado, se recolectó 5,8 Kg. de bagazo de café generados de la industria Solubles Instantáneos C.A., ubicada en la Av. Carlos Julio Arosemena kilómetro 2 de la ciudad de Guayaquil.

2.1. Pretratamiento de la materia prima

La metodología aplicada en esta tesis se basa en el Manual del Carbón realizada en la ciudad de Sevilla. Antes de obtener el carbón activado, se eliminó la humedad de la materia prima para que se realice de mejor manera los dos tipos de procesos de obtención del carbón activado, por lo cual se utilizó el secador de bandejas del taller de la FIMCP a una temperatura de 100°C, posteriormente se trituró utilizando un mortero hasta tener una muestra homogénea visiblemente, utilizando 603 g de bagazo seco para la activación química al 20% y 40% (m/m) de H_3PO_4 y el resto para la activación física.

2.2. Activación química

A determinada cantidad del bagazo de café se le agregó el activador ácido fosfórico al 20% en relación 200 mL por cada 100 gramos de material, dejando reposar durante 24 horas para que el activador influya en el proceso. Luego del tiempo de contacto, se secó la mezcla con ayuda de la estufa a 150°C hasta observar una coloración café (aproximadamente por 3 horas), permitiendo que el agente químico activador sea más absorbido por la materia prima, reduciendo la formación de materia volátil y alquitranes. Posteriormente se carbonizó la muestra en la mufla a 400°C, durante 2 horas, el tiempo se cronometra desde el momento que se alcanza dicha temperatura, la carbonización se puede verificar tomando una pequeña porción de la muestra y ejerciendo una presión hasta escuchar un sonido de ruptura y observando que no exista manchas en la superficie, caso contrario,

dejar carbonizar por media hora más. Se dejó enfriar la muestra carbonizada para posteriormente ser lavada varias veces con agua destilada caliente (70-80°C), y con solución de NaOH 0,1 N hasta llevar a pH 6,5-7, eliminando restos del ácido fosfórico. Cada lavado se realizó durante 5 minutos, mezclando la solución con el carbón, agitando vigorosamente para simular una centrifugación y se filtró al vacío. El carbón activado se llevó a la estufa a 110°C durante 12 horas con el fin de remover la humedad presente, luego se pulverizó en un mortero, se pesó la masa final, se almacenó en frascos plásticos para su posterior análisis y se calculó el rendimiento de producción.

Para la activación química con de H_3PO_4 al 40% se realizó el mismo procedimiento pero con la carbonización en la mufla durante 4 horas.

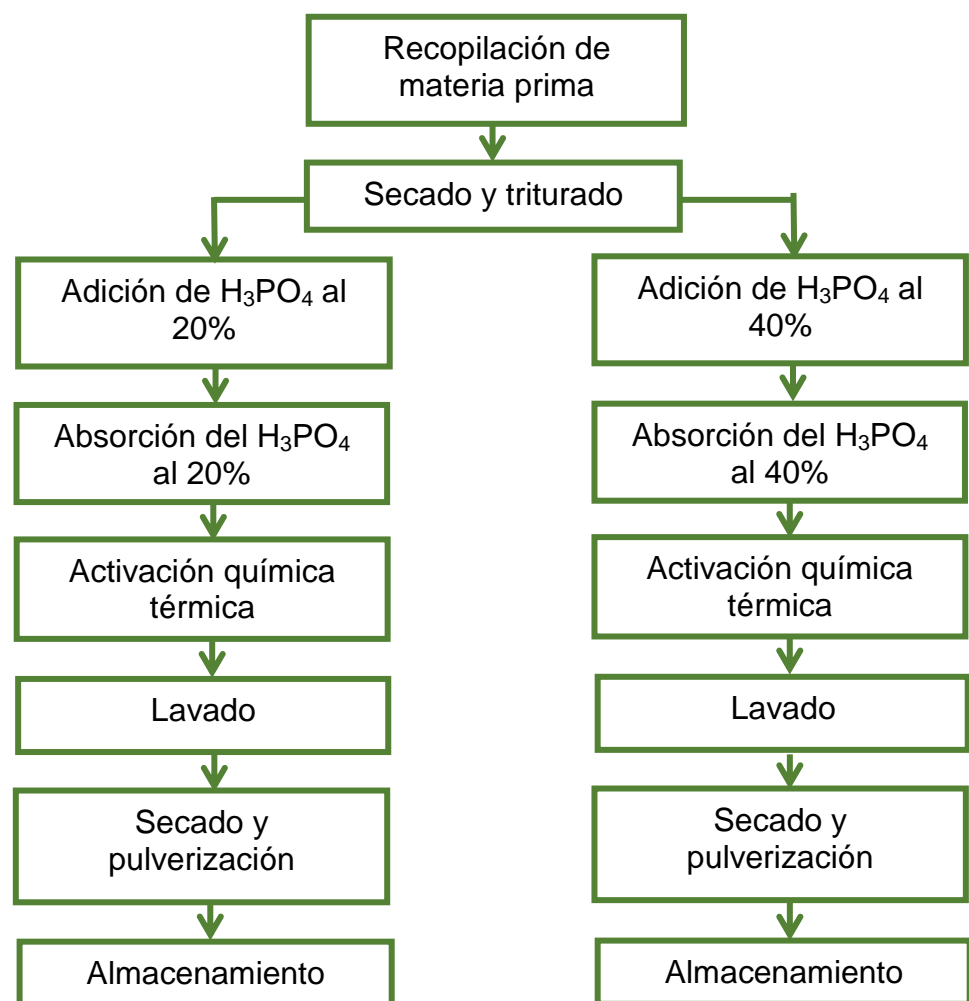


Figura 2.2-1. Diagrama del proceso de la activación química

2.3. Activación física

Para este procedimiento se tomó una determinada cantidad del bagazo seco triturándolo para mejorar la carbonización, posteriormente se colocó en un cilindro sellado simulando un horno pirolítico, a éste se lo introdujo en un horno con el fin de realizar la pirólisis a 500°C durante 1 hora, luego la muestra se pulverizó en un mortero y se almacenó. El material carbonoso obtenido se expuso a corrientes de un agente activador, vapor de agua, durante 1 hora con ayuda de planchas de calentamiento para realizar la activación física o térmica, luego el carbón activado se lo secó en una estufa a 110°C durante 12 horas con el fin de remover la humedad presente, se pulverizó en un mortero, se pesó la masa final, se almacenó en frascos plásticos para su posterior análisis y se calculó el rendimiento de producción.

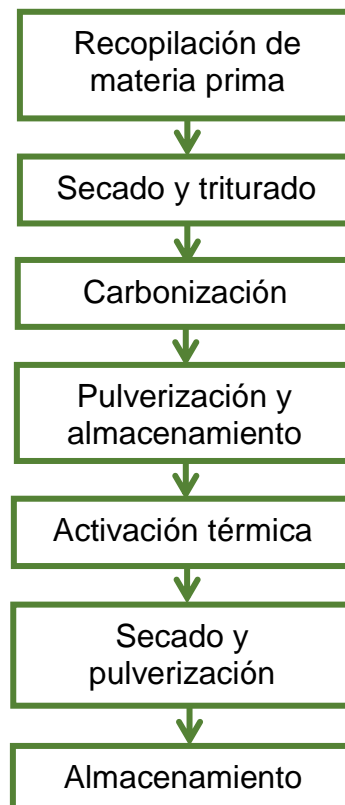


Figura 2.3-1. Diagrama del proceso de la activación física

2.4. Caracterización del carbón activado obtenido

A cada carbón activado obtenido se le realizaron pruebas que permiten caracterizarse entre ellos, estas pruebas fueron:

- Rendimiento
- Granulometría
- Contenido de humedad
- Densidad aparente
- Cenizas totales
- Número de Yodo
- pH

Algunas de estas pruebas se determinaron según las normas INEN 1985, 1986, 1987, 1988 y 1990 para obtener los requisitos del carbón activado según la norma INEN 1991.

2.4.1. Rendimiento

Se realizó mediante la razón del carbón activado obtenido y el peso inicial de bagazo de café en seco, mediante la siguiente fórmula:

$$\%Rendimiento = \frac{\text{Peso del carbón activado}}{\text{Peso del bagazo de café seco}} \times 100 \quad \text{Ec. (2.1)}$$

2.4.2. Granulometría

Se tomó el carbón activado obtenido siendo éste el peso inicial, el cual fue colocado en una columna de tamices de malla número 25, 40, 70, 80, 100 y 120 que junto con la ayuda del equipo de tamización, se realizó la agitación durante 1 hora verificando que todo el material se haya tamizado, reteniéndose en su respectivo tamiz y teniendo el carbón activado a un tamaño lo más uniforme posible, luego de la tamización se pesó la cantidad retenida en cada malla y se calculó el porcentaje retenido mediante la siguiente fórmula:

$$\% = \frac{\text{Peso del carbón activado retenido en el tamiz}}{\text{Peso inicial del carbón activado}} \times 100 \quad \text{Ec. (2.2)}$$

2.4.3. Contenido de humedad

Se tomaron 3 crisoles, a los cuales se los identificaron con siglas y lápiz, se secaron durante 2 horas en la estufa a 110°C, luego se los dejó enfriar en un desecador durante 1 hora e inmediatamente se los pesó con el fin de conocer el peso de los crisoles secos, se agregaron 2 g del carbón activado en cada crisol y se los secó en la estufa durante 1 hora a 130°C para posteriormente dejarlos enfriar en el desecador durante 1 hora, una vez que estuvieron frías las muestras se les tomó el peso y se calculó el contenido de humedad mediante la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{P_i - (P_f - P_c)}{P_i} \times 100 \quad Ec. (2.3)$$

Donde:

P_i = Peso inicial de carbón activado.

P_f = Peso crisol con carbón final.

P_c = Peso del crisol seco.

Por último se halló el promedio de contenido de humedad para cada carbón activado.

2.4.4. Densidad aparente

Este procedimiento se lo realizó 5 veces, basado en la norma INEN 1986:2013. La densidad aparente se expresa como la densidad del material en seco, es por ello que se tiene que realizar con anterioridad la prueba de contenido de humedad, una vez obtenido ese resultado se pesó una cantidad de muestra del carbón obtenido en un volumen dado de una probeta aforada (20 cm³). Se halló el promedio de peso y se calculó la densidad mediante la siguiente fórmula:

$$Densidad \ Aparente = \frac{Muestra \ en \ g \times (100 - \%Humedad)}{Volumen \ de \ muestra \ en \ cm^3 \times 100} \quad Ec. (2.4)$$

2.4.5. Cenizas Totales

Este procedimiento se basó en la norma INEN 1987:2013. Se pesó en una cápsula 10 g de carbón activado, dejando secar durante 3 horas a 150°C, luego se enfrió en el desecador, así mismo se calcinaron en dos crisoles limpios y rotulados con lápiz a 650°C durante 1 hora en la mufla, se enfriaron en el desecador y se los pesó, una vez que la muestra y los crisoles estuvieron secos y a temperatura ambiente, se agregó 1 g de carbón activado seco para cada crisol y se llevó a incineración (producción de cenizas) a 650°C durante 4 horas hasta que el peso fue constante, luego los crisoles con las cenizas fueron llevados a enfriamiento en el desecador para finalmente tomar su peso y calcular el contenido de cenizas totales expresadas en porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$\%C = \frac{\text{Peso de crisol con cenizas} - \text{Peso de crisol}}{\text{masa de la muestra}} \times 100 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

2.4.6. Número de Yodo

Este procedimiento se basó en la norma INEN 1988:2013. Se tomó 10 g de carbón activado y se pulverizó hasta que el 95% de éste pase por un tamiz N° 325 de abertura 45 µm, una vez pulverizada la muestra, se la secó en una estufa a 140°C por 2 horas, se añadió entre 1 a 1,6 g de esta muestra seca en 3 matraces Erlenmeyer de 250 mL agregando 10 mL de HCl a 5% (m/m) en cada matraz y agitando hasta que el carbón se haya humedecido, luego se llevaron las mezclas a ebullición manteniendo el hervor durante 30 segundos, se dejaron enfriar los matraces y su contenido a temperatura ambiente para posteriormente añadirles 100 mL de solución estándar de yodo 0,1 N y taparlos inmediatamente, agitándolos vigorosamente durante 30 segundos. Se filtraron las mezclas por separado con un papel filtro Whatman N°2V eliminando los primeros 25 mL. Por último, cada solución filtrada se tituló con una solución estándar de tiosulfato de sodio 0,1 N tomando una alícuota de 50 mL, hasta que el color amarillo sea claro, luego

se añadió aproximadamente 1 mL de solución de almidón y se siguió titulando hasta que el color amarillo verdoso desapareció. Una vez hecha la titulación se anotó el volumen de tiosulfato de sodio 0,1 N y se determinó el número de yodo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Número de yodo} = \frac{V}{m} \times f = \frac{A - (2,2 \times B \times V_t)}{m} \times f \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$A = N_1 \times 12693 \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$B = N_2 \times 126,93 \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$C = \frac{N_2 \times V_t}{50} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde:

V/m = mg de yodo adsorbidos por g de carbón activado

C = normalidad del filtrado residual (para calcular f)

f = factor de corrección (ver Anexo C)

Vt = volumen utilizado de tiosulfato de sodio 0,1 N, en mL

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

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

2.4.7. pH

Se pesó 4 gramos de carbón activado en un vaso de precipitación de 250 mL, se le añadió 100 mL de agua destilada libre de CO₂ y llevó a ebullición durante 10 minutos en una plancha de calentamiento.

Una vez pasado el tiempo de ebullición, se procedió a filtrar el agua dejando enfriar hasta llegar a temperatura ambiente y se midió el pH con ayuda de un pH-metro Inolab level 2.

2.5. Capacidad de adsorción

2.5.1. Adsorción de Azul de metileno

Por medio de la decoloración del azul de metileno se puede comparar la capacidad de adsorción de los diferentes carbones activados obtenidos.

Para la preparación de la solución de azul de metileno se pesó 0,1 g de azul de metileno y se aforó en un balón de 1 L con agua destilada para obtener una solución de 100 ppm del adsorbato, luego se realizó la recta de calibración preparando diferentes soluciones, las cuales se describen en la tabla 2.5.1.-1 y se midió la absorbancia con el espectrofotómetro Genesys 10S UV-visible.

Tabla 2.5.1-1. Proporción de las soluciones de azul de metileno

| tubo de ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Volumen de agua destilada (mL) | 0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 |
| Volumen de azul de metileno a 100ppm (mL) | 5 | 2,5 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,5 |

Para el ensayo de adsorción se pesó 3 g del carbón activado y se depositó en una bureta de 50 mL, luego se le agregó 50 mL del azul de metileno y se tomaron muestras cada 3 mL para medir la concentración del colorante por medio de la absorbancia obtenida por el espectrofotómetro Genesys 10S UV-visible, luego de los datos obtenidos se calcularon las concentraciones y se realizó una gráfica Absorbancia vs. Concentración de azul de metileno.

2.5.2. Isotherma de adsorción de Langmuir

En 6 matraces Erlenmeyer, se prepararon diferentes soluciones de 100 mL con ácido acético 0,5 M, las cuales se describen en la tabla 2.5.2-1, a estas disoluciones se les agregó 2 g de carbón activado obtenido y se taparon los matraces.

Tabla 2.5.2-1. Proporción para diferentes soluciones de ácido acético

| Matraz | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|
| Volumen de agua destilada (mL) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 90 |
| Volumen de Ac. Acético (mL) | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 | 10 |

Fuente: Desarrollo de materiales para adsorción

Luego de haber alcanzado un equilibrio en la adsorción, en aproximadamente 10 minutos, se filtraron las disoluciones y se tomaron alícuotas de 10 mL a las cuales se les añadió 3 gotas de indicador fenolftaleína y se titularon con NaOH 0,1 M hasta que el color del indicador pase a un color rosado claro, momento en el que solución se encuentra en equilibrio, por último, se anotó el volumen de NaOH consumido, se calculó la concentración final de CH₃COOH en cada matraz, repitiendo el procedimiento para los otros carbones activados.

Una vez realizado los cálculos, se expresó la isoterma de Langmuir por medio de una gráfica de forma lineal por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{eq}}{N} = \frac{C_{eq}}{x/m} = \frac{1}{(x/m)_{m\acute{a}x}b} + \frac{C_{eq}}{(x/m)_{m\acute{a}x}} \quad Ec. (2.10)$$

$$x = C_i - C_{eq} \quad Ec. (2.11)$$

donde

(x/m)= moles de soluto adsorbidas/g adsorbente

(x/m)_{máx}=valor máximo de x/m (constante para cualquier sistema)

b=constante (relacionada a la energía de adsorción)

C_{eq}= concentración de soluto de la solución en equilibrio (moles/L)

A partir de los datos obtenidos de la ecuación de linealización de la isoterma de Langmuir es posible calcular el área superficial del adsorbato, para lo cual se asume el área molecular del adsorbato

(CH₃COOH), $\sigma = 2.1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ por cada molécula adsorbida (Tubert y Talanquer 1995). Se calcula el área superficial con la siguiente ecuación:

$$A = \left(\frac{x}{m}\right)_{\text{máx}} (N_A)(\sigma) \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$(X/m)_{\text{máx}}$ =valor máximo de x/m (constante para cualquier sistema)

N_A = número de Avogadro

σ = área molecular del adsorbato

Además, las propiedades fundamentales de la isoterma de Langmuir pueden expresarse por medio del factor adimensional de equilibrio (R_L), que se define de la siguiente forma:

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_o} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

b =constante (relacionada a la energía de adsorción)

C_o = Concentración inicial del adsorbato

El valor de R_L indica la naturaleza del proceso de adsorción, por lo tanto:

$R_L < 1$ No favorable

$R_L = 1$ Lineal

$0 < R_L < 1$ Favorable

$R_L = 0$ Irreversible

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Pretratamiento de la materia prima

En el pretratamiento de la materia prima se secó el bagazo de café obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3.1-1. Contenido de humedad del bagazo de café

| Parámetros | Bagazo inicial | Bagazo seco |
|----------------|----------------|-------------|
| Peso (g) | 5800,00 | 1206,46 |
| Porcentaje (%) | 100,00 | 20,80 |
| Humedad (%) | - | 79,20 |

3.2. Resultados de las activaciones

Tabla 3.2-1. Resultados de las activaciones químicas

| Proceso de activación | H ₃ PO ₄ al 20% | H ₃ PO ₄ al 40% |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Masa inicial del bagazo (g) | 301,50 | 301,50 |
| Volumen del ácido (mL) | 603,00 | 603,00 |
| Masa del ácido (g) | 729,60 | 838,26 |
| Masa del bagazo seco con ácido (g) | 1031,10 | 1139,76 |
| Masa del bagazo seco con ácido luego de 24 horas (g) | 1029,81 | 1138,84 |
| Masa carbonizada y activada (g) | 352,16 | 465,20 |
| Volumen de agua destilada para lavado (mL) | 4400,00 | 5500,00 |
| Volumen de NaOH 0,1N para lavado (mL) | 4400,00 | 5500,00 |
| pH de agua de lavado | 6,5 | 6,5 |
| Masa del carbón activado húmedo (g) | 339,68 | 400,82 |
| Masa del carbón activado seco (g) | 153,44 | 161,06 |
| Rendimiento (%) | 50,89 | 53,42 |
| Emisiones de P ₂ O ₅ (mL) | 88 | 203 |

Tabla 3.2-2. Resultados de la activación física

| Proceso de activación | Resultado |
|--|-----------|
| Masa inicial del bagazo (g) | 603,46 |
| Masa pirolizada (g) | 266,50 |
| Volumen de vapor de agua utilizado (mL) | 6000,00 |
| Temperatura del vapor utilizado (°C) | 350 |
| Temperatura del carbón en la activación (°C) | 300 |
| Masa del carbón activado húmedo (g) | 268,46 |
| Masa del carbón activado seco (g) | 264,80 |
| Rendimiento (%) | 43,88 |

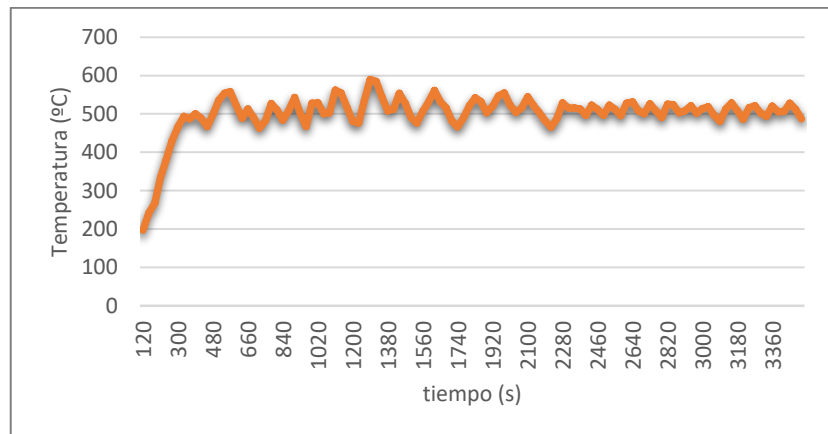


Figura 3.2-1. Curva de calor de la pirólisis del bagazo

3.3. Granulometría

Tabla 3.3-1. Granulometría del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

| N° tamiz | Peso retenido(g) | Porcentaje retenido (%) | % retenido acumulado | % pasante acumulado |
|----------|------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| 25 | 0,29 | 0,19 | 0,19 | 99,81 |
| 40 | 0,23 | 0,15 | 0,34 | 99,66 |
| 70 | 31,86 | 20,76 | 21,10 | 78,90 |
| 80 | 44,60 | 29,07 | 50,17 | 49,83 |
| 100 | 22,06 | 14,37 | 64,54 | 35,46 |
| 120 | 19,61 | 12,78 | 77,32 | 22,68 |
| Base | 34,80 | 22,68 | 100,00 | 0,00 |
| Total | 153,44 | 100,00 | | |

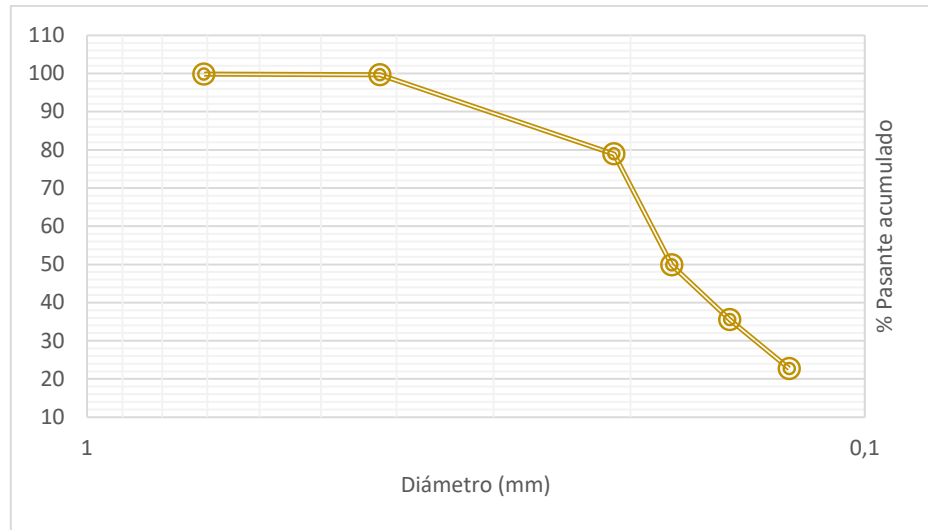


Figura 3.3-1. Curva granulométrica del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

Tabla 3.3-2. Granulometría del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

| N° tamiz | Peso retenido(g) | Porcentaje retenido (%) | % retenido acumulado | % pasante acumulado |
|--------------|------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| 25 | 0,20 | 0,13 | 0,13 | 99,87 |
| 40 | 0,48 | 0,30 | 0,43 | 99,57 |
| 70 | 23,92 | 14,85 | 15,28 | 84,72 |
| 80 | 30,87 | 19,17 | 34,45 | 65,55 |
| 100 | 24,28 | 15,08 | 49,53 | 50,47 |
| 120 | 42,30 | 26,27 | 75,80 | 24,21 |
| Base | 38,99 | 24,21 | 100,00 | 0,00 |
| Total | 161,06 | 100,00 | | |

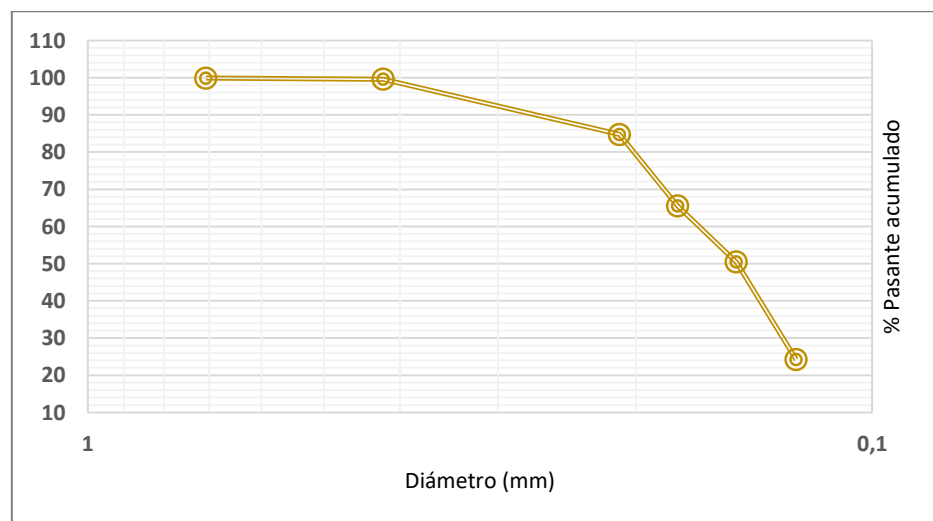


Figura 3.3-2. Curva granulométrica del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

Tabla 3.3-3. Granulometría del carbón por activación física

| N° tamiz | Peso retenido(g) | Porcentaje retenido (%) | % retenido acumulado | % pasante acumulado |
|--------------|------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| 10 | 2,15 | 1,79 | 1,79 | 98,21 |
| 25 | 80,63 | 67,19 | 68,98 | 31,02 |
| 30 | 26,81 | 22,34 | 91,33 | 8,68 |
| Base | 10,41 | 8,68 | 100,00 | 0,00 |
| Total | 120,00 | 100,00 | | |

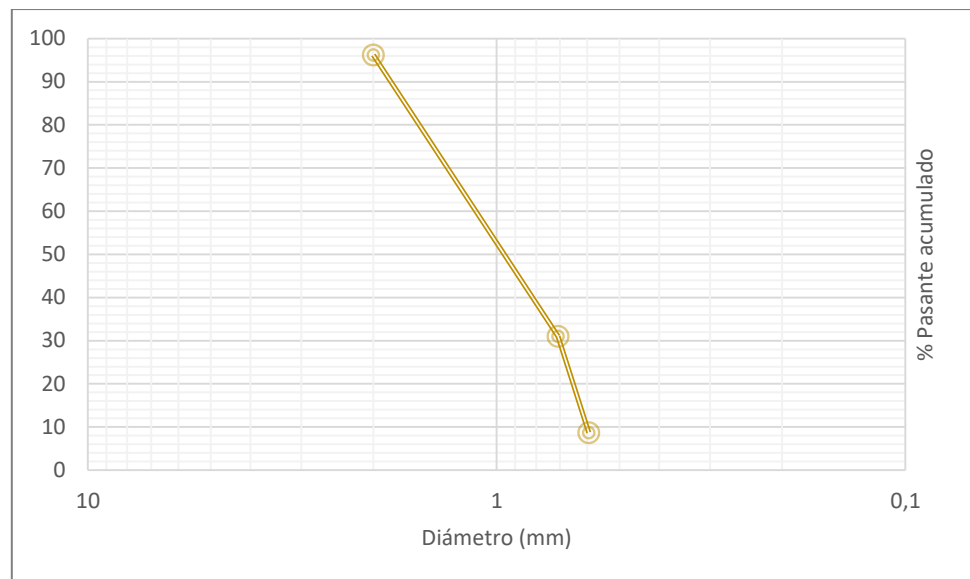


Figura 3.3-3. Curva granulométrica del carbón por activación física

3.4. Contenido de humedad

Activación Química

Tabla 3.4-1. Humedad del carbón activado por el H₃PO₄ al 20%

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la muestra seca + crisol (g) | Peso de la muestra seca (g) | Humedad (%) |
|-----------------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 1 | 36,9977 | 2,0062 | 38,7955 | 1,7978 | 10,3878 |
| 2 | 35,8912 | 2,0004 | 37,6909 | 1,7997 | 10,0330 |
| 3 | 34,8124 | 2,0029 | 36,6026 | 1,7902 | 10,6196 |
| Promedio | | | | | 10,3468 |

Tabla 3.4-2. Humedad del carbón activado por el H₃PO₄ al 40%

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la muestra seca + crisol (g) | Peso de la muestra seca (g) | Humedad (%) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 34,7592 | 2,0079 | 36,5299 | 1,7707 | 11,8133 |
| 2 | 38,7084 | 2,0008 | 40,4802 | 1,7718 | 11,4454 |
| 3 | 36,3886 | 2,0121 | 38,1699 | 1,7813 | 11,4706 |
| Promedio | | | | | 11,5765 |

Activación Física**Tabla 3.4-3. Humedad del carbón vegetal**

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la muestra seca + crisol (g) | Peso de la muestra seca (g) | Humedad (%) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 34,7592 | 2,0074 | 36,6920 | 1,9328 | 3,7162 |
| 2 | 37,253 | 2,0018 | 39,1612 | 1,9082 | 4,6758 |
| 3 | 36,3886 | 2,0029 | 38,3128 | 1,9242 | 3,9293 |
| Promedio | | | | | 4,1071 |

Tabla 3.4-4. Humedad del carbón por activación física

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la muestra seca + crisol (g) | Peso de la muestra seca (g) | Humedad (%) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 37,1539 | 2,0087 | 39,1060 | 1,9521 | 2,8177 |
| 2 | 38,7084 | 2,0079 | 40,6766 | 1,9682 | 1,9772 |
| 3 | 35,3634 | 2,0029 | 37,3226 | 1,9592 | 2,1818 |
| Promedio | | | | | 2,3256 |

3.5. pH

Tabla 3.5-1. Potencial de hidrógeno del carbón activado

| Carbón activado | masa (g) | pH |
|---|----------|-------|
| Por H ₃ PO ₄ al 20% | 4,0011 | 6,082 |
| Por H ₃ PO ₄ al 40% | 4,0029 | 6,064 |
| Por vapor de agua | 4,0015 | 6,205 |

3.6. Densidad aparente

Tabla 3.6-1. Masa de carbón activado en determinado volumen

| Prueba | Masa del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 20% (g) | Masa del carbón activado por H ₃ PO ₄ al 40% (g) | Masa del carbón vegetal (g) | Masa del carbón por activación física (g) |
|-----------------|--|--|-----------------------------|---|
| 1 | 13,5599 | 13,4106 | 10,8266 | 9,9908 |
| 2 | 14,2484 | 13,6686 | 10,5980 | 10,1992 |
| 3 | 13,9738 | 13,7277 | 10,3542 | 9,9348 |
| 4 | 14,1255 | 13,6633 | 10,4236 | 9,8125 |
| 5 | 13,8947 | 13,5285 | 10,1019 | 9,9358 |
| Promedio | 13,9605 | 13,5997 | 10,4609 | 9,9746 |

Tabla 3.6-2. Densidad aparente del carbón activado obtenido

| Carbón | Masa (g) | Humedad (%) | Volumen (mL) | Densidad aparente (g/mL) |
|--|----------|-------------|--------------|--------------------------|
| Activado por H ₃ PO ₄ al 20% | 13,9605 | 10,3468 | 20 | 0,6258 |
| Activado por H ₃ PO ₄ al 40% | 13,5997 | 11,5765 | 20 | 0,6013 |
| carbón vegetal | 10,4609 | 4,1071 | 20 | 0,5016 |
| Por vapor de agua | 9,9746 | 2,3256 | 20 | 0,4871 |

3.7. Cenizas totales

Activación Química

Tabla 3.7-1. Cenizas totales del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la cenizas + crisol (g) | Peso de las cenizas (g) | Cenizas totales (%) |
|-----------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 38,6967 | 1,0039 | 38,7503 | 0,0536 | 5,3392 |
| 2 | 34,7481 | 1,0029 | 34,7964 | 0,0483 | 4,8160 |
| 3 | 33,004 | 1,0092 | 33,0558 | 0,0518 | 5,1328 |
| Promedio | | | | | 5,0960 |

Tabla 3.7-2. Cenizas totales del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la cenizas + crisol (g) | Peso de las cenizas (g) | Cenizas totales (%) |
|-----------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 37,1294 | 1,0085 | 37,1924 | 0,063 | 6,2469 |
| 2 | 35,3526 | 1,0023 | 35,4164 | 0,0638 | 6,3654 |
| 3 | 37,243 | 1,0008 | 37,3047 | 0,0617 | 6,1651 |
| Promedio | | | | | 6,2591 |

Activación Física

Tabla 3.7-3. Cenizas totales del carbón vegetal

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la cenizas + crisol (g) | Peso de las cenizas (g) | Cenizas totales (%) |
|-----------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 34,7481 | 1,0025 | 34,7705 | 0,0224 | 2,2344 |
| 2 | 37,243 | 1,0047 | 37,2531 | 0,0101 | 1,0053 |
| 3 | 36,3777 | 1,0051 | 36,4059 | 0,0282 | 2,8057 |
| Promedio | | | | | 2,0151 |

Tabla 3.7-4. Cenizas totales del carbón por activación física

| Crisol | Peso de Crisol (g) | Peso de la muestra (g) | Peso de la cenizas + crisol (g) | Peso de las cenizas (g) | Cenizas totales (%) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 37,1294 | 1,0059 | 37,1763 | 0,0469 | 4,6625 |
| 2 | 38,6967 | 1,0058 | 38,7312 | 0,0345 | 3,4301 |
| 3 | 35,3526 | 1,0057 | 35,3859 | 0,0333 | 3,3111 |
| Promedio | | | | | 3,8012 |

3.8. Número de yodo

Tabla 3.8-1. Normalidad real de las soluciones para el número de yodo

| Parámetros | Yodato de potasio | Yodo | Tiosulfato de sodio |
|--|--------------------------|-------------|----------------------------|
| Volumen de muestra (mL) | 50 | 10 | - |
| Volumen de tiosulfato de sodio (mL) | 49,2 | 10,4 | - |
| Normalidad estandarizada (N) | 0,1 | 0,1057 | 0,1016 |

Activación Química

Tabla 3.8-2. Número de yodo del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

| Prueba | Peso de muestra (g) | Volumen consumido | | | f | Número de Yodo (mg/g) |
|-----------------|----------------------------|--|------------|----------|----------|------------------------------|
| | | de tiosulfato de sodio 0,1 N (mL) | V/m | C | | |
| 1 | 1,5990 | 9,3000 | 673,9306 | 0,0197 | 1,0038 | 676,4916 |
| 2 | 1,5997 | 8,9000 | 680,7317 | 0,0188 | 1,0125 | 689,2409 |
| 3 | 1,5982 | 9,1000 | 677,8193 | 0,0192 | 1,0075 | 682,9029 |
| Promedio | | | | | | 682,8785 |

Tabla 3.8-3. Número de yodo del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

| Prueba | Peso de muestra (g) | Volumen consumido | | | f | Número de Yodo (mg/g) |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|----------|--------|--------|-----------------------|
| | | de tiosulfato de sodio 0,1 N (mL) | V/m | C | | |
| 1 | 1,5986 | 4,9000 | 752,2089 | 0,0104 | 1,1200 | 842,4740 |
| 2 | 1,5970 | 4,6000 | 758,2935 | 0,0097 | 1,1300 | 856,8717 |
| 3 | 1,5987 | 5,0000 | 750,3867 | 0,0106 | 1,1163 | 837,6567 |
| Promedio | | | | | | 845,6675 |

Activación Física

Tabla 3.8-4. Número de yodo del carbón vegetal

| Prueba | Peso de muestra (g) | Volumen consumido | | | f | Número de Yodo (mg/g) |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---|-----------------------|
| | | de tiosulfato de sodio 0,1 N (mL) | V/m | C | | |
| 1 | 1,5973 | 30,1 | 305,0236 | 0,0611632 | - | 305,0236 |
| 2 | 1,5971 | 30,6 | 296,1796 | 0,0621792 | - | 296,1796 |
| 3 | 1,5983 | 29,9 | 308,3830 | 0,0607568 | - | 308,3830 |
| Promedio | | | | | | 303,1954 |

Tabla 3.8-5. Número de yodo del carbón por activación física

| Prueba | Peso de muestra (g) | Volumen consumido | | | f | Número de Yodo (mg/g) |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|----------|-----------|---|-----------------------|
| | | de tiosulfato de sodio 0,1 N (mL) | V/m | C | | |
| 1 | 1,5953 | 30,1 | 305,4060 | 0,0611632 | - | 305,4060 |
| 2 | 1,5965 | 29,5 | 315,8390 | 0,059944 | - | 315,8390 |
| 3 | 1,5988 | 29,7 | 311,8356 | 0,0603504 | - | 311,8356 |
| Promedio | | | | | | 311,0269 |

3.9. Isoterma de Langmuir

Tabla 3.9-1. Datos generales de la isoterma de Langmuir

| Disoluciones | Normalidad (N) | σ |
|----------------------|-------------------|----------------------|
| NaOH | 0,1002 | - |
| CH ₃ COOH | 0,5310 | $2,1 \cdot 10^{-19}$ |

Tabla 3.9-2. Datos del proceso de adsorción del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

| V _{NaOH} (mL) | V _{CH₃COOH} (mL) | C _o (mol/L) | C _{eq} (mol/L) | m _c (g) | N (mol/g) | C _{eq} /N (g/L) |
|---------------------------|---|---------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|
| 50,0 | 100 | 0,5310 | 0,5009 | 2,0009 | 0,0015 | 333,4833 |
| 39,8 | 80 | 0,4248 | 0,3987 | 2,0008 | 0,0013 | 306,2763 |
| 29,8 | 60 | 0,3186 | 0,2985 | 2,0071 | 0,0009 | 299,0579 |
| 19,9 | 40 | 0,2124 | 0,1994 | 2,0028 | 0,0006 | 306,5825 |
| 9,8 | 20 | 0,1062 | 0,0982 | 2,0016 | 0,0004 | 245,1960 |
| 4,9 | 10 | 0,0531 | 0,0491 | 2,0017 | 0,0002 | 245,2083 |

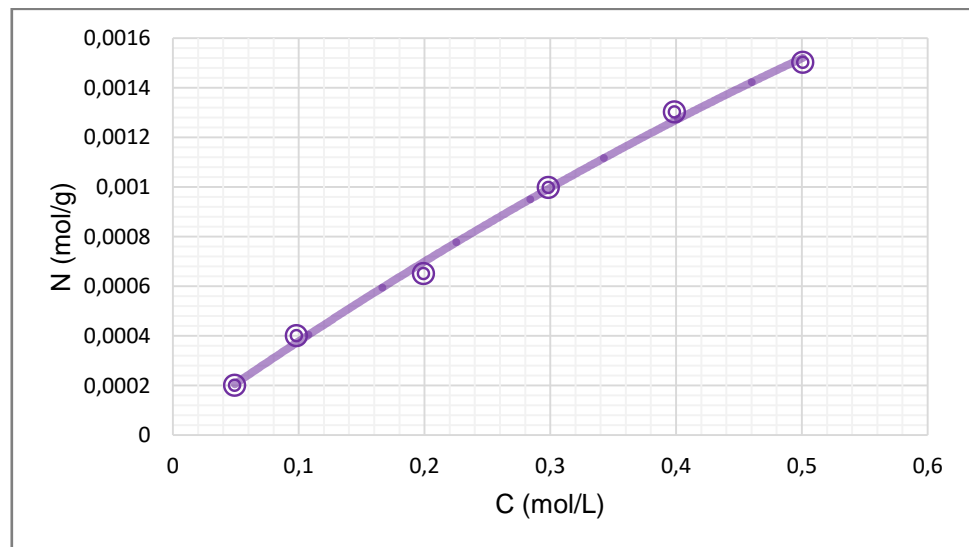


Figura 3.9-1. Isoterma de Langmuir para el carbón activado por H₃PO₄ al 20%

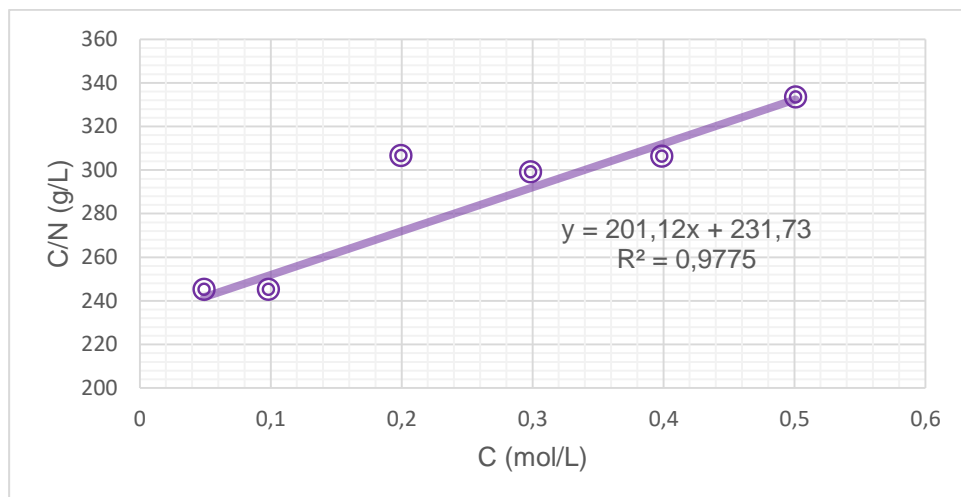


Figura 3.9-2. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado por el H₃PO₄ al 20%

Tabla 3.9-3. Datos del proceso de adsorción del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

| V _{NaOH} (mL) | V _{CH₃COOH} (mL) | C _o (mol/L) | C _{eq} (mol/L) | m _c (g) | N (mol/g) | C _{eq} /N (g/L) |
|---------------------------|---|---------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|
| 50 | 100 | 0,5310 | 0,5010 | 2,0008 | 0,0015 | 333,4666 |
| 40 | 80 | 0,4248 | 0,4007 | 2,0003 | 0,0012 | 333,3833 |
| 29,9 | 60 | 0,3186 | 0,2995 | 2,0019 | 0,0010 | 315,0358 |
| 19,8 | 40 | 0,2124 | 0,1984 | 2,001 | 0,0007 | 282,9986 |
| 9,9 | 20 | 0,1062 | 0,0992 | 2,0073 | 0,0003 | 283,8896 |
| 4,9 | 10 | 0,0531 | 0,0491 | 2,0005 | 0,0002 | 245,0613 |

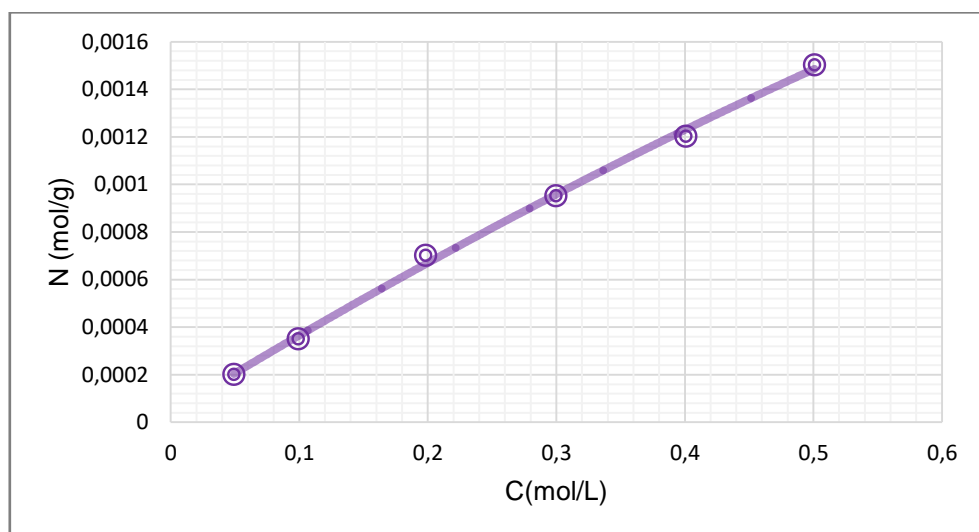


Figura 3.9-3. Isoterma de Langmuir para el carbón activado por H₃PO₄ al 40%

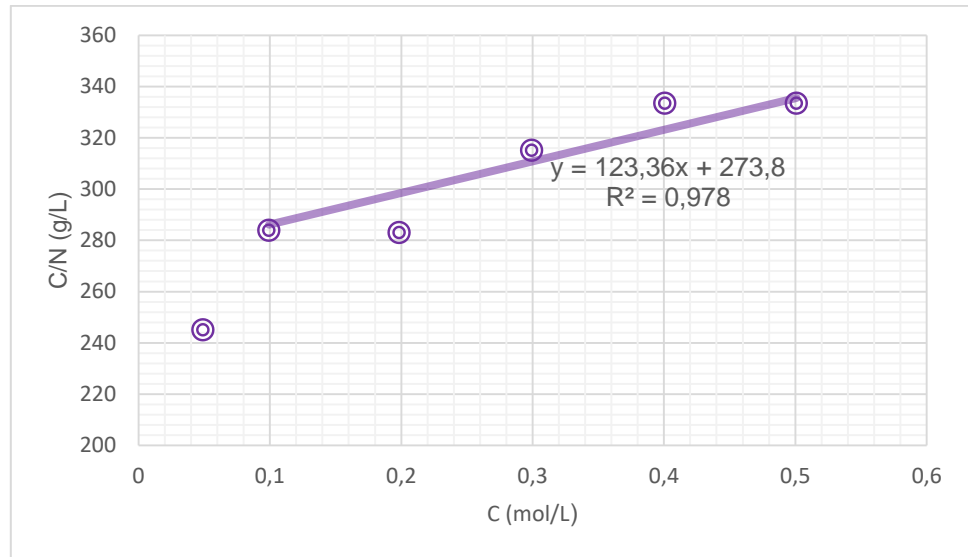


Figura 3.9-4. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado por el H₃PO₄ al 40%

Tabla 3.9-4. Datos del proceso de adsorción del carbón comercial

| V _{NaOH} (mL) | V _{CH₃COOH} (mL) | C _o (mol/L) | C _{eq} (mol/L) | m _c (g) | N (mol/g) | C _{eq} /N (g/L) |
|---------------------------|---|---------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|
| 50,1 | 100 | 0,5310 | 0,5009 | 2,0020 | 0,0015 | 345,8628 |
| 40 | 80 | 0,4248 | 0,4007 | 2,0079 | 0,0012 | 334,6500 |
| 30 | 60 | 0,3186 | 0,3005 | 2,0038 | 0,0009 | 333,9667 |
| 19,9 | 40 | 0,2124 | 0,1994 | 2,0033 | 0,0007 | 306,6590 |
| 9,9 | 20 | 0,1062 | 0,0992 | 2,0008 | 0,0004 | 282,9703 |
| 4,9 | 10 | 0,0531 | 0,0481 | 2,0009 | 0,0003 | 245,1103 |

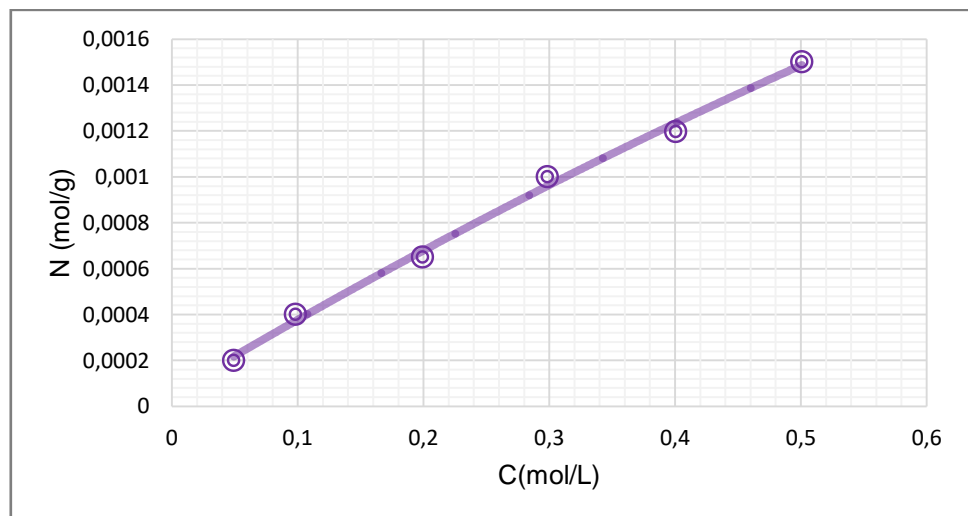


Figura 3.9-5. Isoterma de Langmuir para el carbón activado comercial

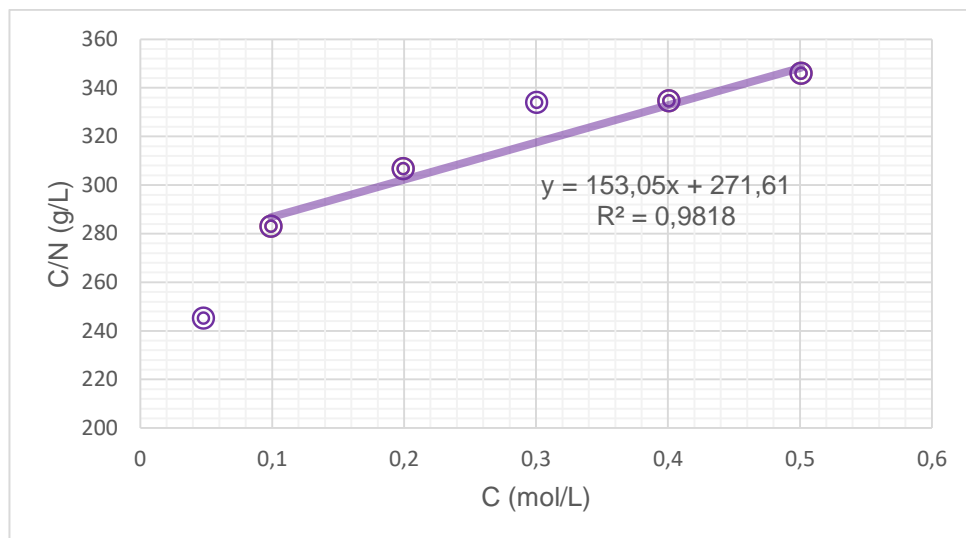


Figura 3.9-6. Linealización de la Isoterma de Langmuir para el carbón activado comercial

Tabla 3.9-5. Área superficial resultante para cada tipo de carbón

| Carbón activado | $N_{m\acute{a}x}$ (mol/g) | b (1/mol) | N_A (1/mol) | σ (m^2) | R_L | A (m^2/g) |
|----------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|----------------------|-------|---------------|
| Por H_3PO_4 al 20% | 0,0050 | 1,1522 | $6,0221367 \cdot 10^{23}$ | $2,1 \cdot 10^{-19}$ | 0,620 | 632,3244 |
| Por H_3PO_4 al 40% | 0,0081 | 2,2195 | $6,0221367 \cdot 10^{23}$ | $2,1 \cdot 10^{-19}$ | 0,459 | 1024,3655 |
| Comercial | 0,0065 | 0,5635 | $6,0221367 \cdot 10^{23}$ | $2,1 \cdot 10^{-19}$ | 0,769 | 822,0217 |

3.10. Adsorción de azul de metileno

Tabla 3.10-1. Datos generales de la adsorción de azul de metileno

| | |
|--|--------|
| Peso molecular azul de metileno (g/mol) | 319,85 |
| Longitud de celda (cm) | 1 |
| Longitud de onda (nm) | 660 |
| Absortividad molar (1/(M*cm)) | 0,011 |
| Absorbancia inicial | 1,084 |

Tabla 3.10-2. Datos de la recta de calibración de azul de metileno

| Volumen de H₂O | Volumen azul de metileno | Concentración (ppm) | Absorbancia |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 0 | 5 | 100 | 1,084 |
| 2,5 | 2,5 | 50 | 0,415 |
| 3 | 2 | 40 | 0,315 |
| 3,5 | 1,5 | 30 | 0,192 |
| 4 | 1 | 20 | 0,111 |
| 4,5 | 0,5 | 10 | 0,075 |
| 5 | 0 | 0 | 0 |

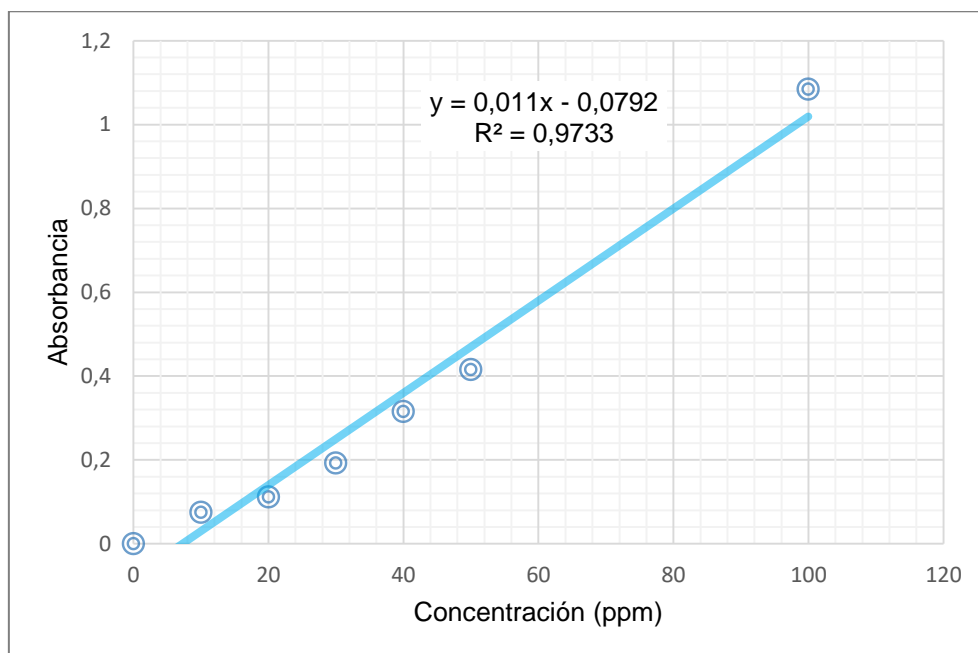


Figura 3.10-1. Recta de calibración para el azul de metileno

Tabla 3.10-3. Capacidad adsorptiva del carbón activado por H₃PO₄ al 20%

| Masa de carbón activado (g) | | | | 3,0056 |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Muestra | Volumen (mL) | Absorbancia | Concentración (M) | Concentración (ppm) |
| 1 | 3 | 0,023 | 6,54E-06 | 2,091 |
| 2 | 3 | 0,044 | 1,25E-05 | 4,000 |
| 3 | 3 | 0,061 | 1,73E-05 | 5,545 |
| 4 | 3 | 0,081 | 2,30E-05 | 7,364 |
| 5 | 3 | 0,079 | 2,25E-05 | 7,182 |
| 6 | 3 | 0,082 | 2,33E-05 | 7,455 |
| 7 | 3 | 0,095 | 2,70E-05 | 8,636 |
| 8 | 3 | 0,098 | 2,79E-05 | 8,909 |
| 9 | 3 | 0,102 | 2,90E-05 | 9,273 |
| 10 | 3 | 0,107 | 3,04E-05 | 9,727 |
| 11 | 3 | 0,166 | 4,72E-05 | 15,091 |
| 12 | 3 | 0,189 | 5,37E-05 | 17,182 |
| 13 | 3 | 0,208 | 5,91E-05 | 18,909 |
| 14 | 3 | 0,215 | 6,11E-05 | 19,545 |

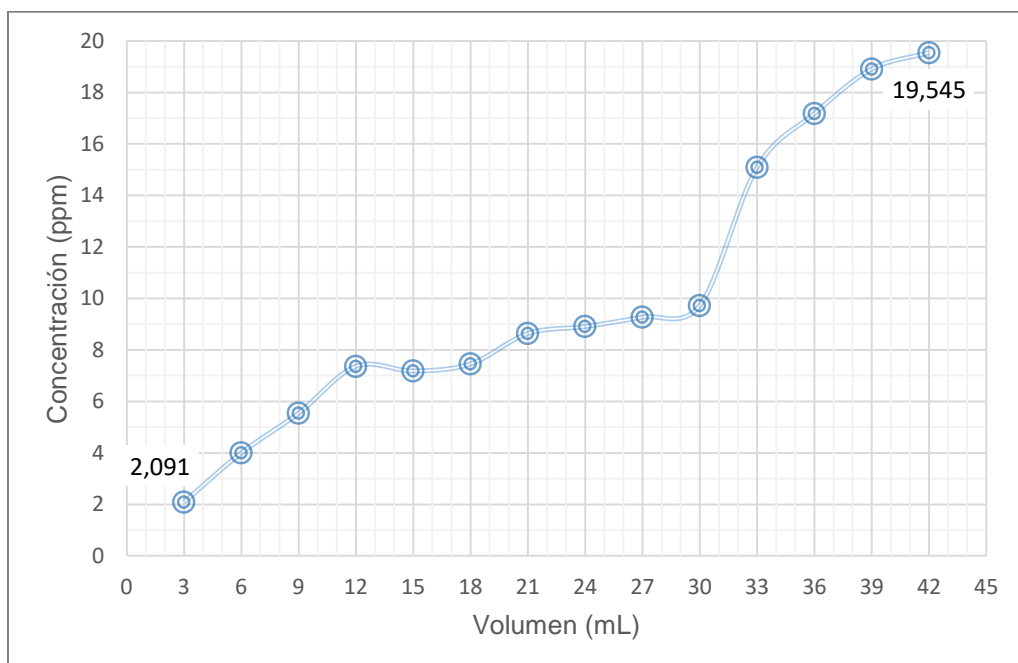


Figura 3.10-2. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado por el H₃PO₄ al 20%

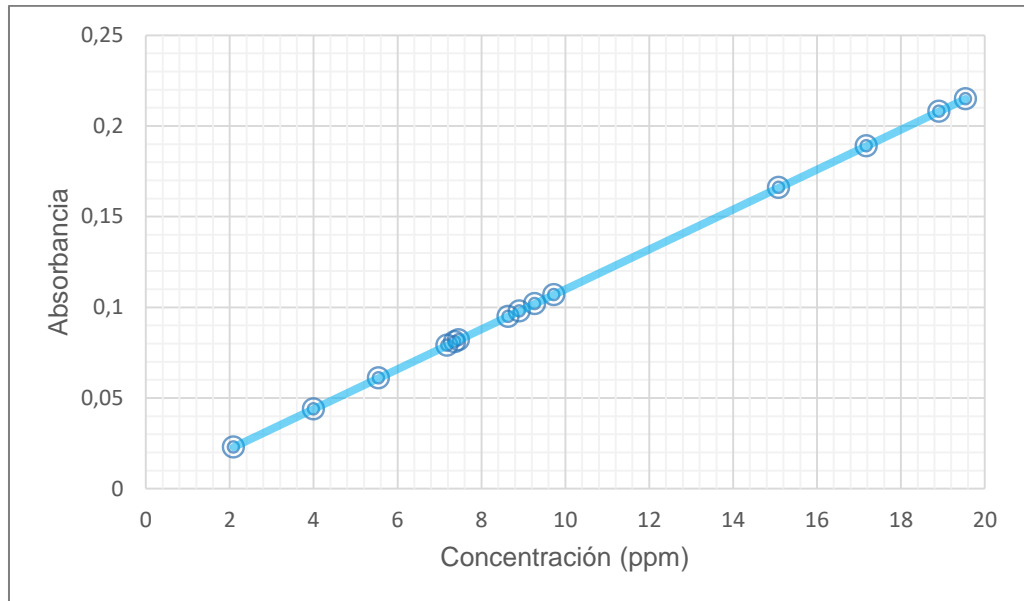


Figura 3.10-3. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado por el H₃PO₄ al 20%

Tabla 3.10-4. Capacidad adsortiva del carbón activado por H₃PO₄ al 40%

| Masa de carbón activado (g) | | | | 3,0089 |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Muestra | Volumen (mL) | Absorbancia | Concentración (M) | Concentración (ppm) |
| 1 | 3 | 0,000 | 0,0000 | 0,000 |
| 2 | 3 | 0,019 | 5,50E-06 | 1,727 |
| 3 | 3 | 0,083 | 2,40E-05 | 7,545 |
| 4 | 3 | 0,088 | 2,55E-05 | 8,000 |
| 5 | 3 | 0,069 | 1,99E-05 | 6,273 |
| 6 | 3 | 0,106 | 3,07E-05 | 9,636 |
| 7 | 3 | 0,084 | 2,43E-05 | 7,636 |
| 8 | 3 | 0,082 | 2,37E-05 | 7,455 |
| 9 | 3 | 0,092 | 2,66E-05 | 8,364 |
| 10 | 3 | 0,119 | 3,44E-05 | 10,818 |
| 11 | 3 | 0,141 | 4,08E-05 | 12,818 |
| 12 | 3 | 0,158 | 4,57E-05 | 14,364 |
| 13 | 3 | 0,197 | 5,70E-05 | 17,909 |
| 14 | 3 | 0,202 | 5,84E-05 | 18,364 |

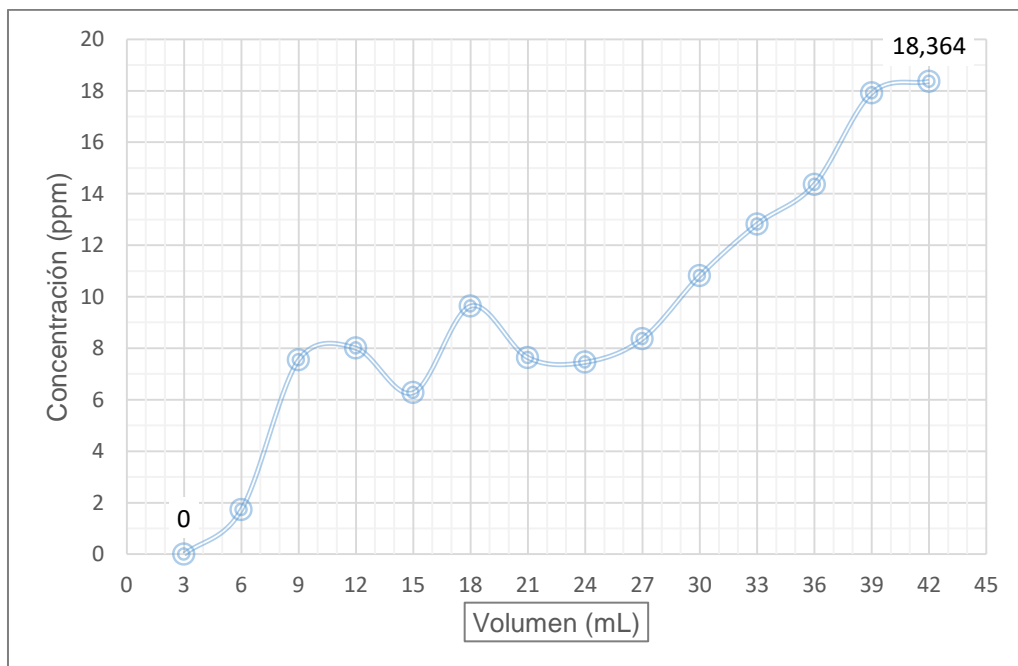


Figura 3.10-4. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado por el H₃PO₄ al 40%

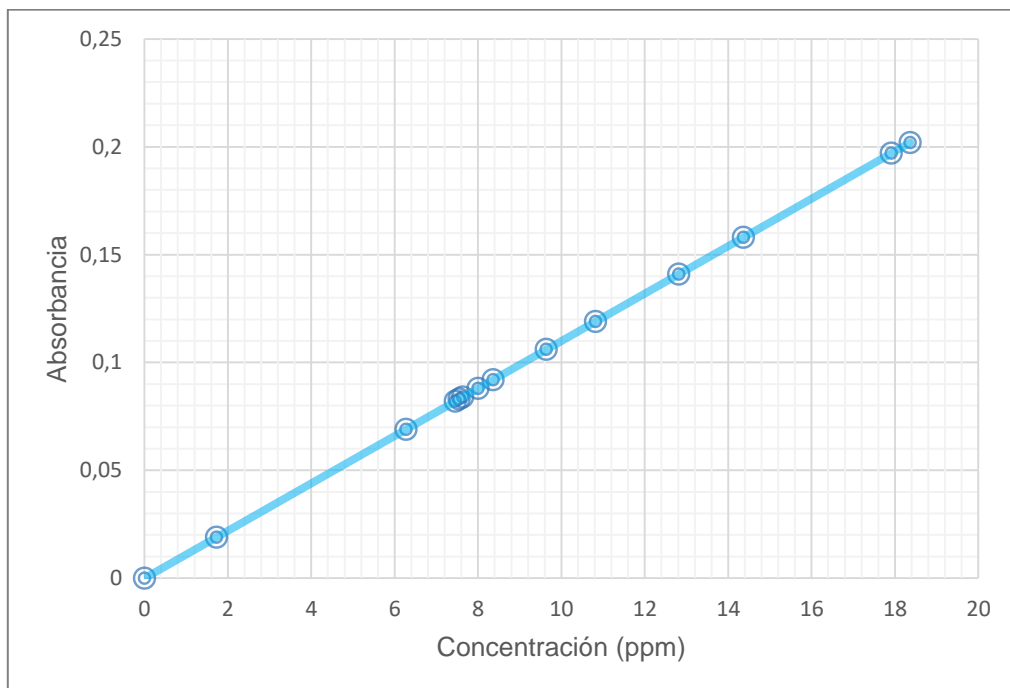


Figura 3.10-5. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado por el H₃PO₄ al 40%

Tabla 3.10-5. Capacidad adsortiva del carbón activado comercial

| Masa de carbón activado (g) | | | | 3,0056 |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------------|---------------------|
| Muestra | Volumen (mL) | Absorbancia | Concentración (M) | Concentración (ppm) |
| 1 | 3 | 0,005 | 1,42E-06 | 0,455 |
| 2 | 3 | 0,026 | 7,39E-06 | 2,364 |
| 3 | 3 | 0,001 | 2,84E-07 | 0,091 |
| 4 | 3 | 0,031 | 8,81E-06 | 2,818 |
| 5 | 3 | 0,025 | 7,11E-06 | 2,273 |
| 6 | 3 | 0,026 | 7,39E-06 | 2,364 |
| 7 | 3 | 0,031 | 8,81E-06 | 2,818 |
| 8 | 3 | 0,08 | 2,27E-05 | 7,273 |
| 9 | 3 | 0,109 | 3,10E-05 | 9,909 |
| 10 | 3 | 0,12 | 3,41E-05 | 10,909 |
| 11 | 3 | 0,143 | 4,06E-05 | 13,000 |
| 12 | 3 | 0,161 | 4,58E-05 | 14,636 |
| 13 | 3 | 0,194 | 5,51E-05 | 17,636 |
| 14 | 3 | 0,203 | 5,77E-05 | 18,455 |

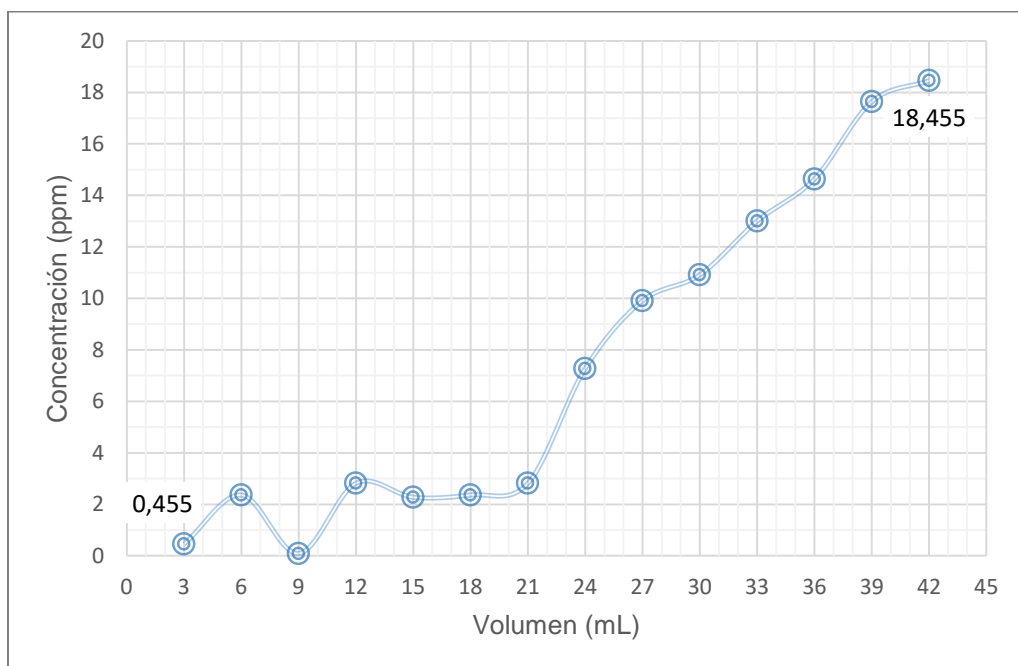


Figura 3.10-6. Concentración de AM al pasar por filtro del carbón activado comercial

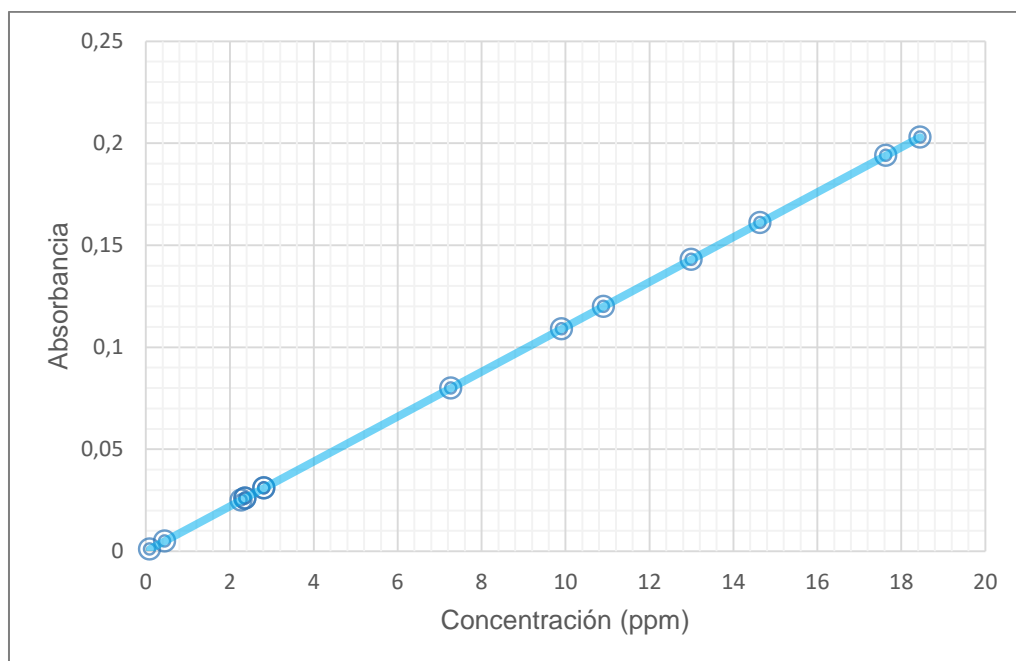


Figura 3.10-7. Relación entre la absorbancia y la concentración del AM para el carbón activado comercial

3.11. Resultados generales

Tabla 3.11-1. Resultados generales de los carbones activados

| Resultados finales | Activación química | | Activación física | | Carbón Comercial |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | H ₃ PO ₄ al 20% | H ₃ PO ₄ al 40% | Carbón Vegetal | carbón Activado | |
| Rendimiento (%) | 50,89 | 53,42 | - | 43,88 | - |
| Tipo de carbón activado | granular | granular | granular | granular | granular |
| Humedad (%) | 10,35 | 11,58 | 4,11 | 2,33 | 2,24 |
| pH | 6,082 | 6,064 | - | 6,205 | 6,000 |
| Densidad aparente (g/cm³) | 0,6257 | 0,6013 | 0,5013 | 0,4871 | 0,4800 |
| Cenizas totales (%) | 5,10 | 6,26 | 2,02 | 3,80 | 8,90 |
| Número de yodo (mg/g) | 682,88 | 845,67 | 303,20 | 311,03 | 986,00 |
| Área superficial (m²/g) | 673,01 | 679,63 | - | - | 621,42 |

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Discusión

Durante el pretratamiento de la materia prima sólo se obtuvo el 20,80% de bagazo seco que se lo dividió en diferentes cantidades para producir carbón activado por distintos procesos. Por activación química se obtuvo una producción del 50,89% con ácido fosfórico al 20%, 53,42% con ácido fosfórico al 40% y por activación física se obtuvo una producción del 43,88% como se puede apreciar en la tabla 3.11-1. Estos resultados concuerdan con el uso del agente químico activador que permite que se reduzca la formación de materia volátil; es por ello que el rendimiento de la activación física es menor al rendimiento de las activaciones químicas. Al comparar estos resultados de rendimiento con el carbón comercial proveniente del lignito y de acuerdo las características de algunas materias primas del carbón activado descritas en la tabla 1.14-1, el lignito puede producir entre el 55% al 70% de carbón activado, mientras que otras materias primas pueden producir entre el 40% al 45%, por lo tanto, el rendimiento del carbón activado a partir del bagazo de café es aceptable y se puede considerar para una futura producción del mismo.

En la activación química, el rendimiento del carbón activado por ácido fosfórico al 20% es menor que por el ácido al 40%, a pesar de que se tomaron las mismas cantidades másicas y volumétricas. Al realizar los lavados y el secado de los productos finales, se obtuvo una diferencia másica de 7,62 g, siendo de mayor peso el carbón activado por ácido fosfórico al 40%, esta diferencia de masas se debe a la influencia de la concentración del ácido en la materia prima, evitando pérdidas de carbono por volatilización.

En la activación física, durante la etapa de pirólisis se estableció una temperatura entre 480°C a 590°C como se aprecia en la figura 3.2-1 observándose la salida de gases y aceites pirolíticos por condensación durante 1 hora, tiempo establecido por la disminución de la temperatura y volumen de la salida de los gases, lamentablemente por la poca cantidad de recolectado de los aceites pirolíticos no se pudo hacer un estudio en su composición y caracterización pero es posible que existan componentes que sirvan como aditivos. Durante la etapa de activación, se tuvo al carbón a 300°C y al vapor a 350°C temperaturas no suficientes para realizar la respectiva activación física. Debido a que no se pudo implementar los equipos para llegar a temperaturas de 800°C e inyectarle vapor, se comprobó en el resultado del número de yodo descrito en la tabla 3.11-1. Por lo tanto solo se produjo carbón vegetal, mas no activado.

De acuerdo a los datos obtenidos por S.I.C.A., se producen aproximadamente 3525 toneladas de bagazo seco al año y si se considerara que se obtiene el 53,42% para carbón activado, la producción sería de 1883,06 toneladas al año, produciendo 1176,55 toneladas más de la cantidad promedio de importaciones que se realizan en el Ecuador (706,51 toneladas promedio de carbón activado al año en los últimos 10 años).

Una vez obtenidos los carbones activados se realizaron pruebas de caracterización, comparando sus resultados con un carbón comercial. En el caso de la granulometría, se define el tamaño de partícula del carbón, que como se puede apreciar en las tablas 3.3-1, 3.3-2 y 3.3-3, existe una gran diferencia de tamaño de partículas entre estos carbones, siendo más granular el carbón activado comercial con un retenido acumulado del 97,95% en los tamices Mesh N°8 y N°30 seguido del carbón activado físicamente con un retenido acumulado del 89,53% en los tamices ASTM N° 25 y N° 30, carbón activado por ácido fosfórico al 20% con un retenido acumulado del 76,98% en los tamices

ASTM N° 70 y N° 120 y del carbón activado por ácido fosfórico al 40% con un retenido acumulado del 75,37% en los tamices ASTM N° 70 y N° 120, el tamaño de partícula influye en la mejora de la cinética de adsorción, por lo tanto, se puede considerar que el carbón comercial cumple más rápidamente la adsorción, esta propiedad se puede controlar en la molienda del producto final quedando una granulometría similar al carbón activado comercial. Estos carbones se consideran de tipo granular conforme a la norma INEN 1991 la cual toma como partículas granulares a tamaños mayores a 75 μ m tamiz ASTM N°200.

De acuerdo a la tabla 3.11-1, los carbones activados químicamente por ácido fosfórico tienen mayor porcentaje de humedad que el carbón activado comercial. Esta gran diferencia de resultados entre los carbones se debe a que no se utiliza la misma materia prima, siendo la del carbón activado comercial lignito (Anexo F) por activación química, a pesar de ello al realizar carbón activado físicamente se tuvo una humedad similar al del carbón activado comercial, lo que indica que el carbón activado químicamente a partir del bagazo de café retiene más humedad y tiende a tener menor capacidad de adsorción, a pesar de ello, todos los carbones cumplen con los requisitos de la norma INEN 1991 (Anexo G).

De acuerdo a la tabla 3.5-1, se tiene pH de valores similares y ligeramente ácidos en los carbones activados, esto indica que tienen una capacidad de adsorción del material normal ya que a pH bajos la capacidad de adsorción disminuye, y estos carbones tienen pH muy próximos a 7 el cual es neutro.

La densidad aparente mide la razón del material seco sobre su volumen y entre menor sea la densidad aparente, existe mayor porosidad en el carbón activado; es por ello que de acuerdo a la tabla 3.11-1, el carbón activado comercial tiene mayor porosidad ya que su densidad aparente es menor entre los demás carbones siendo de 0,48

g/cm^3 , el carbón activado por ácido fosfórico al 40% con densidad aparente de $0,6013 \text{ g/cm}^3$ y por último el carbón activado por ácido fosfórico al 20% con densidad aparente de $0,6257 \text{ g/cm}^3$, teniendo valores próximos entre ellos, estos resultados se encuentran dentro de los requisitos establecidos por la norma INEN 1991 (Anexo G), a pesar de que el carbón activado físicamente tiene densidad aparente de $0,4871 \text{ g/cm}^3$ y cumple con la norma, no se lo considera activado debido al procedimiento que se tuvo al obtenerlo.

En el caso del porcentaje de cenizas totales, el carbón activado por ácido fosfórico al 20% tiene un 5,10%, el carbón activado por ácido fosfórico al 40% tiene un 6,26% mientras que el carbón activado comercial tiene un 8,90%. Estos resultados se encuentran dentro de los requisitos establecidos por la norma INEN 1991 (Anexo G) y de acuerdo a estos valores, teniendo una mayor concentración de ácido fosfórico, se producirán más cenizas o impurezas, así mismo el carbón activado comercial posee menor cantidad efectiva de adsorbente, puesto que a mayor porcentaje de cenizas totales disminuye la capacidad de adsorción, esto puede ser debido al tipo de materia prima que se utiliza y al agente químico activador. Para el caso del carbón por activación física el carbón vegetal tuvo un 2,02% mientras que el carbón activado tuvo un 3,80%, lo que indica que durante la activación física se produce mayor porcentaje de cenizas, este porcentaje es probable que aumente si se incrementa la temperatura al rango establecido para realizar la correcta activación física con vapor.

El número de yodo es un parámetro fundamental ya que mientras más alto sea su valor, indica que tiene mayor porosidad, quiere decir mayor número de microporos, por lo tanto, mejor capacidad de adsorción. De acuerdo a la tabla 3.11-1 el número de yodo del carbón activado por ácido fosfórico al 20% es de 682,88 mg/g, para el carbón activado por ácido fosfórico al 40% se tiene 845,67 mg/g y para el carbón activado comercial se tiene 986,00 mg/g, por lo tanto el carbón con mayor

porosidad y mejor capacidad de adsorción es el carbón activado comercial, seguido del carbón activado por ácido fosfórico al 40% con una diferencia de 140,33 mg/g de número de yodo, considerando que el índice de yodo estima que 1 mg de yodo es igual a 1 m² de superficie interna, estos resultados se encuentran dentro de los requisitos establecidos por la norma INEN 1991 (Anexo G). Por otra parte, en el proceso del carbón por activación física, el carbón vegetal tiene un número de yodo del 303,20 mg/g mientras que el carbón activado tiene un número de yodo del 311,03 mg/g, con una diferencia de 7,83 mg/g de número de yodo, ambos resultados no cumplen con el requisito de la norma INEN 1991 y se comprueba que no se obtuvo un carbón activado por vapor ya que no tiene alta porosidad.

Esta comparación sobre la caracterización de los carbones nos indica que el carbón activado comercial obtenido del lignito tiene mejores propiedades que los demás carbones obtenidos por el bagazo de café; pero los resultados han sido próximos y dentro de los requisitos que un carbón activado puede tener. Además, se realizaron dos tipos de pruebas para determinar la capacidad de adsorción, en el caso de la isoterma de Langmuir, es una gráfica utilizada para isotermas de adsorción de tipo 1 en donde la superficie del carbón es una monocapa. Como se puede apreciar en las figuras 3.9-1, 3.9-3 y 3.9-5 las gráficas de adsorción indican que los carbones son de tipo 1, la linealización de esta isoterma ayuda a determinar el área superficial, propiedad que depende del tamaño de la partícula y tamaño de los poros, ya que si existe menor tamaño de partícula y los poros son muy pequeños, el área superficial tiende a ser mayor. De acuerdo a la tabla 3.11-1 el carbón activado por ácido fosfórico al 20% tiene un área superficial de 632,3244 m²/g, el carbón activado por ácido fosfórico al 40% tiene un área superficial de 1024,3655 m²/g y el carbón activado comercial tiene un área superficial de 822,0217 m²/g, esto está acorde al tamaño de partícula que se obtuvo en la granulometría, ya que si se pulveriza el carbón comercial a una granulometría similar a los

carbones obtenidos, su área superficial aumentaría, así mismo, tomando en cuenta que el número de yodo nos proporciona información indirecta sobre la microporosidad, el carbón comercial tiene mayor número de poros, pero área superficial media en comparación con los otros carbones, por lo tanto sus poros son un poco más grandes que los carbones obtenidos, en el caso del carbón activado por ácido fosfórico al 40%, éste tiene menor número de yodo que el carbón comercial pero mayor área superficial, por lo tanto sus poros son más pequeños y en el caso del carbón activado por ácido fosfórico al 20%, éste tiene bajo número de yodo y una menor área superficial, por lo tanto sus poros son pequeños y su cantidad de poros no es tan alta como los demás carbones.

La isoterma de Langmuir obtenida indica que la superficie del carbón activado es homogénea y la adsorción ocurre formando monocapas. El proceso de adsorción del ácido acético es favorable ya que el parámetro de equilibrio (R_L) en los tres casos está entre 0 y 1. Además, la capacidad máxima de adsorción en los carbones activados obtenidos son elevadas y no son valores tan desviados entre sí, por lo tanto favorecen la adsorción del adsorbato.

De acuerdo a las figuras 3.10-2, 3.10-4, 3.10-6, se puede comprobar que a medida que se incrementa el volumen de adsorbato, mayor es la concentración de éste luego de estar en contacto con el adsorbente. Esto es debido a que a medida que la solución atraviesa el carbón activado va reduciendo la presencia de iones hidroxilos que atraen las iones positivos del colorante, produciendo que los sitios activos del carbón activado generen una repulsión sobre los siguientes cationes de AM que ingresan a la superficie de éste, disminuyendo la capacidad de adsorción, incrementando su concentración y por lo tanto su absorbancia. Además la cantidad de AM que es capaz de adsorber el carbón es directamente proporcional a la concentración del H_3PO_4 , ya que al tomar como muestra 3 mL de filtrado del carbón activado al 20%

se obtuvo una concentración de 2,091 ppm mientras que en la muestra del carbón activado al 40% se tiene una concentración de 0 ppm, similar a la concentración del filtrado del carbón comercial que tuvo 0,455 ppm. Por otra parte, al momento que se filtran 42 mL se obtuvo una concentración de 19,545 ppm para el filtrado del carbón activado al 20%, 18,364 ppm para el filtrado del carbón activado al 40% y 18,455 ppm para el carbón comercial, lo que quiere decir que la capacidad de adsorción del carbón activado por H_3PO_4 al 40% es similar al carbón comercial y superior al carbón activado por H_3PO_4 al 20%. En cuanto a la relación entre la absorbancia y la concentración, ésta es directamente proporcional ya que a medida que aumenta la concentración, incrementa la cantidad de luz absorbida por la muestra. Por lo tanto, se comprueba la Ley de Beer que especifica que la intensidad de un rayo de luz disminuye exponencialmente a medida que incrementa la concentración de la solución.

Los resultados de la capacidad de adsorción con azul de metileno y con la isoterma de Langmuir no se mostraron para el carbón por activación física ya que no se obtuvo ningún cambio en la adsorción de estos compuestos, lo cual se puede comprobar con el índice de yodo que presentó un valor muy inferior con respecto al requisito establecido por la respectiva norma INEN.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto permitió realizar una comparación de diferentes métodos de producción de carbón activado a partir del bagazo de café, eligiendo el más adecuado a partir de los resultados de las propiedades de cada uno y cumpliendo con los requisitos de la norma INEN 1991:2013, siendo éste por activación química de ácido fosfórico al 40%, que en comparación con el carbón activado comercial sus propiedades y la capacidad de adsorción tienen valores cercanos. Por lo cual, Solubles Instantáneos C.A. podría implementar un sistema de producción de carbón activado a partir del residuo de la extracción del café soluble permitiendo el aprovechamiento de este desecho agroindustrial, considerando que hay emisiones de P_2O_5 a la atmósfera ya que además es un gas tóxico y corrosivo que puede producir quemaduras e irritaciones.

El rendimiento del carbón activado a partir del bagazo de café es del 53,42%, considerándose aceptable para la producción del mismo, a pesar de que éste presenta un alto contenido de humedad.

El bagazo de café es un precursor potencial para la producción de carbón activado por activación química, ya que se forman enlaces fosfato por la interacción del ácido fosfórico y los compuestos del bagazo creando enlaces entre el carbono y la materia volátil e incrementando el rendimiento del carbón. Además, el carbón activado resultante es óptimo para la remoción de compuestos orgánicos y el tratamiento de aguas.

El carbón vegetal por activación física presenta propiedades aceptables y similares al carbón comercial a pesar de estar ineficientemente activado, así mismo se encuentra dentro de los requisitos de la NTE INEN 1991:2013, excepto en el número de yodo, esto permite concluir que si se logra activar correctamente puede presentar resultados cercanos a los carbones activados químicamente. De esta forma, S.I.C.A. puede considerar este método de producción del carbón activado ya que las emisiones de gases no son tan tóxicas como en la activación química, además se producen aceites pirolíticos que pueden comercializarse como aditivos.

La porosidad del carbón activado depende del tipo de materia prima utilizada, tipo de activación, tipo de agente activador y la duración del proceso de activación.

Las condiciones óptimas para la formación del carbón activado por ácido fosfórico a partir del bagazo de café son de 400°C durante 4 horas, ya que a menor temperatura y menor tiempo de activación, menor producción de poros y menor capacidad de adsorción.

Teniendo en cuenta la activación química con ácido fosfórico, a mayor concentración de éste, mejor rendimiento del carbón activado, mejor porosidad y mejores propiedades del mismo.

La capacidad de adsorción del carbón activado depende de varios parámetros que demuestran indirectamente su microporosidad, siendo los principales el número de yodo y el área superficial, los cuales indican la proporción de los poros, su tamaño y el área de contacto en el que la muestra puede estar con el carbón activado. Además, es inversamente proporcional al tamaño de las partículas, contenido de humedad, densidad aparente y cenizas totales, siendo directamente proporcional al pH, número de yodo y área superficial.

El pH es uno de los parámetros más fundamentales en el proceso de adsorción, ya que éste influye en la ionización de los compuestos, tanto ácidos como básicos, adicionalmente cambia la carga de la superficie del adsorbente, incrementando o reduciendo la capacidad de adsorción del mismo.

La fuerza impulsora de la adsorción es el gradiente de concentración entre el soluto en el carbón activado (adsorbente) y en el soluto en la disolución (adsorbato). Una diferencia de concentración baja provoca una cinética de adsorción lenta, como consecuencia de una reducción del coeficiente de transferencia de masa, el cual aumenta al incrementar la concentración inicial, aumentando la capacidad adsortiva.

La adsorción de azul de metileno sobre la superficie del carbón activado está influenciada por las fuerzas de dispersión y la atracción electrostática impulsada por los iones hidroxilos del carbón con los cationes del azul de metileno, favoreciendo la capacidad adsortiva del adsorbente. Además, la cantidad de azul de metileno que puede adsorber el carbón activado hasta su saturación se ve influenciada por la concentración del H_3PO_4 ya que a mayor concentración de este ácido, incrementa la porosidad y por lo tanto existe mayor capacidad de adsorción.

5.2. Recomendaciones

Es recomendable realizar la carbonización de una pequeña muestra del precursor para así establecer la temperatura y tiempo óptimo de carbonización, evitando la incineración del material ya que estos parámetros varían para cada residuo orgánico.

Utilizar los equipos de protección personal requeridos para cada actividad del proceso, tales como mascarillas, guantes, mandil y gafas protectoras, con el fin de evitar algún accidente.

Realizar la activación química del carbón en un ambiente ventilado o utilizando una sorbona para evitar la exposición al gas tóxico (P_2O_5), generado por la carbonización del ácido fosfórico, que es perjudicial para la salud.

Después de secar la mezcla de bagazo más la solución de ácido fosfórico a una temperatura de $105^{\circ}C$ se debe esperar que ésta se enfríe a temperatura ambiente y posteriormente triturlarla para que se realice una carbonización homogénea.

Al realizar el lavado del carbón activado químicamente con hidróxido de sodio procurar que el pH sea alcalino (8-9) para que después al ser lavado nuevamente con agua destilada, el pH esté en el rango de 6 a 7.

REFERENCIAS

- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). *Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado*. *SciELO*, 16(1), 263-271.
- Díaz, O. (2009). *Diseño de productos celulósicos para el consumo de café en bebida a partir de la Borra del café* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- El carbón activado y sus propiedades*. (s.f.). Recuperado el 20 de Mayo de 2017, de Tesis: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20980/capitulo1.pdf>
- Fernández, A., Castillo, C., Muñiz, R., & García, I. (2006). *Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental* (Tesis de pregrado). Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba.
- García, S. (2006). *Mitigación del impacto ambiental que generan los residuos sólidos del beneficio del café a partir de la producción de abono orgánico*. *Unidad de Control y Gestión de Conocimiento*, 1(1), 1-8.
- Jenkins, D. (1994). *Química del agua: Manual de laboratorio*. Ciudad de México, México: LIMUSA.
- Lazo, R. (2015). *Operaciones y procesos para la producción de carbón activado a partir de la cáscara de coco* (Proyecto de investigación). Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
- León, M. (2012). *Planta de producción de carbón activado de cáscaras de nueces para aplicaciones en hidrometalurgia del oro* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Valparaíso, Valparaíso, Chile.

- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. *Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa*, 1(1), 1-10.
- MAGAP. (s.f.). Sistema Nacional de Información de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Recuperado el Julio de 2017, de <http://sinagap.agricultura.gob.ec>
- Manejo integral de residuos sólidos y peligrosos*. (1997). Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de Manejo de residuos en la agroindustria cafetera: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxx.pdf>
- McMullan, G. (2001). *Microbial decolourisation and degradation of textile dyes*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 56(1), 81-87.
- Navarrete, D., Quijano, N., & Vélez, C. (2014). *Obtención de carbón activado a partir de materiales no convencionales para ser usado como medio filtrante* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Parejo, Y., Ortega, D., León, J., Abano, Y., & Cárdenas, K. (2015). *Generación de carbón activado a través de desperdicio de material vegetal para la elaboración de filtro de agua* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Anzoátegui, Venezuela.
- Pedrozo, O. P., Castillo, F. C., Fuentes, E. M., & Maestre, R. F. (2011). *Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo*. *Scielo*. 35(136), 387-396.
- Pérez, T. (2011). *Producción de café (Coffea arabica L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades*. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*. 5(2), 54-74.

- Pita, M. (2012). *Obtención de jabón a partir de la extracción del aceite de bagazo de café* (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Prías, J., Rojas, C., Echeverry, N., Fonthal, G., & Ariza, H. (2011). *Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor Guadua angustifolia Kunth* (Tesis de pregrado). Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.
- Rincón, J., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (15 de Junio de 2015). *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*. *SciELO*. 39(151), 171-175.
- Sevilla, U. (2009). *Manual del carbón activo*. Sevilla, España: Escuela Politécnica Superior.
- Solubles Instantáneos C.A. (s.f.). *Historia, proceso, calidad y productos de Solubles Instantáneos C.A.* Recuperado el Julio de 2017, de http://www.solublesinstantaneos.com/web_esp.swf
- Soto, F. J. (2007). *Evaluación Técnico Económica de una planta de carbón activado* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Tubert, I., & Talanquer, V. (1995). *Sobre adsorción*. *Educación química*. 1(5), 186-190.
- Universidad de Oviedo.(2011).*Experimentación en química*. Recuperado el Agosto de 2017, de Adsorción de Ácido Acético sobre Carbón Activo: <http://navarrof.orgfree.com/Docencia/FQaplicada/UT/MaterialAdsorcion.pdf>

V.Dietrich, Z. (1999). *Proyecto de café* (Proyecto de investigación). Colegio La Salle, San José, Costa Rica.

Vilarrasa, E. (2014). *Desarrollo de materiales para adsorción* (Tesis Doctoral), Universidad de Málaga, Málaga, España.

GLOSARIO DE TERMINOS

A

Adsorbato

Sustancia adsorbida en la superficie del adsorbente. 2, 11, 13, 14, 28

Adsorbente

Sustancia sobre la que sucede la adsorción. ...V, 1, 13, 14, 17, 18, 29

Agroindustrial

Derivado de la actividad agrícola o que se encuentra vinculado con ella.I

Alquitrán

Sustancia viscosa de color oscuro resultante de la destilación del petróleo.9

Antracita

Carbón fósil de color negro y que arde con dificultad.IV

Arábigo

Relativo a Arabia.I

Área superficial

Medida total de espacio que ocupan todas las superficies de un objeto. 3, 8, 12, 18, 50, 51, 52

Aspersión

Acción de asperger, disgregar un líquido en gotas muy finas. III

B

Bagazo

Residuo o remanente de los frutos después de haber sido extraídos. .II

Beneficio del café

Proceso en el cual se transforma el grano de café maduro en café pergamino para su comercio.II

Borra

Sinónimo de bagazo de café. IV, V, 5

C

Capacidad

Propiedad de retener ciertas sustancias dentro de un marco o límite específico. I, VI, 3, 12, 15, 17, 18, 28, 49, 50, 51, 52, 53

Carbón

Sustancia fósil, generalmente de color negro, resultante de la combustión incompleta de materia orgánica. 1, I, II, IV, V, VI, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 65, 67

Carbonización

Acción por la cual la materia orgánica se transforma en carbono.I, 5, 8, 21, 22, 23, 47, 53

| | | | |
|---|-------|---|------------|
| Cisco | | Grafito | |
| Revestimiento cartilaginoso perteneciente al endocarpio del fruto. | 5 | Forma alotrópica del carbono, de color negro y brillo metálico, es un buen conductor eléctrico. | 1 |
| Compostaje | | H | |
| Materia orgánica proveniente de residuos agrícolas tratados para acelerar su descomposición y ser empleados como fertilizante. | V | Heteroátomo | |
| D | | Átomo que forma parte de la cadena cerrada de un compuesto cíclico que no es de carbono. | 11 |
| Dioxinas | | Horno rotatorio | |
| Compuesto químico orgánico muy tóxico. | IV | Equipo cilíndrico que rota sobre su propio eje y permite gasificar diversas sustancias. | 8 |
| E | | Humedad | |
| Estopa | | Contenido de agua o cualquier sustancia líquida que se encuentra en el interior de un cuerpo. III, V, 3, 5, 15, 17, 21, 22, 24, 25, 33, 48, 49, 52 | |
| Parte fibrosa que poseen algunas maderas al cortarlas. | I, IV | L | |
| G | | Lignito | |
| Gangrena | | Mineral fósil producto de la comprensión de la turba y que es empleado como combustible de calidad media. | IV, 48, 50 |
| Muerte de los tejidos orgánicos del cuerpo por falta de irrigación sanguínea. | I | Lignocelulósicas | |
| Gasificación | | Sustancias ricas en lignocelulosa, compuesto que se considera la fuente de carbono renovable más prometedora para resolver los problemas energéticos actuales. IV | |
| Procedimiento que consiste en la transformación de una materia orgánica en un gas combustible. .8, 9 | | | |
| Geosmina | | | |
| Sustancia química de naturaleza sesquiterpenoide, producida principalmente por <i>Streptomyces coelicolor</i> | IV | | |

Liofilización

Metodología de conservación que consiste en la deshidratación a través de una rápida congelación y eliminando el hielo por medio de un calentamiento leve al vacío que lo convierte en vapor. III

M

Material refractario

Material cuyas cualidades lo hacen capaz de soportar altas temperaturas. 8

Mineral

Sustancia sólida que posee una composición química definida y que se forma mediante procesos inorgánicos. IV, 1, 7

Mitigación

Medidas que se toman para contrarrestar o reducir los impactos ambientales negativos. I

Mucílago

Sustancia orgánica viscosa que poseen algunos vegetales. II

N

Negro de humo

Sustancia inorgánica producto de la combustión incompleta del gas natural u otro derivado del petróleo. 1

O

Oxidante

Sustancia que se encuentra en la capacidad de producir oxidación... I, 8

P

Pergamino

Sinónimo de cisco. 5, 6

Pirólisis

Descomposición química de la materia orgánica debido al calentamiento a elevadas temperaturas sin presencia de oxígeno. 23

Porosidad

Es la razón entre el volumen de poros y el volumen total. 8, 15, 16, 17, 18, 49, 50, 52

Precursor químico

Sustancia fundamental para obtener otra sustancia por medio de un proceso químico. VI, 8, 9, 53, 56

S

Sedimentación

Consiste en la separación, por la acción de la gravedad de las partículas suspendidas. 3

Simazina

Herbicida que se utiliza para controlar las malezas. IV

supercapacitores

Son dispositivos electroquímicos capaces de mantener una densidad de energía inusualmente alta.....IV

T

Trigonelina

Alcaloide del grupo de la piridina. 4, 5, 7

SIMBOLOGÍA

| | |
|--------------------|-------------------|
| m/m | masa/masa |
| mg/g | miligramos/gramos |
| g | Gramos |
| kg | Kilogramo |
| Ton | Tonelada métrica |
| V | Volumen |
| L | Litros |
| mL | Mililitro |
| m | Metro |
| km | Kilometro |
| cm | Centímetro |
| mm | Milímetro |
| nm | Nanómetro |
| μm | Micrómetro |
| min | Minuto |
| N | Normal |
| N° | Número |
| M | Molar |
| Mg | Miligramo |
| m^2 | Metros cuadrados |
| cc o cm^3 | Centímetro cúbico |
| m^3 | Metro cúbico |
| mol | Moles |
| $^{\circ}\text{C}$ | Grados Celsius |
| ppm | Partes por millón |
| % | Porcentaje |
| r | Radio |
| h | Hora |

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A

Solución de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0,1 mol/L (0,1 N) de la norma INEN 2072

1. Disolver 25 g de tiosulfato de sodio en un matraz aforado de 1 000 mL.
2. Para la titulación: Pesar 3,567 g de yodato de potasio, colocar el yodato de potasio pesado en un matraz aforado de 1000 mL, aforar con agua y mezclar.
3. Para estandarizar la solución de tiosulfato de sodio, tomar una alícuota de 50 mL de la solución de yodato de potasio en un matraz Erlenmeyer de 500 mL provisto de tapón, y diluir a 100 mL con agua destilada, añadir 1 g de cristales de yoduro de potasio (KI) y agitar hasta disolver. A continuación colocar 15 mL de ácido clorhídrico.
4. Titular inmediatamente con la solución patrón de referencia de tiosulfato de sodio preparada hasta que el color amarillo del yodo liberado casi haya desaparecido. Agregar 1 mL de la solución indicadora de almidón y continuar titulado hasta la desaparición de un color azul.
5. La normalidad (N) de la solución de tiosulfato de sodio, se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$N = \frac{50 \times 0,1}{A}$$

Donde:

A es el volumen de tiosulfato de sodio requerido para la titulación de la solución de yodato de potasio (KIO_3), expresado en mililitros (mL).

ANEXO B

Estandarización de la solución de yodo 0,1 N de la norma INEN 1988

1. Pipetear 25 cm³ de solución de yodo 0,1 N a un Erlenmeyer de 250 cm³.
2. Titular inmediatamente con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N.
3. Añadir de 2 a 3 gotas de almidón cerca del punto final, continuar la titulación hasta que la solución sea incolora.
4. Anotar el volumen utilizado de solución estándar de tiosulfato de sodio 0,1 N.
5. La normalidad N1 se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$N = \frac{\text{cm}^3 \text{ de tiosulfato de sodio utilizado} \times N \text{ del tiosulfato}}{25}$$

ANEXO C

Factor de corrección f para la determinación del número de yodo de la norma INEN 1988

| NORMALIDAD DEL FILTRADO RESIDUAL, C | 0,0000 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0009 |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,0080 | 1,1625 | 1,1613 | 1,1600 | 1,1575 | 1,1550 | 1,1538 | 1,1513 | 1,1500 | 1,1475 | 1,1463 |
| 0,0090 | 1,1438 | 1,1425 | 1,1400 | 1,1375 | 1,1363 | 1,1350 | 1,1325 | 1,1300 | 1,1288 | 1,1275 |
| 0,0100 | 1,1250 | 1,1238 | 1,1225 | 1,1213 | 1,1200 | 1,1175 | 1,1163 | 1,1150 | 1,1138 | 1,1113 |
| 0,0110 | 1,1100 | 1,1088 | 1,1075 | 1,1063 | 1,1038 | 1,1025 | 1,1000 | 1,0988 | 1,0975 | 1,0963 |
| 0,0120 | 1,0950 | 1,0938 | 1,0925 | 1,0900 | 1,0888 | 1,0875 | 1,0863 | 1,0850 | 1,0838 | 1,0825 |
| 0,0130 | 1,0800 | 1,0788 | 1,0775 | 1,0763 | 1,0750 | 1,0738 | 1,0725 | 1,0713 | 1,0700 | 1,0688 |
| 0,0140 | 1,0675 | 1,0663 | 1,0650 | 1,0625 | 1,0613 | 1,0600 | 1,0588 | 1,0575 | 1,0563 | 1,0550 |
| 0,0150 | 1,0538 | 1,0525 | 1,0513 | 1,0500 | 1,0488 | 1,0475 | 1,0463 | 1,0450 | 1,0438 | 1,0425 |
| 0,0160 | 1,0413 | 1,0400 | 1,0388 | 1,0375 | 1,0375 | 1,0363 | 1,0350 | 1,0333 | 1,0325 | 1,0313 |
| 0,0170 | 1,0300 | 1,0288 | 1,0275 | 1,0263 | 1,0250 | 1,0245 | 1,0238 | 1,0225 | 1,0208 | 1,0200 |
| 0,0180 | 1,0200 | 1,0188 | 1,0175 | 1,0163 | 1,0150 | 1,0144 | 1,0138 | 1,0125 | 1,0125 | 1,0113 |
| 0,0190 | 1,0100 | 1,0088 | 1,0075 | 1,0075 | 1,0063 | 1,0050 | 1,0050 | 1,0038 | 1,0025 | 1,0025 |
| 0,0200 | 1,0013 | 1,0000 | 1,0000 | 0,9988 | 0,9975 | 0,9975 | 0,9963 | 0,9950 | 0,9950 | 0,9938 |
| 0,0210 | 0,9938 | 0,9925 | 0,9925 | 0,9913 | 0,9900 | 0,9900 | 0,9888 | 0,9875 | 0,9875 | 0,9863 |
| 0,0220 | 0,9863 | 0,9850 | 0,9850 | 0,9838 | 0,9825 | 0,9825 | 0,9813 | 0,9813 | 0,9800 | 0,9788 |
| 0,0230 | 0,9788 | 0,9775 | 0,9775 | 0,9763 | 0,9763 | 0,9750 | 0,9750 | 0,9738 | 0,9738 | 0,9725 |
| 0,0240 | 0,9725 | 0,9708 | 0,9700 | 0,9700 | 0,9688 | 0,9688 | 0,9675 | 0,9675 | 0,9663 | 0,9663 |
| 0,0250 | 0,9650 | 0,9650 | 0,9638 | 0,9638 | 0,9625 | 0,9625 | 0,9613 | 0,9613 | 0,9606 | 0,9600 |
| 0,0260 | 0,9600 | 0,9588 | 0,9588 | 0,9575 | 0,9575 | 0,9563 | 0,9563 | 0,9550 | 0,9550 | 0,9538 |
| 0,0270 | 0,9538 | 0,9525 | 0,9525 | 0,9519 | 0,9513 | 0,9513 | 0,9506 | 0,9500 | 0,9500 | 0,9488 |
| 0,0280 | 0,9488 | 0,9475 | 0,9475 | 0,9463 | 0,9463 | 0,9463 | 0,9450 | 0,9450 | 0,9438 | 0,9438 |
| 0,0290 | 0,9425 | 0,9425 | 0,9425 | 0,9413 | 0,9413 | 0,9400 | 0,9400 | 0,9394 | 0,9388 | 0,9388 |
| 0,0300 | 0,9375 | 0,9375 | 0,9375 | 0,9363 | 0,9363 | 0,9363 | 0,9363 | 0,9350 | 0,9350 | 0,9346 |
| 0,0310 | 0,9333 | 0,9333 | 0,9325 | 0,9325 | 0,9325 | 0,9319 | 0,9313 | 0,9213 | 0,9300 | 0,9300 |
| 0,0320 | 0,9300 | 0,9294 | 0,9288 | 0,9288 | 0,9280 | 0,9275 | 0,9275 | 0,9275 | 0,9270 | 0,9270 |
| 0,0330 | 0,9263 | 0,9263 | 0,9257 | 0,9250 | 0,9250 | - | - | - | - | - |

ANEXO D

Números de tamices ASTM, Mesh de Tyler y British standard

| Abertura en mm | USA standard ASTM E 11-61 | Número mesh de Tyler (mesh/in.) | British standard (mesh/in.) |
|----------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0,037 | 400 | 400 | — |
| 0,044 | 325 | 325 | — |
| 0,045 | — | — | 350 |
| 0,053 | 270 | 270 | 300 |
| 0,063 | 230 | 250 | 240 |
| 0,074 | 200 | 200 | — |
| 0,075 | — | — | 200 |
| 0,088 | 170 | 170 | — |
| 0,090 | — | — | 170 |
| 0,105 | 140 | 150 | 150 |
| 0,125 | 120 | 115 | 120 |
| 0,149 | 100 | 100 | — |
| 0,150 | — | — | 100 |
| 0,177 | 80 | 80 | — |
| 0,180 | — | — | 85 |
| 0,210 | 70 | 65 | 72 |
| 0,250 | 60 | 60 | 60 |
| 0,297 | 50 | 48 | — |
| 0,300 | — | — | 52 |
| 0,354 | 45 | 42 | — |
| 0,355 | — | — | 44 |
| 0,420 | 40 | 35 | 35 |
| 0,500 | 35 | 32 | 30 |
| 0,595 | 30 | 28 | — |
| 0,600 | — | — | 25 |
| 0,707 | 25 | 24 | — |
| 0,710 | — | — | 22 |
| 0,841 | 20 | 20 | — |
| 1,00 | 18 | 16 | 16 |
| 1,19 | 16 | 14 | — |
| 1,20 | — | — | 14 |
| 1,41 | 14 | 12 | — |
| 1,68 | 12 | 10 | 10 |
| 2,00 | 10 | 9 | 8 |

ANEXO F

Ficha técnica del carbón activado comercial



CARBON ACTIVADO

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

FICHA TECNICA

Página 1 de 1

CARBON ACTIVADO

El Carbón Activado es un producto de alta calidad, de origen mineral, fabricado a partir de lignita y lavado con ácido. Diseñado para cubrir las necesidades de operación en columnas de adsorción y susceptible de ser reactivado térmicamente.

Este producto por su alta eficiencia es ideal para aplicaciones de decoloración en fase líquida, también adsorbe eficientemente pesticidas y herbicidas, así como otros químicos tóxicos y precursores de trihalometanos, lo que lo hace un carbón ideal para tratamiento de agua.

El carbón es ampliamente usado en la industria embotelladora debido a su alta eficiencia de decoloración. El carbón cumple con los estándares de la AWWA B604.

| | ESPECIFICACIONES | PROPIEDADES TÍPICAS |
|---|------------------|---------------------|
| Humedad al empacar, % | 8 máx | 4 |
| pH | 4.0 – 7.0 | 5.0 – 6.0 |
| Decoloración de melazas, % | 90 mín | 97 |
| Número de Iodo, (mg I ₂ / g) | 600 mín | 660 |
| Densidad Aparente, g / cc | | 0.38 |
| Valor de Taninos (p.p.m) | | 220 |
| Número de Melazas | | 425 |
| Polvo % | | 0.30 max |
| Area superficial (Método N2 BET m ² / g) | | 600 |
| Diámetro promedio de poro, A | | 56 |
| Volumen de poro, ml / g | | 0.93 |
| Número de abrasión (NBS) | | 80 |
| Densidad Lavado y Drenado gr/cc | | 0.35 |
| Tamaño promedio de Partícula mm | | 1.3 |
| GRANULOMETRIAS DISPONIBLES: | | |
| + M 8 | 5 % máx. | 2 % |
| - M 30 | 5 % máx. | 2 % |



CERTIFICADO DE ANALISIS

Material: Powdered Activated Carbon
Product Name: CarboActive K-500
Commercial Invoice Number: 2201
Lote Number: 6825
Total Net Weight: 2000 kg
Produced on: 07/2015
Expire date: N/A
Shipment date: 07/08/2015

| Test Parameter | Lot Number |
|---|------------|
| | 6825 |
| 1. Número de Iodo. Mg/g | 986 |
| 2. Humedad % | 2.24 |
| 3. Densidad aparente. g/cm ³ | 0.48 |
| 4. Retenciones #8 Mesh % | 0.30 |
| 5. Pasante #30 Mesh% | 1.75 |
| 6. Cenizas, % | 8.9 |

ANEXO G

Requisitos del carbón activado por la norma INEN 1991:2013

| REQUISITOS | UNIDAD | POLVO | | GRANULAR | | MÉTODO DE ENSAYO |
|---------------------------|-------------------|-------|-----|----------|-----|------------------|
| | | MÍN | MÁX | MÍN | MÁX | |
| Humedad | % m/m | - | 12 | - | 12 | NTE INEN 1 985 |
| Densidad aparente | g/cm ³ | 0,20 | - | 0,20 | - | NTE INEN 1 986 |
| Cenizas totales | % m/m | - | 12 | - | 12 | NTE INEN 1 987 |
| Superficie específica BET | m ² /g | 600 | - | 600 | - | NTE INEN 1 990 |
| Dureza | % m/m | - | - | 90 | - | NTE INEN 1 989 |
| Número de yodo | * mg/g | 600 | - | 600 | - | NTE INEN 1 988 |

* miligramos de yodo por gramo de carbón activado.

ANEXO H

Pretratamiento de la materia prima



Activación química





Activación física



Pruebas de caracterización

Granulometría y Contenido de humedad



Determinación de pH



Contenido de cenizas y Densidad aparente



Número de yodo



Isoterma de Langmuir



Adsorción de Azul de metileno

