

**ACTIVACIÓN FÍSICA DEL RÁQUIS DE LA PALMA AFRICANA (ELAEIS
GUINEENSIS) PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO**

**OLGA LUCIA BAYONA AYALA
MELBA J. SÁNCHEZ SOLEDAD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

**ACTIVACIÓN FÍSICA DEL RÁQUIS DE LA PALMA AFRICANA (ELAEIS
GUINEENSIS) PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO**

OLGA LUCIA BAYONA AYALA

MELBA J. SÁNCHEZ SOLEDAD

Trabajo presentado como requisito para otorgar el título de químico

DIRECTOR

Msc. JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ

CODIRECTOR

PhD. EDGAR FERNANDO CASTILLO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2006

AGRADECIMIENTOS

A José Carlos por habernos brindado la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección, aportándonos conocimiento, y una amistad sincera.

Al profesor Claude Ewert y la profesora Rosa Claudia López, por aceptar evaluar este estudio y por sus sugerencias.

A los profesores Dr. José Antonio Henao, y Dr. Guillermo Gonzáles por su amistad sincera y su apoyo incondicional.

Al profesor Rafael Isaacs por su apoyo y compañía.

A la Dra. Elena Stashenko, del Laboratorio de Cromatografía, por su colaboración en los análisis de espectrometría de masas.

A los auxiliares Jorge, Adolfo, Chucho, Eduardo, Wilson, Alejandro y en especial a Jairito ya que tuvieron mucha paciencia y siempre estuvieron dispuestos para colaborar.

Al Dr. Rodrigo Torres por su gesto solidario

Agradezco de forma especial a todas nuestras compañeras de laboratorio de Química industrial, Bibiana, Carolina y Sandra por su solidaridad y compañerismo

A nuestros Compañeros y Amigos de la carrera por su compañía, y consejos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia en especial a mis padres Luis José y Alicia a mi abuelo Luis José (Q.E.P.D) quien no esta conmigo en este momento pero se que en mi corazón siempre me acompañara. A mi hermano José Luis, lo dedico a mis abuelas Alcira y Rosalina quienes supieron alcahuetear a su nieta.

A todos mis tíos en especial a Lilia y a Lucila.

A todos siempre los llevo en mi corazón

OLGA LUCIA BAYONA AYALA

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a todas las personas que me aportaron lo mejor de si mismos, para ayudarme a crecer como persona.

Mi familia

Mis amigas Sarita, Dianita y Eliana,

A mi director de Tesis.

Y al recuerdo de un ser querido Jenny López.

¡LOS LÍMITES NO EXISTEN!

MELBA J. SANCHEZ SOLEDAD

Título: ACTIVACIÓN FÍSICA DEL RÁQUIS DE LA PALMA AFRICANA (*ELAEIS GUINNENSIS*) PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO*

Olga Lucia Bayona, Melba J. Sánchez Soledad **

Palabras Claves: Pirolisis, activación física, ráquis.

El bagazo de la palma africana es un material lignocelulósico, obtenido en las plantas de tratamiento de aceite como subproducto de desecho, representando aproximadamente el 45% del total de la palma africana procesada. El uso y aplicación de estos materiales ha mantenido la atención de las autoridades ambientales y al sector privado empresarial ya que en los últimos años se han incrementado las exportaciones de palma africana, siendo los cultivos colombianos los primeros en Latinoamérica. Sin embargo de esta agroindustria solo se aprovecha alrededor del 10% quedando una gran cantidad de residuos, que van en aumento. Debido a la forma de procesar la palma, estos desechos causan un impacto ambiental negativo considerable en las regiones, ya que el bagazo no se utiliza directamente como abono orgánico, por que debe pretratarse para un compost.

En este trabajo, se estudió la preparación de carbones activados empleando como precursor residuos fibrosos de la industria aceitera (ráquis de palma africana), mediante activación "física" en dos etapas usando dióxido de carbono, y vapor de agua como agentes activantes a diferentes temperaturas (89 – 400°C) y variando los tiempos de activación (hasta 240 min.). El acondicionamiento de las muestras se hizo mediante astillado, molido, tamizado y secado al aire, con el fin de unificar su contenido de humedad, y el tamaño de partícula en un diámetro que vario entre 1mm y 2 mm.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. José Carlos Gutiérrez.

PHYSICAL ACTIVATION OF THE AFRICAN PALM TREE STALK (*ELAEIS GUNNENSIS*) TO OBTAIN ACTIVATED CARBON.*

Olga Lucia Bayona, Melba J. Sanchez Soledad **

Key words: physical activation, stalk, pirolisys

The African palm tree stalk is a ligniferous cellulose material, obtained in oil treatments plants as waste sub-product; such stalk represents approximately 45% of the processed palm tree. The use and application of those materials has kept the attention of environmental authorities and private business field for the reason that, in the last few years, importation of African palm tree has augmented, reaching one of the top places in Latin-American market. Nevertheless, only an insufficient 10 % from the total industry is being profitable, and the residual wastes from the processing increases. Those residual wastes from the palm tree processing cause a considerably negative environmental impact in the nearby regions due to the fact that the stalk is not properly used as organic manure because such stalk must be pre treated for compost.

In the following paper, the preparation of activated carbons was studied, using fibrous residual waste from oil industry as precursor (African palm tree stalk). This process was performed through physical activation in two stages: employing carbon dioxide and water vapor as activating agents at different temperatures (89 – 400 Celsius degrees) , and varying activation times (up to 240 minutes). The sample conditioning was carried out by means of chipping, grinding, sifting and air drying, so that it would be possible to unify its moisture content and particle size to a diameter that oscillated between 1 and 2 millimeters

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. José Carlos Gutiérrez

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Marco teórico	4
3.1. Carbón activado	4
3.1.1. Generalidades	4
3.2. Composición química del rquis	5
3.2.1. Palma africana	5
3.2.1.1. Celulosa	6
3.2.1.2. Hemicelulosa	7
3.2.1.3. Lignina	8
3.2.2. Sustancias de bajo peso molecular	9
3.2.2.1. Extractivos	9
3.2.2.2. Cenizas	9
3.3. Biomasa	10
3.3.1. Biomasa seca	11
3.3.2. Biomasa húmeda	11
3.4. Procesos termoquímicos	12
3.5. Producción de carbón activado	14
3.5.1. Materia Prima	15
3.5.1.1. Cáscara de coco	15
3.5.1.2. Madera	15
3.6. Proceso de activación utilizado	16
3.6.1. Activación física	16
3.6.2.1. Carbonización	16
3.6.2.2. Activación	17
3.7. Clasificación tamaño de poro	18
3.7.1. Microporos	19
3.7.2. Mesoporos	19

3.7.3. Macroporos	19
3.8. El fenómeno de adsorción	20
3.9. Propiedades del carbón activado	21
3.10. Utilización del carbón activado	21
3.10.1. En fase líquida	21
3.10.1.1. Carbón granular	22
3.10.1.2. Carbón Pulverizado	22
3.10.2. En fase gaseosa	23
3.11. Variables que afectan la adsorción en fase líquida	23
3.11.1. Temperatura	23
3.11.2. pH	23
3.11.3. Tamaño de partícula del carbón	24
3.12. Problemática de las curtiembres	24
3.13. Desechos de galvanoplastia	25
3.13.1. Qué es este desecho?	25
3.13.2. Por qué este desecho es considerado peligroso?	25
3.13.3. Por qué este desecho debe ser manejado de manera segura?	25
4. Diseño metodológico	26
4.1. Tratamiento físico	26
4.2. Tratamiento térmico del material	27
4.2.1. Activación física	28
4.3. Medición de la capacidad de adsorción del carbón activado	29
4.3.1. Índice de azul de metileno	29
4.3.2. Adsorción de iones Cr, Pb, Cu, Zn por el carbón	30
4.3.3. Índice de Yodo	31
4.4. Determinación del poder de combustión	32
4.4.1. Materiales y equipos	33
4.4.2. Procedimiento	33
5. Resultados y análisis de resultados	34
5.1. Humedad y cenizas	34

5.2. Etapa de carbonización	35
5.3. Poder adsorbente	36
5.4. Activación utilizando CO ₂ y vapor de agua como ases activantes	42
5.5. Análisis del infrarrojo	51
5.6. Adsorción de iones	56
5.7. Determinación del Poder calorífico de los carbones	62
5.8. Índice de Yodo	62
5.9. Ventajas del proceso	64
5.10. Balance de materia	64
6. Discusión de resultados	66
7. Conclusiones	68
8. Recomendaciones	70
9. Bibliografía	71
10. Anexos	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Determinación de humedad, cenizas y carbón fijo.....	37
Tabla 2. Propiedades del carbón comercial.....	37
Tabla 3. Material volátil y carbón fijo del carbón obtenido.....	38
Tabla 4. Soluciones de azul de metileno.....	39
Tabla 5. Distribución del tamaño de partícula.....	39
Tabla 6. Espectros IR para las breas	47
Tabla 7. Bandas del infrarrojo par el carbón obtenido.....	50
Tabla 8. Capacidad adsortiva de carbones C9 y C10 con iones Cr^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.	52
Tabla 9. Capacidad adsortiva de carbones C9 y C10 con iones Cu^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM	52
Tabla 10. Capacidad adsortiva de carbones C9 y C10 con iones Pb^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.	53
Tabla 11. Capacidad adsortiva de carbones C9 y C10 con iones Zn^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.	53
Tabla 12. pH de los patrones de 15 ppm y. pH final de los patrones mas carbón...	54
Tabla 13. Poder calorífico.....	57
Tabla 14. Determinación del índice de yodo	57
Tabla 15. Balance de materia del proceso.	

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1	Representación esquemática de los principales grupos superficiales de un carbón activado	5
Fig. 2.	Estructura de la cadena de celulosa.....	7
Fig. 3.	Estructura de la pared celular.	8
Fig. 4.	Representación esquemática del sistema poroso de un carbón.	9
Fig. 5.	Material de partida: ráquis de palma africana.....	19
Fig. 6.	Reactor parte interna	29
Fig. 7.	Montaje de activación con CO ₂ o vapor de agua.....	30
Fig. 8.	Carbón activado obtenido sin pulverizar.	34
Fig. 9.	Soluciones patrones de azul de metileno.....	38
Fig.10.	Adsorción con azul de metileno.....	38
Fig. 11.	Oxidación de las breas recogidas en el proceso de activación.....	46
Fig. 12.	Espectro infrarrojo para las breas obtenidas en la reacción.....	47
Fig. 13.	Quinonas policíclicas.....	48
Fig. 14.	Oxidación de fenoles a quinonas.....	48
Fig. 15.	Breas en diferentes solventes.	49
Fig. 16.	Espectro infrarrojo para el carbón activado obtenido en el laboratorio.	50
Fig. 17.	Proceso auto – térmico.....	59

LISTA DE GRAFICAS, ESQUEMAS Y ANEXOS

Grafico 1. Influencia del tiempo de activación con vapor de agua como gas activante en carbones de tamaño ≥ 0.14 mm (malla N°100).....	42
Grafica 2. Influencia del tiempo de activación con vapor de agua con gas activante en carbones de tamaño 0.14 – 0.037 mm (100 – 400).....	42
Grafica 3. Influencia del tiempo de activación utilizando vapor de agua como gas activante en carbones de ≤ 0.037 mm (malla N° 400).	42
Grafica 4. Actividad del C6 con diferentes tamaños de grano.	44
Grafica 5. Actividad del C9 con diferentes tamaños de grano.	44
Grafica 6. Actividad del Analítico con diferentes tamaños de grano.	
Esquema 1. Biomasa para energía.	11
Esquema 2. Procesos termoquímicos.....	12
Esquema 3. Pirolisis.....	13
Esquema 4. Reacciones que se llevan a cabo a temperaturas comprendidas entre 1000 – 1200 K (wigmans, 1989).....	18
Esquema.5 Diagrama de los diferentes procesos que pueden tener lugar en la activación térmica.....	27
Esquema 6. Diagrama de flujo del proceso.....	59
Anexo I. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≤ 0.14 mm (malla N° 100).....	70
Anexo II. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≥ 0.037 mm.	72
Anexo III. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano 0,14 - 0.037mm.	74
Anexo IV Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano	

≥ 0.14 mm (malla N° 100).....	76
Anexo V Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano 0.14 – 0.037 mm.	76
Anexo VI. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≤ 0.037 mm.	77
Anexo VII. Curvas de calibración para adsorción atómica de los iones Cr ⁺⁺ , Pb ⁺⁺ , Cu ⁺⁺ ,Zn ⁺⁺	78
Anexo VIII: Curva de calibración para el azul de metileno.	79
Anexo IX curvas de calibración para el Mg y el Ca.....	

INTRODUCCIÓN

El carbón activado se introdujo en la industria a principios de siglo y en la actualidad es uno de los materiales adsorbentes de mayor utilización. Su producción anual a escala mundial se estima en varios millones de toneladas y se pronostican incrementos notables en su demanda en los próximos años, al ser usado como agente de la descontaminación ambiental.

A nivel nacional el carbón activado se utiliza en una serie de procesos tales como: decoloración de licores en la producción de azúcar refinada, adsorción de sustancias colorantes, adsorción de sustancias para el mejoramiento de la calidad de las bebidas, en medicina y la industria farmacéutica, en la potabilización del agua, en el tratamiento de efluentes residuales textiles, en la biotecnología, en la adsorción de vapores orgánicos, en las máscaras antigases y en tratamiento industrial de gases y vapores, con vistas a la eliminación de sustancias contaminantes, y también para mejorar el color y sabor de muchos productos alimenticios.

En Colombia existen muchos materiales lignocelulósicos que constituyen desechos de diferentes industrias, tales como el aserrín de madera, el bagazo de la caña azúcar, la cáscara de arroz, el cascarón de coco y el ráquis de palma africana entre otros. En todos estos casos los volúmenes obtenidos son altos, llegando a constituir un problema ambiental.

Así mismo, el desarrollo de procesos que permitan el uso de los desechos agroindustriales, en la obtención de productos valiosos y que se caractericen por ser de alta productividad y bajo consumo de materiales y energía, constituye una tarea prioritaria dentro de la política económica del país, a la vez que se evita que los mismos se conviertan en un problema de contaminación ambiental.

Irónicamente, la mayor parte del carbón activado se importa en Colombia a pesar de que el país posee los mejores precursores. “Lograr sustituir el producto importado y abrirse paso en los mercados internacionales es un reto que se viene afrontando mediante el desarrollo de procesos de activación que generen un buen producto a precios competitivos”, (Perez, 2004)

El método más difundido en la obtención de carbones activados a partir de recursos biomásicos suele denominarse “activación física”. Este consta de dos etapas, la pirólisis del residuo para obtener un sólido con alto contenido de carbono fijo y la posterior gasificación (activación) del mismo, utilizando un agente oxidante débil, vapor de agua o CO_2 (Villanazo, 1981). Uno de los retos más grandes es el uso eficiente de la energía que se utiliza, debido a que esta representa el mayor costo operativo.

En este trabajo se examina la factibilidad de producir carbones activados a partir de residuos de la industria por activación física, utilizando CO_2 y vapor de agua como gases activantes; teniendo en cuenta la influencia de los gases activantes, la temperatura y el tiempo de activación sobre la capacidad de adsorción de los productos obtenidos.

2. ANTECEDENTES

El uso medicinal del carbón vegetal fue descrito ya en 1550 a.C es un antiguo papiro egipcio y posteriormente por Hipócrates y Plinio el viejo. Los productos descritos en aquel tiempo y 18 siglos después son de efectividad variable e incluían madera, sangre y carbones de procedencia animal. La decoloración de soluciones de azúcar por el carbón de huesos, se efectuó comercialmente en Inglaterra en el año de 1811.

Los métodos de obtención de los carbones decolorantes a partir de material vegetal fueron principalmente expuesto en patentes británicas en 1856 – 1863. Los primeros carbones activados producidos industrialmente en el verdadero sentido de la palabra, fueron carbones de colorantes Eponit que han sido manufacturados desde 1909 conforme la patente de R. V. Ostrejko, mediante el calentamiento del carbón vegetal con vapor de dióxido de carbono en un horno específicamente diseñado con este propósito.

En 1911 en los países bajos, Norit. NV empezó la activación comercial de la turba usando vapor. En los estados Unidos durante la primera guerra Mundial, se desarrollo la activación del carbón de cáscaras de coco para mascarar de gas.

Las muchas y variadas aplicaciones del carbón activado son ampliamente ilustradas por la existencia de más de 1500 patentes de manufactura a nivel mundial (Ullmann's, 1986).

3. MARCO TEORICO

3.1. CARBÓN ACTIVADO

3.1.1. Generalidades

El carbón activado es el carbón obtenido después de ser sometido a varios procesos fisicoquímicos, que tiene la propiedad de poseer un gran poder de adsorción debido a la alta porosidad de su superficie molecular lo cual permite que una gran variedad de productos se fijen como mayor o menor fuerza sobre ella, formando una especie de película que permanece adherida sobre el carbón. (Hassler, 1963).

Éste se obtiene al ponerse en contacto el material crudo con Dióxido de Carbono o vapor de agua, a temperaturas que oscilan alrededor de 1200 K (900 °C). En el proceso se liberan diferentes sustancias en forma gaseosa, convirtiéndose el sólido en un producto de alta porosidad lo que permite el desarrollo de una alta superficie específica. El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; en la figura 1 se observa los grupos funcionales característicos de la superficie de un carbón, esta es extremadamente porosa y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1500 m²/g.

Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseables; la diferencia con un carbón activado consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción. En otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en “multiplicar” el área superficial. Es importante mencionar que el área superficial del carbón activado es interna; para una idea más clara de la magnitud de la misma, imagínense un gramo de carbón en trozo el cual se molerá muy fino para incrementar su superficie, como resultado se obtendrá un área aproximada de 3 – 4 m², en cambio, al activar el carbón se logra multiplicar de 200 a 300 veces este valor.

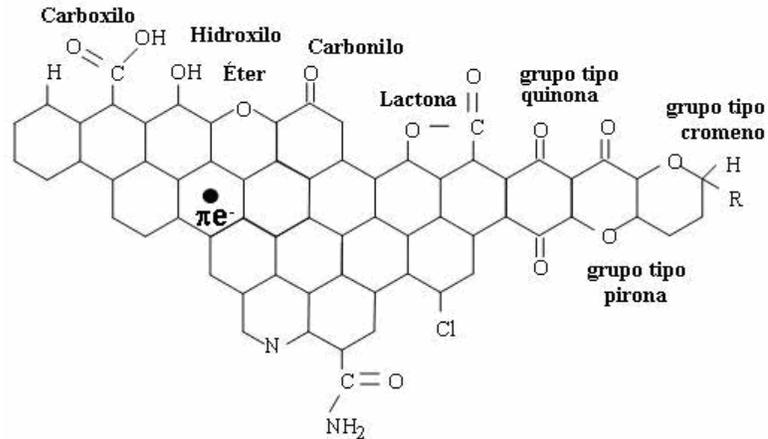


Fig. 1 Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse un carbón. La mayoría de estos grupos son grupos oxigenados, debido a la tendencia de los carbonos a oxidarse incluso a temperatura ambiente. Los electrones deslocalizados de los orbitales π juegan un papel muy importante en la química superficial de los carbonos.

Por todo ello, cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla (El misterio del carbón activado, 1992).

3.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RÁQUIS DE LA PALMA AFRICANA.

3.2.1. Palma africana

Familia: Arecaceae (Palmae). Nombre común: Palmera del aceite. Lugar de origen: Palmera nativa de África Central y Oriental. Etimología: *Elaeis*, del griego *elaia* = olivo, por su aceite. *Guineensis* = procedente de Guinea.

Palmera monoica con tronco solitario de 10 – 15 m de altura y 30 – 60 cm de diámetro cubierto de cicatrices de las hojas viejas. Hojas pinnadas de 4 – 5 m de longitud, con 100 – 150 pares de folíolos de 50 – 100 cm de longitud, con el nervio central marcado.

Se insertan en el ráquis en varios planos, dándole a la hoja aspecto plumoso. Son de color verde en ambas caras. Pecíolo de 1 – 1,5 m de longitud con los folíolos de la base convertidos en espinas y con fibras. Inflorescencia corta pero muy densa, de 10 – 30 cm de longitud, naciendo de las axilas de las hojas inferiores. Frutos ovoides, muy abundantes, dispuestos en racimos con brácteas puntiagudas. Son de color rojizo y de hasta 4 cm de diámetro.

Se multiplica por semillas, que tardan 8 – 9 meses en germinar. Por la fermentación de sus frutos se obtiene el aceite de palma, utilizado en la fabricación de margarinas, helados, productos de belleza, lubricantes, etc.

En Colombia existen importantes fuentes de recursos agrícolas tal es el caso del aceite de palma. Actualmente Colombia es el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo, la expansión del cultivo ha mantenido un crecimiento sostenido.

En los últimos años el total de las exportaciones de palma africana ascendió a US\$ 59.7 millones, aportando el 60.7% de las exportaciones totales del país (US\$ 98.3 millones). Sin embargo de esta agroindustria solo se aprovecha alrededor del 10% quedando una gran cantidad de residuos, que van en aumento. Debido a la forma de procesar la palma, estos desechos causan un daño ambiental considerable en las regiones, ya que el ráquis no se utiliza directamente como abono orgánico, por que debe pretratarse para un compost (Genty, 1984; Quevedo, 2000; Bernal, 1973).

La composición Química del ráquis es bastante heterogénea, consistiendo principalmente de tres materiales poliméricos: celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos materiales están compuestos por moléculas de gran tamaño que constituyen del 95 al 98 % de la pared celular. El restante 2 – 5% son componentes de bajo peso molecular denominados extractivos, la cantidad de estos componentes varía considerablemente entre maderas duras y blandas (Goldstein, 1977).

3.2.1.1. Celulosa

Es el componente mayoritario de los materiales lignocelulósicos. Base estructural de las células vegetales, es la sustancia natural más importante, tanto por su abundancia como por su aprovechamiento tecnológico. Actualmente es la base de muchos productos de interés industrial (papel, fibras, aditivos, etc.)

La celulosa de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$ es un homopolímero lineal constituido por unidades de β – glucosa unidas entre sí por enlaces 1 – 4. Estas moléculas se pueden hidrolizar con dificultad en medios catalizados por ácido. Entre las principales propiedades fisicoquímicas de la celulosa se encuentran el índice o grado de polimerización, la cristalinidad y la porosidad (Browning, 1967; Stone et al., 1967; Sjöström, 1981; Fan et al., 1982; Blanch et al., 1983; Thonart et al., 1983).

La cadena de celulosa es alargada y la unidades de glucosa están dispuestas en un solo plano debido a la presencia del anillo glicosídico y a su conformación (Fengel y Wegener, 1984). La configuración más estable es en forma de silla con los grupos hidroxilos en posición ecuatorial como se observa en la figura 2. Los grupos hidroxilo, OH, que se encuentran en los dos extremos de la cadena muestran un comportamiento diferente.

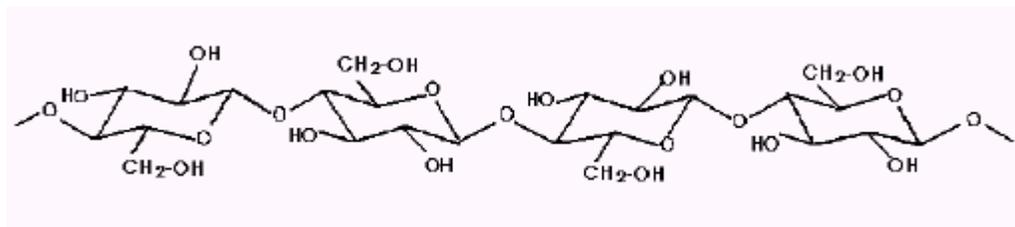


Fig. 2. Estructura de la cadena de celulosa

3.2.1.2. Hemicelulosa

Se engloban dentro de esta denominación el resto de los polisacáridos que se encuentran en los lignocelulósicos además de la celulosa. Las hemicelulosas, a diferencia de la celulosa están compuestas de diferentes azúcares formando cadenas mas cortas y con ramificaciones. Los azúcares que forman las poliosas se pueden dividir en diferentes grupos como las pentosas (xilosa, arabinosa), hexosas (glucosa, manosa, galactosa), ácidos hexurónicos (ácidos glucourónico, metilglucourónico y galacturónico) y deoxihexosas (ramnosa y fructosa).

En el caso de madera se puede apreciar en la figura 3 una mayor cantidad de manosa y galactosa en las coníferas, mientras que la xilosa y los grupos acetil son más abundantes en las frondosas (Fengel y Wegener, 1984; Wenzl, 1970).

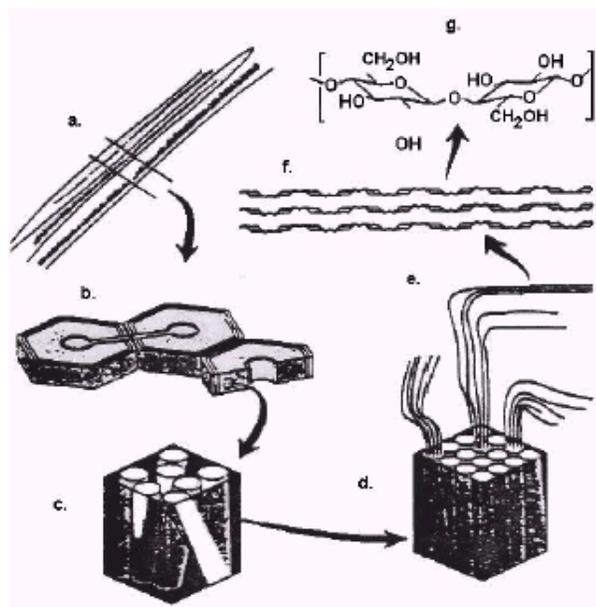


Fig. 3. Estructura de la pared celular. a) Fibra vegetal; b) Sección de fibra Mostrando las células; c) Fragmento de la pared secundaria donde aparecen las Macrofibrillas de la celulosa y el espacio interfibrillar; d) Fragmento de la macrofibrilla donde se visualizan las microfibrillas celulósicas; e) cadenas individuales de celulosa; f) Fragmentos de la cadena celulósica y g) unidad repetitiva de celobiosa.

3.2.1.3. Lignina

Después de la celulosa, la lignina es el polímero más abundante en el mundo vegetal y su función es asegurar protección contra la humedad y los agentes atmosféricos además de actuar como elemento aglomerante de las fibras. Es un componente característico de las plantas superiores (gimnospermas y angiospermas), aparecen típicamente en los tejidos vasculares, especializados en el transporte de líquido y en dar resistencia mecánica (Fengel y Wegener, 1984).

Químicamente la lignina es un polímero tridimensional amorfo constituido a partir de unidades fenilpropano que se unen entre sí por enlaces tipo alquil – aril – éter o carbono – carbono (Fiechter, 1983; García, *et al.*, 1984). La estructura y composición, así como su contenido relativo en el material lignocelulósico, dependen de las diferentes especies.

Además las ligninas provenientes de los dos tipos de material presentan también algunas diferencias estructurales.

3.2.2. Sustancias de bajo peso molecular

Estos componentes se encuentran proporcionalmente en menor cantidad pero tienen gran influencia en las propiedades y procesamiento de los materiales lignocelulósicos. Protegen a la madera de los insectos, inhiben el blanqueo de las pastas de celulosa y son responsables del dar olor, color y gusto a la madera. Pertenecen a diferentes clases de compuestos químicos pero simplificando se pueden dividir en dos tipos.

3.2.2.1. Extractivos

Son los componentes orgánicos de bajo peso molecular. Se llaman así porque se pueden extraer de la madera por lavado con agua o con solventes orgánicos. Se incluyen dentro de este grupo carbohidratos de bajo peso molecular, terpenos, ácidos alifáticos y aromáticos, alcoholes, flavonoides, taninos, alcaloides, ligninas solubles y

ceras, entre otros. Sus funciones en la célula vegetal son de protección exterior y reserva de nutrientes (Coppen, 1993).

3.2.2.2. Cenizas

Son las sustancias inorgánicas que se pueden determinar por incineración del material entre 800 y 1000 K (527°C – 727°C). Fundamentalmente son las sales inorgánicas de calcio, potasio y magnesio, así como sílice en las maderas tropicales. Forman carbonatos, fosfatos, oxalatos y silicatos (Fengel y Wegener, 1984; Anglés et al., 1997).

BIOMASA

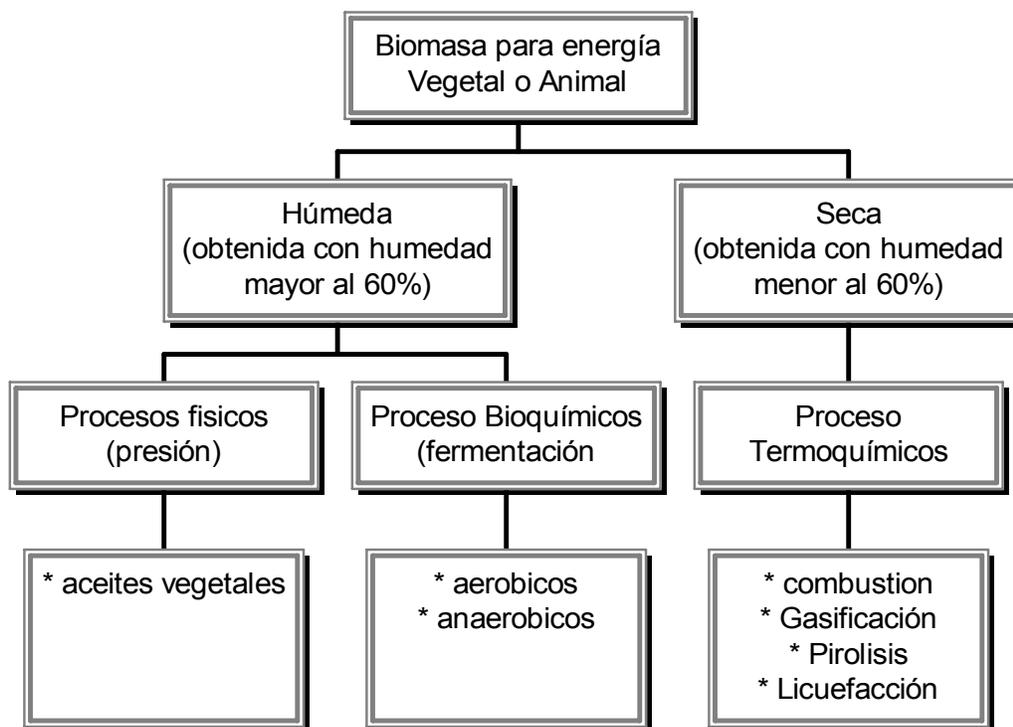
Se denomina biomasa a toda la materia orgánica que se encuentra en la tierra. Como fuente de energía presenta una enorme versatilidad, permitiendo obtener mediante diferentes procedimientos, combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, de origen vegetal o animal, que incluye los materiales que proceden de la transformación natural o artificial. Cualquier tipo de biomasa proviene de la reacción de la fotosíntesis vegetal, que sintetiza sustancias orgánicas a partir del CO₂ del aire y de otras sustancias simples, aprovechando la energía del sol.

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, en los sistemas de calefacción para el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. La biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos

volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO , H_2) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa.

El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así, normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda, en el esquema 1 se observa el aprovechamiento de la biomasa para la producción de energía. En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos lignocelulósicos, 2000 – 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente entre 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos (Padilla, 1998).



Esquema 1. Biomasa para energía

3.3.1. Biomasa seca

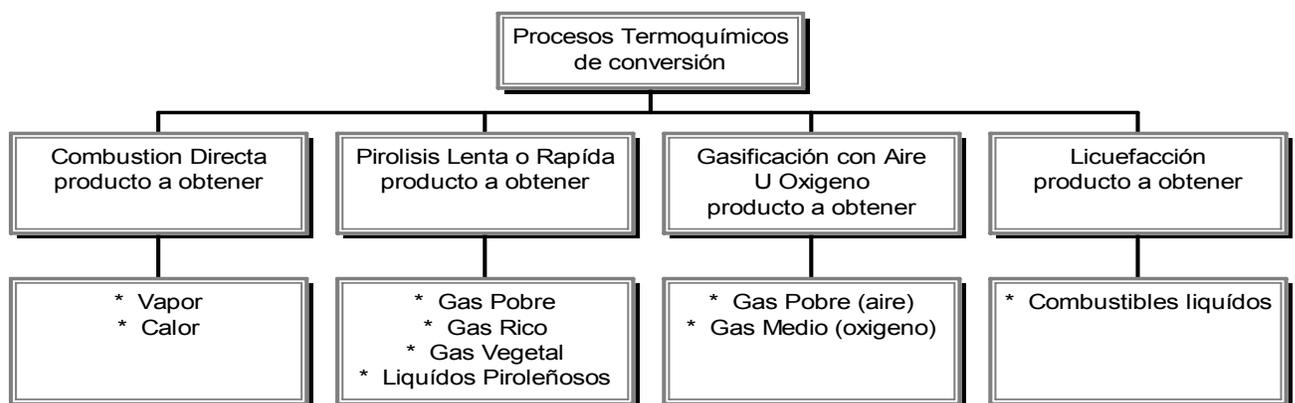
Aquella que puede obtenerse en forma natural con un valor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos termoquímicos o fisicoquímicos, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

3.3.2. Biomasa húmeda

Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos químicos, o en algunos casos particulares, mediante simples procesos físicos, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.

3.4. PROCESOS TERMOQUÍMICOS

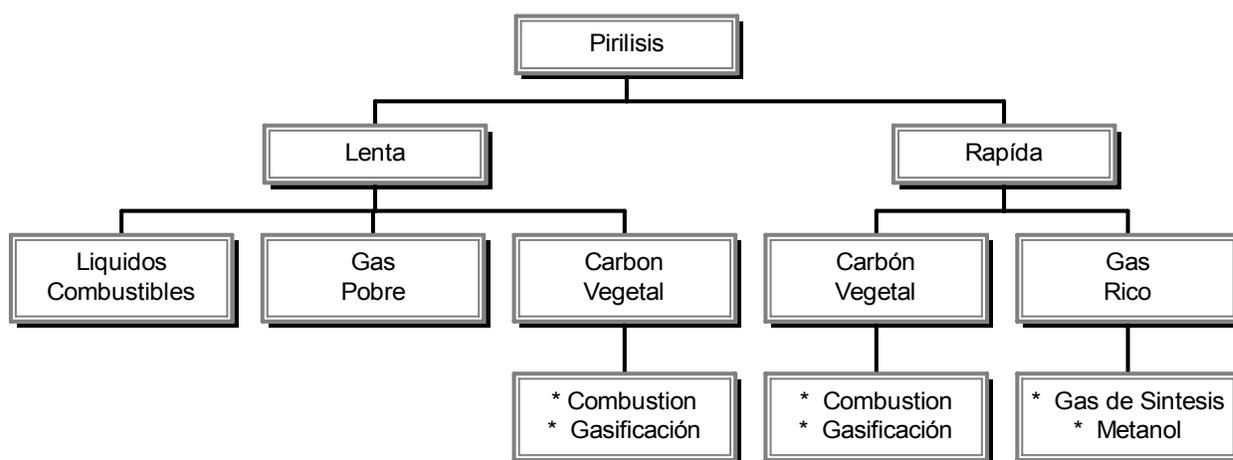
Comprenden básicamente la combustión, gasificación y pirolisis, encontrándose aún en etapa de desarrollo la licuefacción directa; en el esquema 2 se encuentra el cuadro de procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía.



Esquema 2. Procesos termoquímicos

Pirolisis

La pirolisis puede llevarse a cabo a distintas velocidades de calentamiento, distinguiéndose así la pirolisis lenta, y rápida, la primera, también conocida como pirolisis convencional o carbonización, ocurre a temperaturas entre 670 y 8730K (400°C – 600 °C), con tiempos de residencia de horas y días. La pirolisis convencional, puede llevarse a cabo en tiempos hasta de 30 minutos, en el Esquema 3 se diferencia la pirolisis rápida y la lenta al igual que los productos obtenidos (Beenackers, A.A.C.M., 1989).



Esquema 3. Pirolisis

La fase mas importante de la pirolisis de la madera se da en el intervalo de 520 K a 620K (250°C – 350°C) dando lugar la fase cuantitativa, completándose en este intervalo la descomposición térmica de la hemicelulosa y en su mayor parte la celulosa (Cordero, T. y col., 1989), (Zanzi, R. y col.1996). Las reacciones principales consisten en rupturas de enlaces glicosídicos con la consiguiente depolimerización parcial del componente celulósico de la madera (Shafyzadeh, F., 1984; Soltes, E.J., 1981).

Durante la carbonización se lleva a cabo la reorganización de los átomos de carbono en estructuras microcristalinas tipo grafito. A medida que aumenta la temperatura, los compuestos primarios se polimerizan independientemente que el material original tenga cadenas alifáticas o aromáticas, se origina un sistema planar de moléculas tipo benceno condensadas, formándose así un sólido como resultado de las uniones C – C entre

planos vecinos. Desde 670 hasta 970K (400 °C – 700°C) estos sistemas condensados crecen gradualmente.

Entre 970K y 1070 K (700°C – 800°C), muchos de los átomos de hidrógeno y los grupos hidrocarbonados son eliminados, dejando pequeños cristalitas con estructura similar al grafito lo que coincide con una drástica reducción de la resistividad eléctrica (Dougall, Mc J.S., 1991), o un mayor ordenamiento observado por Difracción de Rayos X (XRD). Si la carbonización se efectúa por encima de 1270 K (1000 °C), la reactividad disminuye, pues se destruyen los centros activos en la superficie, el número de átomos en las aristas es reducido por reordenamiento, las dislocaciones desaparecen y los heteroátomos abandonan la estructura en gran medida por volatilización de compuestos de nitrógeno y oxígeno (Van Heek, K.H., 1991), sobre todo por debajo del 50 % de pérdida por combustión. De igual forma a altas temperaturas el proceso es rápido y el rendimiento de carbón es menor.

El residuo sólido (carbón) de la carbonización constituye el producto de mayor interés comercial de la pirolisis de la madera, aunque resulta también de gran valor el aprovechamiento de los gases.

En particular, el proceso de pirolisis lenta resulta conveniente cuando se requieren altos rendimientos del producto sólido resultante de este proceso, caracterizado por su alto contenido de carbono. Este puede emplearse directamente como combustible, o bien someterse a procesamientos ulteriores, para obtener productos de mayor utilidad y/o valor agregado, entre ellos carbones activados (Bridgewater y Grassi, 1991; Cukierman et al., 1996; Rashid Khan, 1996).

3.5. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Las características específicas de los distintos tipos de carbones activados dependen principalmente de la materia prima y del proceso de activación utilizado.

Es importante mencionar que de una misma materia prima que sea activada por procesos diferentes dará como resultado carbones con propiedades diferentes.

El proceso de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbono en anillos tipo benceno para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, en otras palabras, la activación consiste en “multiplicar” la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable.

3.5.1. Materia prima

Los materiales utilizados en la fabricación de carbón activado a escala industrial incluyen cáscara de coco, carbón mineral, madera y turba entre otro.

3.5.1.1. Cáscara de coco

Contiene alrededor del 75% de materia volátil y humedad, la cual puede ser eliminada en los sitios de procedencia por carbonización parcial. La estructura lignocelulósica de la cáscara de coco determina la obtención de un producto con rendimientos normales de 30 – 40% sobre la base carbonizada, con una superficie interna muy grande constituida por poros, muchos de ellos de dimensiones moleculares.

3.5.1.2. Madera

La madera es una materia prima útil cuyo carbón puede ser activado utilizando vapor, dióxido de carbono o mediante aplicación de sustancias químicas (ácido fosfórico y cloruro de Zinc), dependiendo del uso requerido.

El mejor producto obtenido es fabricado comúnmente mediante activación química con ácido fosfórico, el cual da un carbón con una superficie compuesta por poros de dimensiones moleculares apropiados para la decoloración de materiales en solución. El carbón está finamente dividido y como es elaborado a partir de materiales de desecho es relativamente económico (Ullmann's, 1986).

Existen algunos criterios que se deben tener en cuenta para seleccionar el material carbonáceo a ser usado como materia prima, entre los cuales se tienen (Rodríguez y Linares, 1984):

- El porcentaje de rendimiento del carbón
- Bajo contenido de sustancias inorgánicas
- El volumen y costo de materia prima
- Existencias de reservas de la materia prima en el país
- Facilidad de manejo y procesamiento.
- Tiempo de vida del material de partida

Los procesos termoquímicos, combustión, y pirólisis, constituyen probablemente la alternativa de mayores posibilidades de implantación industrial a corto plazo en relación al uso de estos residuos (Rodríguez, et al, 1990).

3.6. PROCESO DE ACTIVACIÓN UTILIZADO

3.6.1. Activación Física

La activación física se puede llevar en dos etapas que pueden ser separadas y consecutivas o simultáneas; y son el proceso de carbonización y el de activación.

3.6.1.1. Carbonización

La carbonización como etapa previa en la obtención de carbón activado consiste en someter la materia prima a una pirolisis a temperaturas entre 670k – 1070k (400°C – 800 °C), en una atmósfera inerte. Este proceso tiene como objeto eliminar el material volátil generando una porosidad significativa, usualmente es previo a la activación.

Durante la carbonización la mayor parte de los elementos no carbonáceos son removidos por la descomposición pirolítica del precursor y el producto carbonizado está formado por cristales graníticos elementales más o menos desordenados, con una estructura porosa pobremente desarrollada (Rodríguez y Linares, 1989).

En el transcurso de la carbonización se elimina casi todo el hidrógeno y el oxígeno, el carbono restante cristaliza con formaciones irregulares cuyos intersticios están parcialmente rellenos de alquitrán de madera. Esta agrupación de los intersticios da como resultado que el producto carbonizado tenga una capacidad de adsorción relativamente baja (Smiseck, 1970).

3.6.1.2. Activación

La finalidad de la activación es limpiar con el agente activante a elevadas temperaturas los espacios rellenos con sustancias derivadas de la composición de los alquitranes,

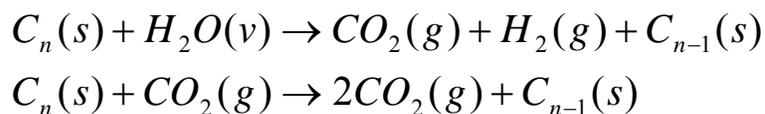
aumentando así sus dimensiones que ahora quedan libres de toda inclusión (Smiseck, 1970).

Durante el proceso de activación se produce una purificación de los componentes carbonáceos menos organizados en los espacios que existen entre los cristales elementales, y al mismo tiempo, se efectúa una remoción parcial de las partículas de carbono que constituyen su estructura cristalina (Rodríguez y Linares, 1989).

Un largo tiempo de activación produce mayor poder adsorbente. Puesto que el proceso de activación implica una pérdida de carbón, existe un punto mas allá del cual no resulta económico prolongar la activación (Kirk-othemer, 1978).

La activación física es la gasificación parcial del carbonizado obtenido en la etapa anterior con vapor de agua, dióxido de carbono, aire o una combinación de éstos a temperatura alrededor de 1070K – 1270K (800°C – 100°C), cuyo objetivo es remover material desorganizado y debido a esto los cristales elementales son expuestos a la acción del agente activante para el desarrollo de la porosidad.

La reacción básica del carbonizado con vapor de agua y dióxido de carbono son endotérmicas, de la siguiente forma observada en el Esquema 4



Esquema 4. Reacciones que se llevan a cabo a temperaturas comprendidas entre 1000 – 1200 K (wigmans, 1989).

3.7. CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO DE PORO

Las propiedades más importantes a considerar al seleccionar un carbón son el diámetro de los poros y las características de los mismos, en la figura 4 se observan los

diferentes tamaño de poros por los que esta constituido un material poroso como el carbón activado.

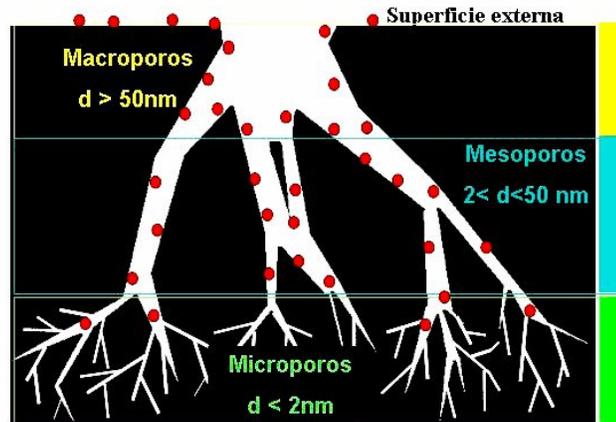


Fig. 4. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño (d = dimensión característica del poro). Los círculos representan las moléculas del adsorbato

Los poros de un carbón activado se clasifican en tres, de acuerdo a su tamaño:

- Microporos
- Mesoporos
- Macroporos.

3.7.1. Los microporos

Son poros con un radio de 20 \AA ó menos y son los que más área proporcionan. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas, que generalmente se encuentran presentes en purificaciones de gases. Constituyen la mayor parte de la superficie interna de un carbón activado y consecuentemente, en ellos es donde se lleva a cabo la mayor parte de los procesos de adsorción. Dependiendo de las condiciones de activación los microporos pueden representar de un 90 – 95% del área superficial total de un carbón activado (Rodríguez y Linares, 1984).

3.7.2. Los mesoporos

Los cuales son ramificaciones de los macroporos, sirven como pasajes hacia los microporos, siendo en ellos donde ocurren los fenómenos de condensación capilar responsable de las histéresis en la isoterma de adsorción. Están en el rango de 20 – 500 Å y aunque su contribución al área total es menor que los microporos, su tamaño les permite adsorber moléculas grandes que por lo general están presentes en purificaciones de líquidos.

3.7.3. Los macroporos

Los macroporos de un carbón activado actúan como poros transportadores permitiendo que las moléculas de la sustancia adsorbida alcancen los poros más pequeños situados en el interior de las partículas del carbón. Casi no contribuyen al área total de un carbón pero su importancia radica en que actúan como vías de acceso a los poros medios y microporos, afectando la velocidad de Difusión de las impurezas en el carbón.

Desafortunadamente el área total y el tamaño de los poros no son fáciles de medir, y en consecuencia se suelen utilizar algunos índices como:

- El índice de iodo.
- El índice de melaza.
- El índice de azul de metileno.

Estos índices nos dan una idea de que tan fácil se adsorben las moléculas de distintos tamaños, por lo que podemos darnos una idea del tipo de poros que tiene un carbón. Normalmente es difícil que un carbón tenga poros de un solo tamaño, lo que Tiene es una determinada distribución.

Cuando la media se inclina hacia los microporos se dice que el carbón es de “fase gaseosa”; en caso contrario, el carbón será para “fase líquida”.

3.8. EL FENÓMENO DE ADSORCIÓN

Cuando las moléculas de un soluto entran en contacto con los poros internos del carbón (ocurre en poros un poco mas grandes que las moléculas a ser adsorbidas), son retenidas por la estructura interna del carbón por atracción electrostática y acumuladas sobre la superficie del sólido. (Norit, 2000).

Existen dos tipos de adsorción, durante la adsorción física el adsorbato se sitúa sobre la superficie entre los poros y se mantiene en él por fuerzas electrostáticas llamadas fuerzas de “Van Der Waals” y la adsorción química que involucra fuerzas de atracción relativamente fuertes muy parecidas a la energía de un enlace químico y el adsorbato forma complejos con la superficie del carbón (Norit, 2000).

3.9. PROPIEDADES DEL CARBÓN ACTIVADO

Lo que comúnmente se cree es que a mayor área superficial, el activado es más eficiente, pero no siempre es así. Si las moléculas son grandes, así el carbón activado tenga una gran área superficial, estas no van a ser retenidas por los poros del carbón. De esta manera será necesario verificar el tipo de moléculas a ser adsorbidas para escoger el carbón que mas se adapte a estas necesidades. El área superficial nos da una idea acerca de la calidad del carbón, pero no nos indica si es bueno o no en cierto tipo de aplicaciones.

El volumen total de poros se refiere a todo el espacio que esta dentro de la partícula del carbón y que sirve para retener moléculas de adsorbato; es expresada en mg/L.

3.10. UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.

Hay dos tipos comerciales de carbón vegetal activado que se distinguen por los términos de fase gaseosa o de fase líquida por que suelen utilizarse con gases o con líquidos respectivamente.

3.10.1. En fase líquida (hasta 1000 m²/g)

Son polvos ligeros y sedosos que se utilizan principalmente para decolorar líquidos y que se obtiene de los huesos, de la madera, de la turba, del lignito y de los residuos de la fabricación de papel (lignina). Existen dos formas de utilizar el carbón activado:

- Usando carbón activado pulverizado.
- Usando carbón activado granular.

Ambos carbones tienen características específicas que les hace ser más o menos convenientes para un caso específico. La selección de alguno de ellos lleva consigo la selección de la forma de aplicarlo.

3.10.1.1. Carbón granular.

Como se ha mencionado, la única diferencia entre un carbón granular y uno pulverizado es el tamaño de la partícula. De lo que se deriva que, el tiempo requerido para obtener el mismo resultado es mucho mayor con carbón granular, mismo que se utiliza siempre en una columna empacada a través de la cual fluye el líquido. Este tipo de operación es sobre todo recomendable en procesos continuos con una calidad estable de el licor a purificar y grandes flujos.

Tiene la ventaja de que el carbón se puede regenerar y en consecuencia los consumos son menores; sin embargo la inversión requerida es alta y no siempre se justifica.

3.10.1.2. Carbón pulverizado.

Al utilizar el carbón en polvo este se agrega al producto a purificar en un tanque con agitación para mantener una suspensión homogénea después de un tiempo de contacto adecuado, el carbón es removido por sedimentación o filtración. En este último caso es recomendable el uso de un filtro, para obtener una filtración más eficiente. De ser posible es recomendable tener un tanque pequeño en el cual se prepare una suspensión del carbón activado con agua o con un líquido limpio y se permita que el polvo se humecte perfectamente.

3.10.2. En fase gaseosa (de 1000-2000m²/g)

El carbón para fase gaseosa se compone de gránulos densos y duros que se utilizan principalmente para la adsorción de gases y vapores, que se obtienen de la corteza del coco, de la turba del carbón mineral y de los residuos del petróleo. Este carbón de fase gaseosa tiene menos aplicaciones y la mayoría de veces se puede regenerar, con lo cual puede seguir utilizándose durante muchos años (Earl, 1975).

3.11. VARIABLES QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN EN FASE LÍQUIDA

En términos generales las variables más importantes que afectan la adsorción son: Temperatura, p.H. y tamaño de partícula.

3.11.1. Temperatura

Una mayor temperatura generalmente permite llegar al equilibrio más rápidamente; sin embargo, la cantidad de impureza adsorbida es menor. Esto quiere decir que si el

tiempo no fuera importante, se podría lograr una mayor adsorción a menor temperatura; lo cual rara vez es práctico a nivel industrial, por lo que aumentar la temperatura cuando es posible, generalmente resulta benéfico.

3.11.2. pH

Muchos compuestos coloreados, varían su estructura y su color al cambiar el pH. En la mayoría de los casos la decoloración a pH más bajos es más eficiente por 2 razones:

- Los compuestos que generan color normalmente tienen una alta dependencia con el pH, siendo menos intenso a pH menor.
- Posiblemente la adsorción es más eficiente a pH más bajo.

Cuando se tiene certeza del comportamiento, es mejor no modificar el pH y buscar un carbón activado con pH cercano al proceso.

3.11.3. Tamaño de partícula del carbón.

Como ya se mencionó, el área del carbón es interna y en consecuencia el tamaño de la partícula no tiene efecto sobre la capacidad adsorptiva del carbón. Sin embargo, sí tiene efecto sobre la velocidad para alcanzar el equilibrio.

3.12. PROBLEMÁTICA DE LAS CURTIEMBRES

Las pieles son un producto secundario de las actividades de sacrificio de ganado y pueden ser procesadas dentro de un amplio rango de productos terminados. Para cada producto terminado el proceso de curtiembre puede ser diferente y la clase y cantidad de desecho producido puede variar enormemente. Los químicos utilizados tradicionalmente para la curtiembre se derivan de las plantas, mientras que el proceso

más común, hoy día, emplea una combinación de sales de cromo y extractos vegetales listos para ser usados. Por ser el cuero de zapatos teñido con cromo el más ampliamente producido, esta clase de cuero recibirá más atención a continuación. En la mayoría de los casos, las pieles crudas producidas en los mataderos son preservadas mediante la conservación y secado antes de ser transportadas a las curtiembres para posterior tratamiento. Durante el proceso de curtido por lo menos 300Kg de químicos son adicionados por tonelada de piel.

El curtimiento mineral, basado principalmente en el cromo, es el proceso de curtido más popular a gran escala debido a que éste actúa rápidamente y produce cuero con propiedades químicas y físicas deseables. En muchos países los efluentes de las curtiembres son descargados en las alcantarillas o en aguas superficiales de tierra adentro o son llevados al campo con el agua de riego. Las altas concentraciones de sal y sulfito de hidrógeno afectan la calidad del agua y pueden causar mal sabor y olor. La materia suspendida (cal, pelo, carnaza, etc.) enturbia el agua superficial y se asienta eventualmente en el fondo. Ambos procesos crean condiciones desfavorables para la vida acuática. El agua de desecho del curtimiento mineral que es descargada sobre el campo, afectará la productividad del suelo adversamente y puede ocasionar la infertilidad de la tierra (Kollthoff, I. M.; Sandell, E. B. y otros. 1988).

Como resultado de la infiltración la calidad del agua subterránea también es afectada de manera negativa. La descarga sin tratar, de los efluentes de curtiembres dentro del sistema de alcantarillado, causa deposición de carbonato de calcio y obstrucción de las cañerías. El lodo en los sistemas de desechos de agua tiene que descargarse en vertederos especiales debido a su contenido de cromo.

3.13. DESECHOS DE GALVANOPLASTIA

3.13.1. ¿Qué es este desecho?

La galvanoplastia es usada para aplicar metal decorativo a un metal base. Las soluciones de galvanoplastia a veces se ensucian y necesitan ser reemplazadas. Estas

soluciones de galvanoplastia que ya no pueden ser utilizadas son llamadas soluciones de galvanoplastia “gastadas”.

3.13.2. ¿Por qué este desecho es considerado peligroso?

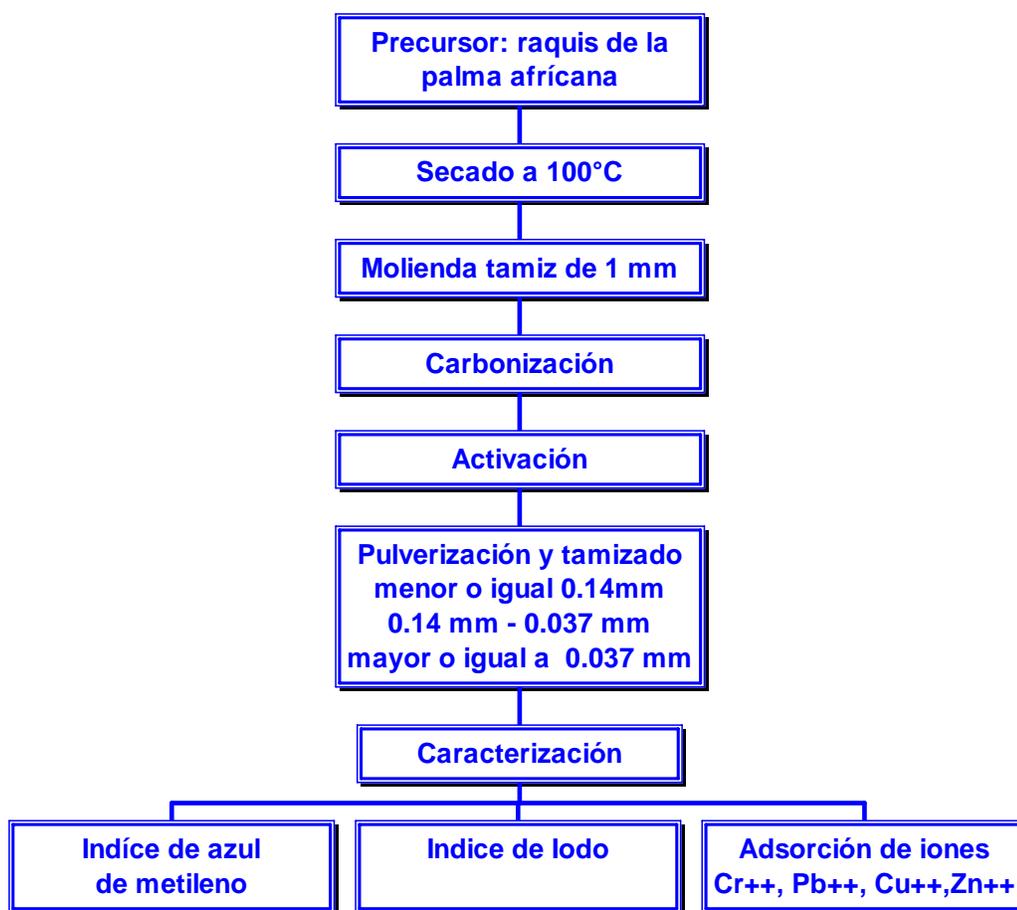
Las soluciones de galvanoplastia gastadas son usualmente corrosivas y contienen metales disueltos como oro, plata, platino, rodio, cobre, níquel, Zinc, cromo, u otros metales, es generalmente perjudicial para la salud humana y el medio ambiente, y es por lo tanto considerado peligroso. Las soluciones de galvanoplastia gastadas también pueden contener cianuro.

3.13.3. ¿Por qué este desecho debe ser manipulado de manera segura?

Porque este desecho es peligroso para la salud humana y el medio ambiente es importante que sea manejado en forma segura, aún cuando contenga metales preciosos. Las leyes y regulaciones actuales especifican como deben ser manipulados los desechos peligrosos en función de proteger la salud y la seguridad pública, y del medio ambiente.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología seguida en este trabajo se indica en Esquema 5



Esquema. 5 Diagrama de los diferentes procesos que pueden tener lugar en la activación térmica

4.1. TRATAMIENTO FÍSICO:

El ráquis de palma africana utilizado en la realización de este proyecto es procedente de la producción industrial de aceite ubicado en San Alberto (Cesar) en la figura 5 se muestra el precursor en el proceso de activación físico con vapor de agua y CO₂.



Fig. 5. Material de partida: râquis de palma africana

- El secado se realizó en una estufa a 270K (100°C) y la molienda en un molino estandar Model N° 3 Wailen Mill ubicado en el laboratorio de operaciones unitarios, y tamizando a 1mm y menores.
- Se determinó el contenido de humedad y cenizas presentes en la muestra original según las normas ASTM E 871 – 82 y ASTM D 3516 – 76 respectivamente.
- Se realizó la determinación del poder calorífico según la norma ASTM D3286 – 91.

Durante estos ensayos preliminares se pesaron repetidas (hasta 15) cantidades de râquis de palma africana (aproximadamente 40 g), luego se introdujeron dentro del reactor hasta completa carbonización. Gracias a estos ensayos se pudo determinar las mejores condiciones para la obtención de carbones activados con alta actividad, para ello se procedió a realizar y tratamiento térmico del material, una posterior activación con CO₂, luego se activo con vapor de agua, para finalmente determinar que la mejor capacidad adsortiva se consiguió con al combinación de los dos gases activantes, por tanto se comenzó por carbonizar la muestra, luego se activo pasando primero el vapor de agua y cuando se lograba eliminar la mayor cantidad de materia volátil se suministro el paso de CO₂.

4.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL

Esta primera etapa se llevó a cabo dentro de un reactor tubular de acero carbono (30 cm. de longitud x 3cm de diámetro) con calentamiento externo, (mufla); los gases producto de la reacción se evacuaron por la parte superior del reactor a través de un conducto de diámetro inferior hecho de cobre. En uno de sus extremos hay un dispositivo para la lectura de la temperatura, (Termocupla) y al otro lado un pequeño.



Fig. 6. Reactor parte interna

4.2.1. Activación Física

La activación se llevo a cabo en el mismo reactor de acero carbono, usado en la primera etapa, este se comunica con el generador de vapor de agua y el generador de CO₂ los cuales son los gases activantes en nuestro proceso. Tal como se muestra en la figura 7.



Fig. 7. Montaje de activación con CO₂ o vapor de agua

4.3. MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO:

4.3.1. Índice de Azul de Metileno

Se prepararon 6 distintas soluciones de azul de metileno de concentraciones conocidas, con las cuales se realizó una curva de calibración para el colorímetro Spectronic 20 MILTON RAY Company a una longitud de onda de 560 nanómetros ($\lambda = 560 \text{ nm}$).

Posteriormente se tomaron 10 mL de cada solución de azul de metileno y se le agregaron $0,02 \pm 0,002$ gramos de carbón (comercial y obtenido en el laboratorio). La mezcla se sometió a agitación durante 30 minutos, luego se dejó en reposo 24 horas. Para asegurar la total decantación se centrifugó a una velocidad 60 revoluciones por minutos durante 15 minutos.

A continuación se tomó una muestra de solución clara a cada una de las muestras preparadas para determinar la concentración de azul y la remoción de este por el carbón activado tanto para el comercial como para el obtenido en el laboratorio.

La expresión representativa del poder adsorbente es:

mg de azul de metileno adsorbido por gr de carbón indicado en la siguiente ecuación:

$$actividad = \frac{mgA.M}{gC} = \frac{(C_1 - C_2) * V}{P}$$

C₁: Concentración inicial de la solución de azul de Metileno

C₂: Concentración final de la solución de azul de Metileno

V: volumen de la s/n

P: peso del carbón empleado

4.3.2. Adsorción de iones Cr⁺⁺, Pb⁺⁺, Cu⁺⁺, Zn⁺⁺ por el carbón

Este ensayo busca caracterizar los mejores carbones obtenidos para su posterior uso en la retención de iones en fase líquida, las pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones para todas las muestras de carbón comercial y del obtenido.

Iones Cr⁺⁺, Pb⁺⁺, Cu⁺⁺, Zn⁺⁺

Se pesaron 0,02 ± 0,002 gramos de cada carbón (comercial y obtenidos), se le adicionaron 10 mL de una solución patrón de 15 ppm de cada Ion, esta se agitó durante 10 minutos, posteriormente se dejó decantar 24 horas.

Las sales de partida son: ZnSO₄ * 7H₂O, K₂Cr O₄, CuSO₄ * 5H₂O, Pb(CH₃COO)₂

Pasadas las 24 horas se tomaron las aguas claras y se analizó su concentración final por la técnica de adsorción atómica en el equipo PERKIN – ELMER 372 ubicado en el laboratorio de instrumentación de la escuela de química.

Antes de pasar las muestras se prepararon 4 distintas soluciones de concentraciones conocidas entre 1 – 4 ppm, para realizar la curva de calibración.

4.3.3. Índice de yodo

La determinación del índice de yodo da una indicación del área superficial interna del carbón activado.

El índice de yodo está definido como los miligramos de yodo adsorbidos de una solución acuosa por 1 g de carbón activado, cuando la concentración de yodo en el filtrado es de 0.02N. Se llevó a cabo según la norma ASTM – D 4607 – 94.

El cálculo del índice de yodo se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$I_n = \left(\frac{X}{M}\right) = A - \left(\frac{2.2 * B * V}{M}\right)$$

Donde:

$$A = N_1 * 1269.3$$

$$B = N_2 * 126.93$$

En donde:

N_1 = normalidad de la solución de Yodo. En nuestro caso = 0.998 N

N_2 = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio. En nuestro caso = 0.997 N

V = volumen de la solución de tiosulfato de sodio en mL

M = masa del carbón activado en gramos.

4.4. DETERMINACIÓN DEL PODER DE COMBUSTIÓN

El poder calorífico del carbón, expresa su valor como combustible. Se puede considerar como la suma de los calores de combustión de los materiales combustibles; es decir el carbono, del hidrogeno y del azufre, menos el calor de descomposición de los materiales carbonáceos y mas o menos calores de reacciones menores que pueden ocurrir entre las impurezas presentes.

La materia mineral y la humedad pueden se pueden considerar “inertes” y su presencia en el carbón reduce el poder calorífico en proporción directa a su contenido, también sirve para la clasificación de los carbones activados para sus múltiples usos en la figura 8 se observa el carbón obtenido en el laboratorio.

4.4.1. Materiales y equipos

- Bomba calorimétrica
- Recipiente calorimétrico
- Camisa de agua
- Agitados de agua
- Termómetro de alta Precisión cs
- Circuito de ignición
- Crisoles de cuarzo
- Temporizador

Este ensayo se llevo a cabo en el laboratorio de Carbones de Ingeniería Metalúrgica.

4.4.2. Procedimiento

Se realizo según la norma ASTM D3286 – 91 y los cálculos se llevaron a cabo con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\Delta T * (C - e_1 - e_2 - e_3)}{m}$$

Donde:

Q = poder calorífico, BTU/lb.

ΔT = incremento de la temperatura

C = capacidad térmica del calorímetro BTU/lb*g/°C = 5088.366

M = peso de la muestra.

e_1 = calor de combustión del algodón = 7524* peso del algodón usado en g, para nuestras mediciones no fue utilizado.

e_2 = calor de combustión del alambre fusible Ni – Cr = 0.41* alambre quemado en mm.

e_3 = calor de formación del ácido sulfúrico = 10* mL de NaCO₃ (0.394N) usados.



Fig. 8. Carbón activado obtenido sin pulverizar

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Todos los ensayos que se describen a continuación se realizaron por triplicado, en las posteriores tablas los valores que se reportan corresponde al valor promedio \pm desviación estándar:

$$\bar{X} \pm C_v$$

Durante los ensayos preliminares fijamos la ruta para la obtención de los mejores carbones activados obtenidos en el laboratorio, buscamos los mejores tiempos de activación, la mejor temperatura trabajando por debajo de los 1270 K (1000°C) y utilizando la mejor combinación de los gases activantes para incrementar la capacidad adsorptiva del material, estos ensayos nos condujeron a establecer que la mejor ruta de obtención de carbones se activados se obtenía a una temperatura de activación que oscilara alrededor de los 500 °C ya que a nivel industrial las temperaturas son bastante elevadas, así que lograr conseguir una disminución en la temperatura se convirtió en uno de los objetivos de esta investigación.

Durante la etapa de carbonización y activación con CO₂ se pudo observar que la actividad de los carbones no era comparable con la actividad del carbón comercial suministrado por el laboratorio y que no había una relación directa entre el gas activante CO₂ y el tiempo de activación, por tanto se fijo un tiempo de activación con CO₂ alrededor de 120 \pm 20 minutos y se vario el tiempo del paso de vapor e agua, se encontró que 2 de los carbones preparados eran los que presentaban actividad igual o superior al carbón comercial por tanto a lo largo de estos resultados se caracterizaran y se identificarán según la siguiente nomenclatura.

C₉: carbón activado obtenido con el paso de 300 minutos de vapor de agua y 120 \pm 20 minutos de CO₂.

C₁₀: carbón activado obtenido con el paso de 30 minutos de vapor de agua y 120 ± 20 minutos de CO₂.

En la etapa de carbonización se eliminan: agua, compuestos volátiles y materiales no carbonáceos, producto de la descomposición pirolítica del ráquis, El carbono restante cristaliza con formaciones irregulares cuyos intersticios están parcialmente rellenos de alquitrán de madera. Esta ocupación de los intersticios da como resultado que el producto carbonizado tenga una capacidad de adsorción baja.

Al usarse solo CO₂ como gas activante se aprecia que no hay una dependencia entre el tiempo de activación y la capacidad adsorbente, tal como muestra los anexos (I,II,III). Y por tanto se fijaron las condiciones obtenidas para la obtención del carbón.

Las condiciones seleccionadas fueron:

Temperatura: **530K – 740 K (300 °C – 500°C)** para la carbonización.

Tiempo: **70 – 100 min.**

Aumento de la temperatura: **8 °C/ min.**

Temperatura de activación: **500°C.**

Tiempo de activación con CO₂: **120 ± 20 minutos.**

5.1. HUMEDAD Y CENIZAS

En la tabla 1 aparecen las características de una muestra típica del ráquis de palma africana (ELAEIS GUINEENSIS):

Tabla 1. Determinación de humedad, cenizas y carbón fijo.

C. Fijo (%)	M. Volátil (%)	Humedad 15 horas (%)	Humedad 6 horas (%)	Cenizas (%)
93.51 ± 2.08	9.62 ± 2.94	9.00 ± 1.03	4.75 ± 0.63	6.49 ± 2.0

Estos resultados nos permiten establecer que el ráquis e la palma africana es una material lignocelulosico con un contenido de ceniza relativamente pequeño y una cantidad de carbón fijo grande, lo que lo hace un buen precursor para la obtención de carbón activado.

En la tabla 2 aparecen las principales características de los carbones C₉ y C₁₀ obtenidos, en el presente trabajo

Tabla 2. Material volátil y carbón fijo del carbón obtenido.

C. Fijo (%)	M. volátil (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Mg (%)	Ca (%)
29.8.8 ± 2.14	69.8± 3.0	7.31±1.31	25.23± 1.78	0.31	1.98

Los resultados muestran que el carbón obtenido posee un porcentaje de cenizas alto, comparado con el de un carbón comercial siendo este valor alrededor de un 5 – 8 %, como consecuencia, aparece un carácter básico en el carbón obtenido que se comprueba con la presencia del calcio y el magnesio. En el anexo VI se muestran las curvas de calibración para el Ca y el Mg.

En la tabla 3 se muestra las características de un carbón comercial, para tener un patrón de comparación cabe resaltar que en esta tabla hay que observar que el costo del carbón activado es bastante elevado.

Tabla 3. Propiedades del carbón comercial.

Casa comercial	XXX*
Densidad aparente	200 – 300 Kg/m ³
Perdida al secar	≤ 10%
Contenido de Zn	≤ 0.001 %
Contenido de Fe	≤ 0.003 %
Residuos	≤ 1 %
El costo en el mercado	\$ 115 000 pesos colombianos por 500g de carbón

5.2. PODER ADSORBENTE

Se prepararon 6 soluciones de azul de metileno de diferentes concentraciones como se observa en la figura 9 y en la tabla 4 para su decoloración como se observa en la figura 10. Con las cuales realizamos una curva de calibración. (Anexo VIII).



Fig. 9. Soluciones patrones de azul de metileno



Fig.10. Adsorción con azul de metileno

* Para evitar demandas no se revelara la marca comercial.

Tabla 4. Soluciones de azul de metileno

S/N	Ci (g/ L)
1	0,652
2	1,304
3	3,26
4	6,52
5	13,04
6	16,3

Ci = concentración inicial del
Azul de metileno (A.M.)

S/N = soluciones de A.M.

Los carbones fueron pulverizados durante 60 minutos en un pulverizador marca JANNETZHI KM1 en un soporte de ágata con bola de ágata, este pulverizador esta ubicado en el laboratorio de Ingeniería química, y tamizados durante 15 minutos en un tamizador marca Portable Sive Shaker model RX – 24 GETYLER, con mallas 100 y 400, por tanto se clasificaron los carbones con la siguiente granulometría como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Distribución del tamaño de partícula

Nº malla	Diámetro
≥100	≥ 0,14m
100 – 400	0,14 – 0,037 mm
≤ 400	≤ 0,037mm

5.3. ACTIVACIÓN UTILIZANDO CO₂ Y VAPOR DE H₂O COMO GASES ACTIVANTES

Se comprobó que utilizando un solo gas activante no se obtenían carbones activados con capacidad adsortiva significativa en comparación con el carbón activado comercial. Por Tal razón se busco la mejor combinación de ambos gases en un solo proceso. La combinación de ambos gases activantes vapor de agua y CO₂, permiten obtener carbones con mayor capacidad adsortiva.

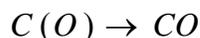
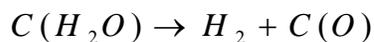
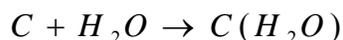
Al pasarse el vapor de agua una vez culminada la etapa de carbonización, se obtiene una mayor extracción de materia volátil debido a la naturaleza polar del agua, la cual ayuda a arrastrar ciertos compuestos polares que se encuentran en el ráquis, aumentando aun más la estructura porosa.

A continuación se muestra el mecanismo más probable que se haya dado en el proceso, donde se presenta un efecto inhibitor de hidrogeno:

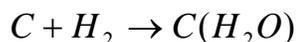
Reacción básica del carbón con vapor de agua:



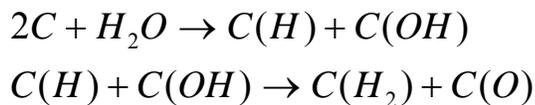
Se sigue las siguientes reacciones en serie:



El efecto de inhibición del hidrogeno se debe, probablemente a que ocupa centros activos en la superficie del carbón:



La primera etapa de la reacción es la adsorción de las moléculas de agua disociada, y sigue la siguiente secuencia:



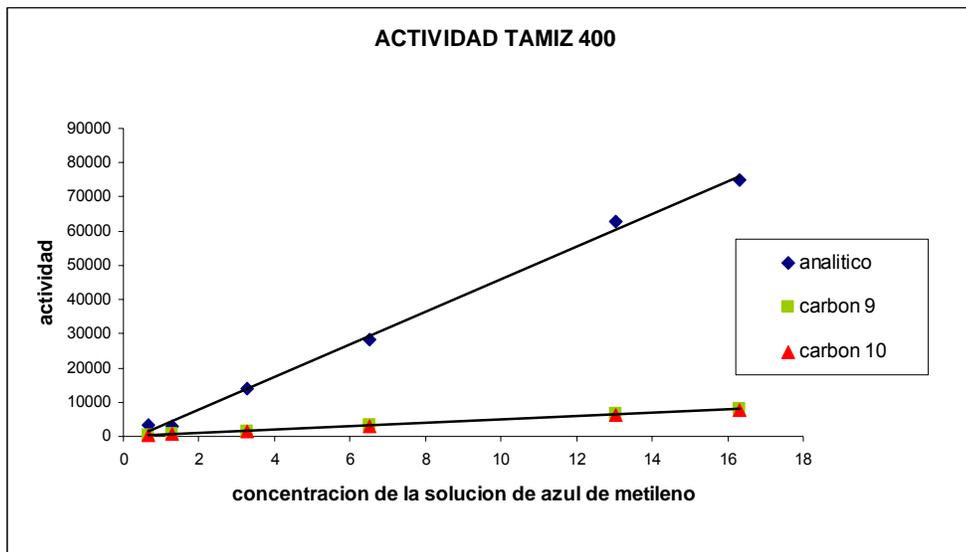
En este proceso se produce una reacción secundaria que da formación al gas de agua que es catalizada por la superficie del carbón.

Después de haber pasado el vapor de agua. Se pasa un flujo constante de CO₂ el cual actuara como un agente secante, que permite que el carbón se convierta en cenizas y mantiene una atmósfera reductora necesaria , ya que la activación con vapor se produjo a temperaturas de 460°C – 500°C , dando lugar a inhibición del oxígeno el cual reacciona de manera peligrosa.

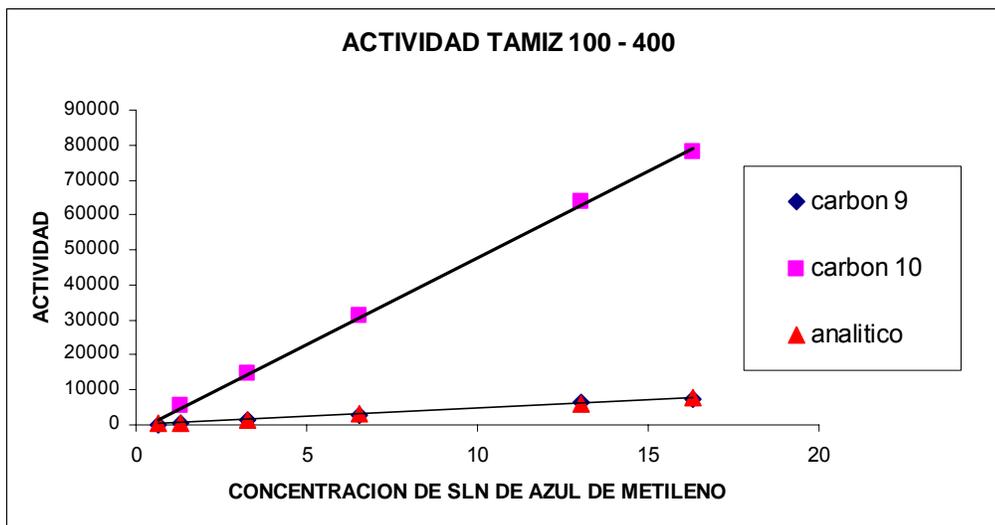
La molécula de agua es de mayor tamaño que la molécula de CO₂, de tal forma al pasar por medio de la estructura carbonizada, esta molécula se abre paso dando formación a ciertos poros. La molécula de CO₂ al poseer un menor tamaño molecular, le permite pasar por cavidades donde el agua no cabe, creando poros más pequeños. En un carbón Activado es muy importante la estructura interna que se ha formado, pero también es importante conocer si hay una relación directa entre el tamaño de grano y la actividad del carbón.

En las graficas 1,2,4,5 se observan los resultados obtenidos utilizando como gases activantes vapor de agua y CO₂. Se analiza la influencia del tiempo de activación de vapor de agua, dejando el flujo de CO₂ y la actividad del carbón en diferentes tamaños de partícula constante en el intervalo 120 ± 20 minutos. Las tablas utilizadas se reportan en los anexos IV, V, VI.

Grafico 1. Actividad de los carbones activados obtenidos utilizando un tamiz de 0,037 mm



Grafica 2. Actividad de los carbones activados obtenidos utilizando un tamiz 0.14 – 0.037 mm (100 – 400)

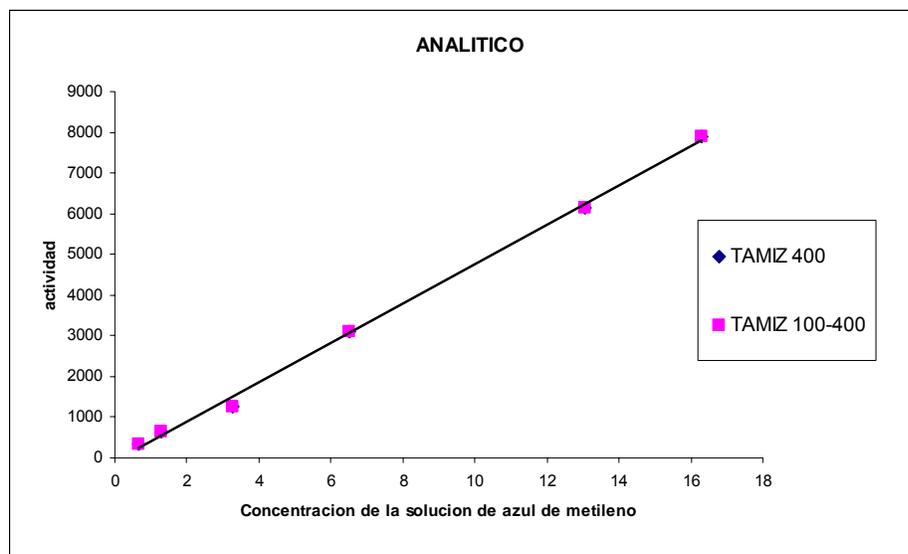


En la grafica 1 y 2 se muestra que a pesar que los tiempos de activación con vapor de agua fueron diferentes para el C₉ fue de 300 minutos y el C₁₀ 30 minutos se observa un aumento en actividad para el C₁₀ por encima del carbón analítico en el caso en que la partícula tiene un tamiz de 0,14 – 0,037mm. Los anteriores resultados permiten presumir que al pulverizarse los carbones, se aumentó la superficie de contacto, ala

vez que se incremento la estructura porosa, necesaria para la adsorción de la molécula de azul de metileno que requiere un tamaño de poro aproximado de 15 Å.

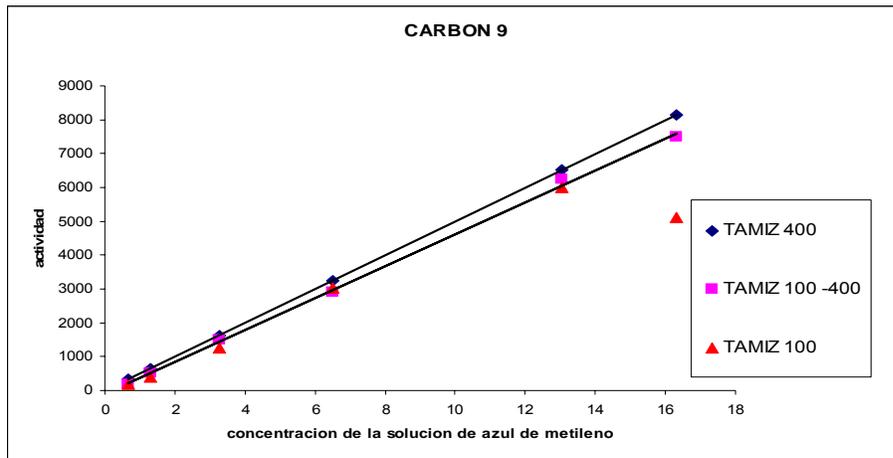
Se pudo concluir que contrario a lo que se muestra en la teoría el poder adsorbente no aumenta a medida que aumenta el tiempo de activación. Puesto que en el proceso de activación hay una perdida de carbón, y existe un punto más allá el cual no resulta beneficioso prolongar la activación.

Grafica 3. Actividad del carbón analítico en diferentes tamaños de partícula



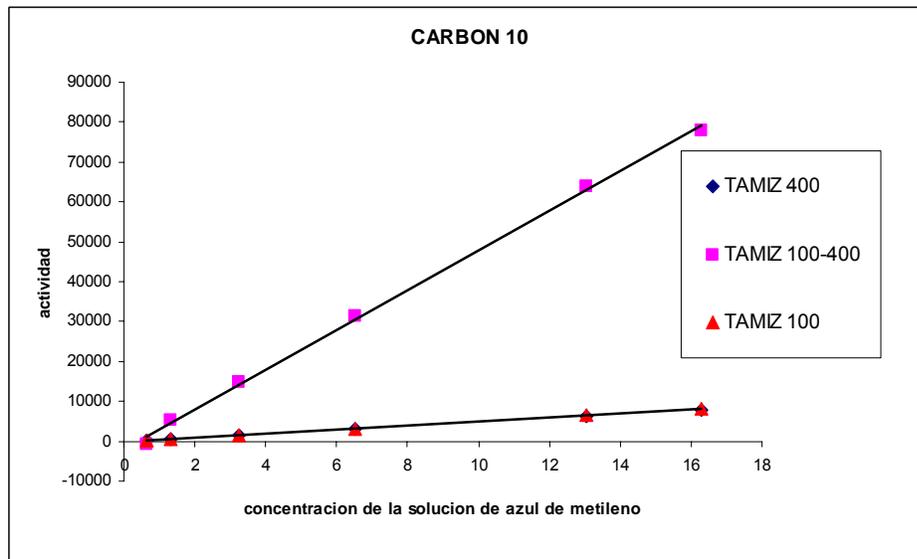
En esta grafica observamos que para el caso del carbón analítico el tamaño de la partícula es independiente, es decir en los tamices mostrados remueve de la misma forma las soluciones de azul de metileno

Grafica 4. Actividad del carbón obtenido C₉ utilizando diferentes tamaños de grano.



En esta grafica observamos que la activación del carbón C₉ obtenido en el laboratorio con 300 minutos de vapor de agua fue activado de forma uniforme en los tres tamaños de partícula.

Grafica 5. Actividad del carbón obtenido C₁₀ utilizando diferentes tamaños de grano.



En esta grafica se logra observar que la mejor actividad se presenta en un tamaño de partícula de 0,14 mm a 0,037 mm y en los otros dos tamaños la actividad fue muy similar.

El C₉ demostró que el proceso de activación fue efectivo debido a las altas actividades que presentó. Según resultados anteriores se comprobó que la superficie quedó activada de forma igual en todas partes ya que en todos los tamaños de grano ya que la remoción de azul de metileno fue eficaz en todos los tamaños de partícula.

Un factor que influye decisivamente sobre la especificidad del adsorbente es el diámetro medio de los poros, el azul de metileno no penetra a través de carbones de diámetro medio inferior a 15 Å, lo cual nos da una idea de la porosidad de los carbones C₉ y C₁₀ que removieron el azul de metileno en su totalidad.

A la vez se observa gran atracción del adsorbato sobre el carbón, ya que la molécula presenta un comportamiento ácido, y los carbones C₉, C₁₀ son de naturaleza básica.

El C₉ y el C₁₀ son los dos mejores carbones obtenidos.

5.4. ANÁLISIS DE INFRARROJO

Como resultado de la carbonización se obtuvo el Ácido piroleñoso, nombre que se le da al condensado en bruto, y se compone principalmente de agua. El cual es un líquido sumamente contaminante nocivo, y corrosivo.

Los otros componentes, fuera del agua, son alquitranes de madera, algunos solubles en agua, otros insolubles como el ácido acético, el metanol, la acetona y otros complejos químicos en menores cantidades. Si se deja en reposo, el ácido piroleñoso se separa en dos capas consistentes en el alquitrán insoluble en el agua y la capa acuosa que contiene los otros productos químicos. La recuperación del alquitrán insoluble en el agua, a menudo llamado alquitrán de madera se realizó, por simple decantación de la fase acuosa.

Estos alquitranes se obtienen como sustancias de color claro menos densas que el agua, las cuales cambiaban de color al poco tiempo. Tal como muestra la figura 11.



Fig. 11. Oxidación de las breas recogidas en el proceso de activación

Las sustancias obtenidas se dejaron reposar dentro de un desecador varios días, para eliminar las trazas de agua, y luego se analizaron por la técnica de infrarrojo dando el espectro de la figura 12.

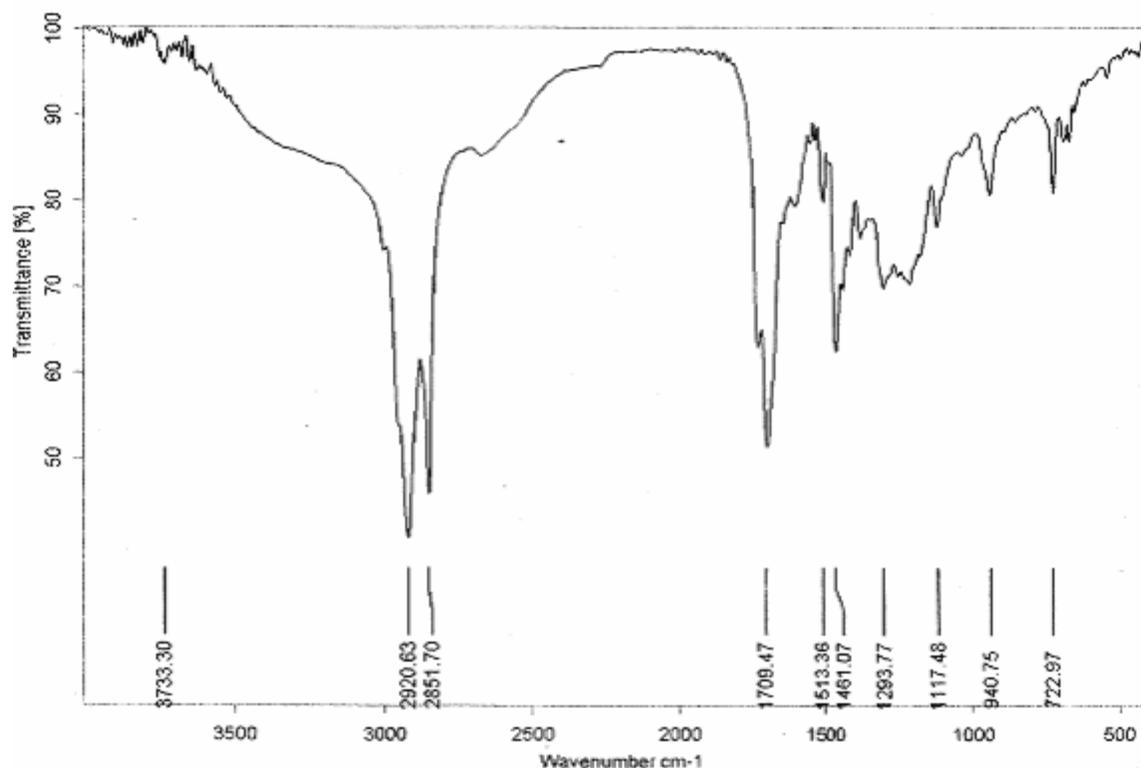


Fig. 12. Espectro infrarrojo para las breas obtenidas en la reacción

En la tabla 6 se encuentran reportadas las bandas del espectro que se observaron en el infrarrojo.

Tabla 6. Espectros IR para las breas

Desplazamientos (cm^{-1})	Grupo funcional
2920.10	- CH_3
2851.39	- CH_2
1704.88	$\text{C} = \text{O}$
1513.51	$\text{C} - \text{C}$
1210.16	$\text{C} - \text{O}$
722.50	$\text{C} = \text{C}$

Por medio de estas bandas se confirmó que las breas están constituidas básicamente por polifenoles los cuales se oxidan fácilmente a poliquinonas al estar en contacto con el oxígeno del medio ambiente. Las quinonas son una interesante y valiosa clase de compuestos debido a sus propiedades de oxidación – reducción. En la figura 13 se muestran algunas quinonas policíclicas.

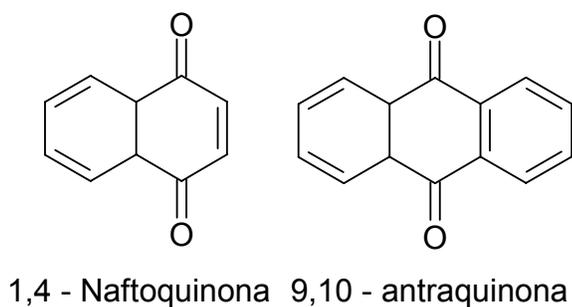


Fig. 13 Quinonas policíclicas

La reacción de oxidación que sufren los polifenoles para la formación de poliquinonas se muestra en la figura 14

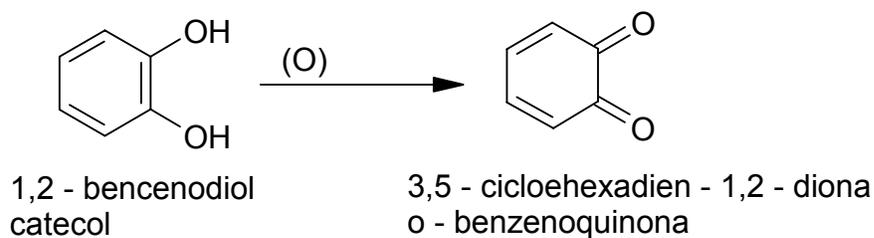


Fig. 14. oxidación de fenoles a quinonas

Las breas también fueron colocadas en diferentes medios para poder analizar su comportamiento y poder determinar su composición, como vemos en la figura 15 se observan los diferentes medios a los que se sometieron.



Breas con HCl y Zinc



Breas en medio
Básico +Al



Breas en H₂O₂

Fig. 15. Breas en diferentes solventes

Las breas con H₂O₂ se disolvieron completamente dando un color caramelo, están oxidadas debido a la gran cantidad de oxígeno presente en el peróxido, son translúcidas y en el fondo se observa la brea fijada sobre el vidrio demostrando una vez más su gran polaridad.

En el medio básico + Al, la reacción de oxidación continúa, lo que confirma la presencia de polifenoles con un olor característico, de los tres es el que menos se oxida.

Con HCl y Zinc los fenoles salen y las breas se fijan sobre el Zinc, inhibiendo su potencial reductor, estas siguen totalmente oxidadas. Se pudo confirmar que las breas son sustancias extremadamente polares ya que al tratar de ser analizadas por CG – MS no se obtuvo ningún espectro debido a que los alquitranes quedaban en la cámara de ionización.

En la figura 16 se muestra el espectro infrarrojo que se obtuvo del carbón C₉ preparado en el laboratorio.

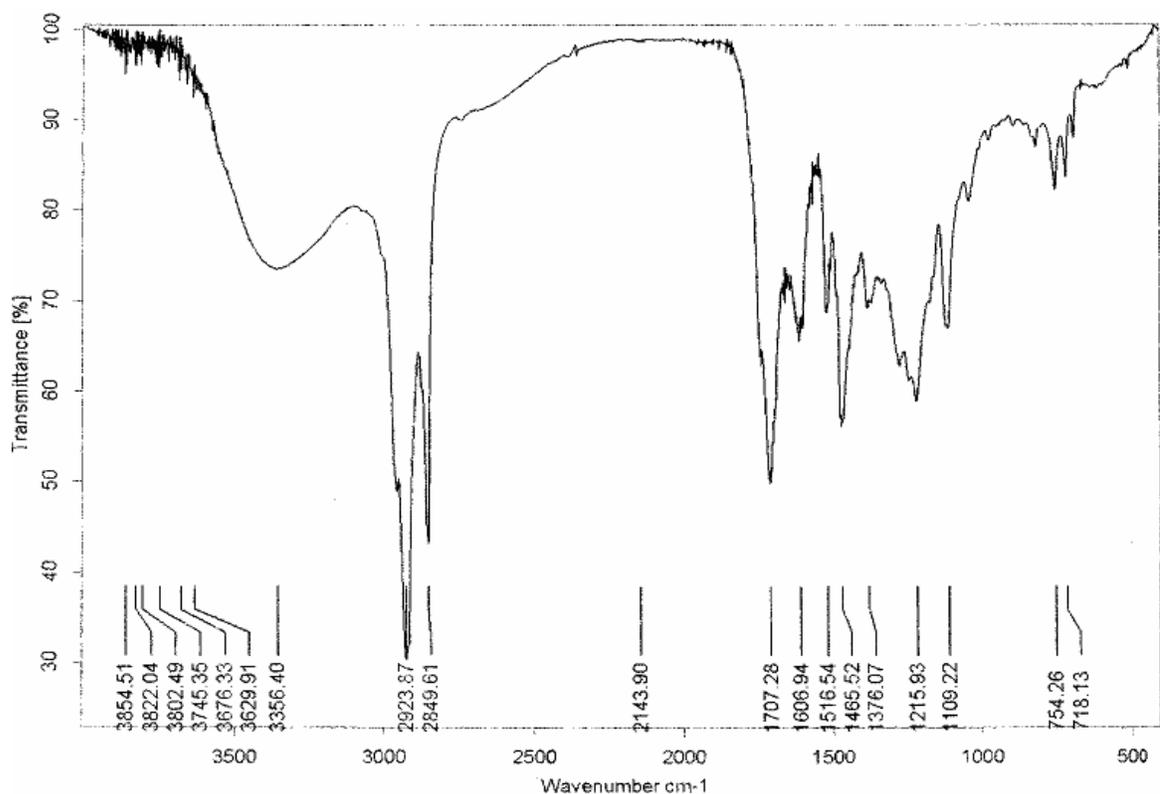


Fig. 16. espectro infrarrojo para el carbón activado obtenido en el laboratorio

En la tabla 7 se observan las bandas de los grupos funcionales característicos para carbón activado del espectro tomado.

Tabla 7. Bandas del infrarrojo par el carbón obtenido C₉

Desplazamiento	Grupo funcional
3629.9 – 3356.40	– OH
2923.87	– CH ₂
2849.61	– CH ₃
1707.28	C = O

Los carbones obtenidos son de naturaleza básica, según la literatura se les llama carbones H que adsorben ácidos, por poseer grupos óxidos básicos.

El carbón activado tiene elementos enlazados químicamente, como el oxígeno y el hidrógeno, presentes en la materia prima, que permanecen en el producto por combustión imperfecta del material, o porque fueron agregados durante la activación, y otros como las cenizas, que no se encuentran orgánicamente combinadas. El contenido de ceniza de la materia prima puede catalizar algunos procesos de la activación, por ejemplo puede causar defectos en la estructura cristalina y facilitar la quimisorción del oxígeno y con ello se mejoran las propiedades adsorptivas del producto, sobre todo a sustancias polares

La mayor influencia en las propiedades de adsorción del carbón activado la tienen el oxígeno y el hidrógeno combinados con el carbón tal como cita Kipling (Kipling J, 1956), estos elementos son esenciales en la estructura del carbón activado y la superficie de este se puede considerar como formada de hidrocarburos modificados, en algunos puntos, por compuestos oxigenados. De acuerdo con la teoría de la heterogeneidad de las superficies sólidas propuestas por Tylor, (Tylor, 1925) del oxígeno, el hidrógeno y otros heteroátomos se encuentran enlazados químicamente a aquellos átomos de carbono que se hallan en los ejes y en las esquinas de las cristalitas elementales, porque las valencias de estos átomos no están totalmente saturadas por interacción con los átomos vecinos y, por lo tanto, poseen mayor reactividad.

5.5. ADSORCIÓN DE IONES Cr^{++} , Pb^{++} , Cu^{++}

Dado los resultados anteriores se puede concluir claramente que los mejores carbones para utilizar como retenedores de contaminantes son los C6 y C10, los cuales se utilizaron para analizar la capacidad adsorptiva con iones de Cu^{+2} , Zn^{+2} , Pb^{++} , Cr^{++} y en las tablas 8, 9, 10 y 11, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 8. Capacidad adsortiva de carbones C6 y C10 con iones Cr^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.

ADSORCIÓN CON CROMO ppm		
CARBÓN	MALLA	REMOVIDA
C10	100	1,26±0.2
C10	100-400	1,37±0.2
C10	400	1,8±0.2
C6	100	0,42±0.2
C6	100-400	0,11±0.2
C6	400	0,4±0.2

Tabla 9. Capacidad adsortiva de carbones C6 y C10 con iones Cu^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.

ADSORCIÓN CON COBRE ppm		
CARBÓN	MALLA	REMOVIDA
C10	100	13,89± 0.2
C10	100-400	13,97± 0.2
C10	400	13,98± 0.1
C9	100	14,21± 0.1
C9	100-400	14,21± 0.1
C9	400	14,21± 0.2

Tabla 10. Capacidad adsortiva de carbones C6 y C10 con iones Pb^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.

ADSORCIÓN CON PLOMO ppm		
CARBON	MALLA	REMOVIDA
C10	100	14± 0.1
C10	100 – 400	14±0.1
C10	400	13± 0.1
C9	100	14± 0.1
C9	100 – 400	14± 0.1
C9	400	13±0.2

Tabla 11. Capacidad adsortiva de carbones C6 y C10 con iones Zn^{++} . La concentración inicial de iones fue de 15 PPM.

ADSORCION CON ZINC ppm		
CARBON	MALLA	REMOVIDA
C10	100	13,4± 0.1
C10	100 – 400	13,04± 0.1
C10	400	13,99± 0.2
C9	100	14,1± 0.1
C9	100 – 400	9,89± 0.3
C9	400	13± 0.1

A Cada patrón de 15 ppm se le midió el pH inicial. Luego de agregarse el carbón se tomo el pH final de la solución, en la tabla 12 se reportan los valores de los pH que se midieron en el laboratorio para las soluciones de los iones mas el carbón activado.

Tabla 12. pH de los patrones de 15 ppm y. pH final de los patrones mas carbón.

Nombre	pH Calculado	Ion	pH inicial Patrón 15 ppm	pH final Patrón + Carbón C ₉ y C ₁₀	Solubilidad (g/L)
Sulfato Cobre	5.5 – 6.5	Cu ⁺²	6.0	1.0	317
Cromato de potasio	8.6 – 9 .8	Cr ⁺²	8.0	8.0	637
Sulfato de Zinc	4.0 – 6 .0	Zn ⁺²	6.0	1.0	965
Acetato de Plomo	5.5 – 6 .5	Pb ⁺²	6.0	8.0	443

Los pH medidos se encuentran dentro de los rangos calculados.

La interfase carbón líquido presenta contrastes definidos, puesto que el lado líquido de la interfase presenta las siguientes influencias:

- Atracción del carbón por el soluto
- Atracción del carbón por el solvente
- Poder de solubilidad del solvente sobre el soluto. Efectos del solvente sobre la orientación del a interfase.
- Competición en la interfase en presencia de solutos múltiples

- Tamaño molecular de las moléculas del sistema

El solvente utilizado fue agua, donde cada soluto muestra gran solubilidad, lo cual representa la gran afinidad entre el soluto y el solvente, oponiéndose a la atracción ejercida por el carbón. Cualquier cambio que aumente la solubilidad puede asociarse con una reducción de la adsorbabilidad por ello los grupos polares generalmente disminuyen la adsorción de soluciones acuosas.

Observamos entonces que existe cierta compatibilidad entre los iones adsorbidos y el carbón, tales como interacciones electrostáticas en la superficie, debido a la naturaleza básica del carbón obtenido y la naturaleza ácida de todos los iones a excepción del Cromo, hace posible la fijación de los iones en la superficie. Los resultados muestran que el cambio del pH nos indica fijación de los iones al carbón, dejando libres otros iones que nos afecta el pH, tal remoción se da por la atracción de los grupos funcionales libres en la superficie del carbón con los iones. Por la naturaleza básica del cromo y el carbón no se da una remoción efectiva de la solución y no se observa un cambio significativo en su pH, lo cual indica que da lugar a formación de otros iones.

Las variaciones de la temperatura influyen muy poco en la mayoría de los procesos de adsorción, de igual forma todas las muestras se dejaron el mismo día a temperatura ambiente 300 K (28°C)

Algunas de las reacciones que se llevan a cabo son:

- 1. $CuSO_4 + H_2O \rightarrow Cu(OH)_2 + SO_4^{2-}$
- $CuSO_4 + H_2O \rightarrow HSO_4^- + Cu^{2+} + OH^-$
- 2. $HSO_4^- + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + OH^-$

Donde la primera reacción no compite con la segunda por que necesita un pH de 8.5 para que precipite el **Cu (OH)₂**. De tal manera se da la formación de H₂SO₄ lo que explica el pH final de 1.

- 1. $ZnSO_4 + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + SO_4^{2-}$
- 2. $ZnSO_4 + H_2O \rightarrow ZnSO_4^- + Zn^{2+} + OH^-$
 $HSO_4^- + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + OH^-$

De forma similar no se da la precipitación de **Zn (OH)₂** ya que necesita un pH de 11 para precipitar. Por tanto la reacción principal da la formación de H₂SO₄ explica un pH final de 1.

- 1. $K_2CrO_4 + H_2O \rightarrow 2K^{2+} + CrO_4^{2-}$
 $CrO_4^{2-} + H_2O \rightarrow H_2CrO_4$
- 2. $Pb(CH_3COO)_2 + H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + Pb^{2+}$
 $CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_3COOH + OH^-$

Debido a la atracción electrostática del carbón y su naturaleza básica este retendrá los iones plomo y reaccionara con el ácido acético formado, aumentando la cantidad de iones OH que afectaran al pH de la solución

El carbón obtenido muestra gran capacidad para retener los iones de cobre, plomo y zinc, los cuales aportan una solución eficaz para el tratamiento descontaminante de las aguas residuales proveniente de las industrias de las curtiembres y la galvanoplastia, ya que los efluentes de aguas deben contener una cantidad máxima de 3ppm de Cu 0.5 ppm y 0.5 ppm Zn y 0.5 de Pb.

5.6. DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS CARBONES

Este proceso se llevo a cabo por triplicado en el laboratorio de carbones de ingeniería metalúrgica según la norma **ASTM D3286 – 91**, las muestras fueron secadas en la estufa a 100°C, los datos se muestran en la tabla 13

Tabla 13. Poder calorífico

Muestra	Poder Calorífico (BTU/ Lb)
Ráquis de la palma africana	7368.3175
Carbón analítico tamiz ≥ 400	14258.46
Carbón C ₁ * tamiz ≥ 400	10204.11315
Carbón C ₁₀ ** tamiz ≤ 100	9257.0245

* C₁ = carbón obtenido por activación física con CO₂ durante 111 minutos.

** C₁₀ = carbón obtenido por activación física con 360 minutos de vapor de agua y 145 minutos de CO₂. Los datos del C₉ no se reportan debido a la imposibilidad de realizar la medición en el laboratorio de carbones de ingeniería metalúrgica.

El poder calorífico de los carbones analizados es alto, este se puede aprovechar luego que los carbones han cumplido su vida útil, para la generación de energía.

5.7. ÍNDICE DE IODO

Las pruebas se realizaron por triplicado para obtener los datos que se reportan en la tabla 14 para su posterior análisis. Los resultados se expresan con una incertidumbre de ± 0.002 mg/g, y este índice es una relación directa entre el área superficial del carbón.

Tabla 14. Determinación del índice de yodo

Muestra	Índice de yodo
C ₉ tamiz ≤ 100	1111.6526

C ₉ tamiz 100 – 400	1075.0129
C ₉ tamiz ≥ 400	1140.2319
C ₁₀ tamiz ≤ 100	1053.2698
C ₁₀ tamiz 100 – 400	1097.1874
C ₁₀ tamiz ≥ 400	925.4539

El yodo puede penetrar a través de carbones cuyo diámetro medio de poro sea de 10 Å, este resultado complementa el resultado del ensayo de Azul de metileno que tiene la capacidad de penetra en poros de 15 Å. Aportando una idea del tamaño de poro.

Los resultados del índice de yodo corrobora la eficiencia del carbón obtenido ya que a mayor número de yodo mayor área superficial presenta. Los índices comerciales se dan a partir de 600 mg/g, demostrando una vez más que el carbón obtenido tiene características similares a la de un carbón comercial. Nuevamente se observa que el C₉ y el C₁₀ presentan los mejores resultados cuando el tamaño de malla es de 100 – 400, lo cual nos da a pensar que en este rango se tienen, carbones cuyo diámetro medio de poro es de 10 Å.

5.8. VENTAJAS DEL PROCESO

El generador de vapor de agua posee una resistencia elevada (2kWatt), la cual consume grandes cantidades de energía. También hay un gasto de electricidad en el baño que precalienta el CO₂ (500 Watios) y la Mufla, siendo en total un proceso que necesita de abundante energía. En la etapa de la carbonización se comprobó que el proceso puede ser sostenido autotermicamente, debido a los vapores combustibles que se liberan durante la reacción en el rango de temperaturas 530K – 730K (260°C – 300°C). Tal como muestra la figura 17.



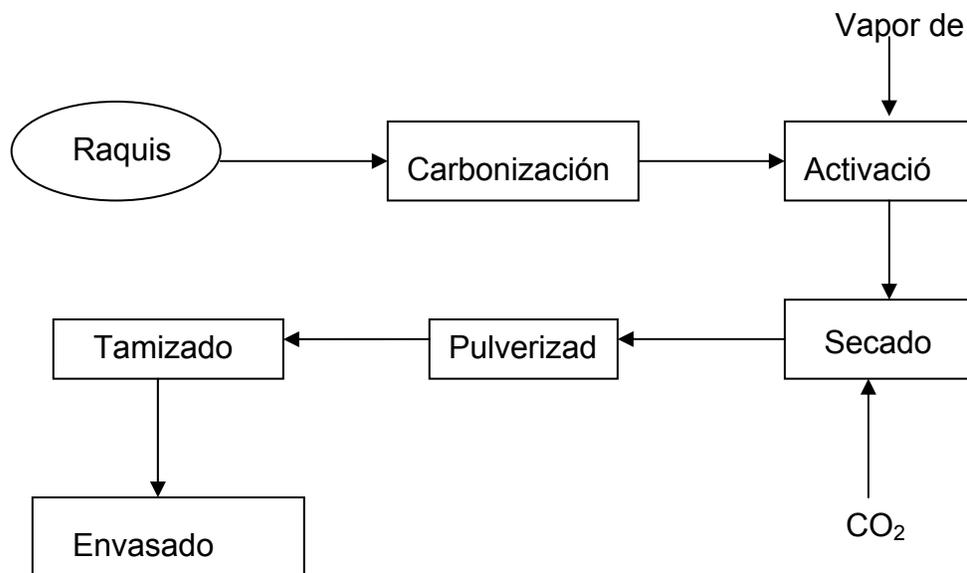
Fig. 17. proceso auto – térmico

5.9. BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO.

Tabla 15. Balance de materia del proceso

Materia prima	g
ráquis húmedo	40
Humedad	4.75
ráquis seco	35.25
CARBONIZACIÓN	
Carbón bruto	13.3
Alquitrán	2
Humedad	1.28
Carbón neto	10.02
Rendimiento (%)	75.34
ACTIVACIÓN	
Carbón seco	10.02
Carbón activado seco	8.73
Rendimiento (%)	87.12
Rendimiento total (%)	24.76

5.9.1. Diagrama de flujo del proceso



Esquema 6. Diagrama de flujo del proceso

CONCLUSIONES

- Es factible y viable elaborar carbón activado a partir de biomasa seca (ráquis de la palma africana), con un rendimiento alrededor del 24,76 % y un contenido de cenizas de 25.23 %, con buena capacidad para remover moléculas coloreadas. A la vez se obtuvieron dos subproductos de importante interés un componente del ácido piroleñoso: los alquitranes de la madera que son productos de alto valor agregado que se obtienen en pequeñas proporciones. y un gas que permite que el proceso sea auto sostenible, disminuyendo los costos de producción.
- La investigación realizada demuestra y corrobora que variables como la temperatura y el tiempo de activación juegan un papel de gran importancia en la obtención de carbones activados a partir de diferentes materias primas, habiéndose explorado en este trabajo el ráquis de la palma africana (*ELAEIS GUINEENSIS*).
- En la activación con CO₂ se pudo observar que tienen poco poder adsorbente, debido, probablemente, a que bajo esas condiciones experimentales el agente activante no reacciona favorablemente para remover el material de desecho procedente de la carbonización que obstruye la estructura porosa, originando menores índices de adsorción.
- El comportamiento de nuestro precursor (ráquis de palma africana) y sus índices de adsorptividad dados por las mediciones del índice de yodo y azul de metileno se ajustan a las condiciones establecidas para aquellos carbones adecuados para la adsorción en fase líquida.
- El carbón activado obtenido a partir del ráquis de la palma africana es un producto de alto valor agregado. Apto para remover impurezas en fase líquida.

- Las mejores variables experimentales que condujeron a la producción de carbón activado C6 con optimas propiedades adsortivas fueron:
Carbonización: Temperatura de carbonización 200°C – 500°C con una velocidad de calentamiento de 8°C/min
Activación: Temperatura de Activación 450°C – 500°C. Tiempo de Activación: 30 minutos de vapor de agua y 120 ± 20 minutos de CO₂.
- Las temperaturas de activación utilizadas en ese trabajo nunca antes han sido reportadas en la literatura, lo que representaría una ventaja a nivel industrial.
- El proceso que se llevo a cabo en el laboratorio es un proceso químicamente limpio ya que no se elimina ningún contaminante al medio ambiente (agua, suelo y aire).
- La producción de Carbón activado a nivel industrial de buena calidad es una necesidad que se ha creado en el país y en especial en esta región , ya que es un mercado amplio, seguro que generaría, progreso para la región por la creación de empleos , y utilización de desechos .

RECOMENDACIONES

- Se recomienda un análisis de distribución de tamaño de poro, para obtener una mayor información de la superficie del carbón activado obtenido.
- Preparar el carbón activado a partir del ráquis de la palma africana a nivel de planta piloto, para la producción de este material a nivel industrial.
- Continuar con los estudios exploratorios de investigación con el objetivo de establecer la capacidad de adaptación de los residuos de las especies forestales a los diferentes usos y aplicaciones del carbón activado
- Mantener y fomentar vínculos de cooperación, con los grupos de investigación de esta y otras universidades, cuyo radio de acción apunte a la solución del problema del uso de los desechos lignocelulósicos, vía pirolisis y activación.
- Realizar un estudio fisicoquímico a la superficie de los mejores carbones obtenidos, para tener más información sobre los tipos de enlace que presenta.
- Estudiar los alquitranes obtenidos en el proceso de la carbonización, por derivatización utilizando cromatografía líquida acoplada a masas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANGLÈS, M.N., REGUANT, J., MARTÍNEZ, J.M., FARRIOL, X., MONTANÉ, D. Y SALVADÓ J., 1997. Influence of the ash fraction on the mass balance during the summative analysis of high-ash content lignocellulosics. *Bioresource technology*, 59 (2-3), Pág. 185.
2. BALCI S., DOGU T., Y YÜCEL H. 1993 Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials. *Ind. Eng. Chem. Res.* 32, Pág. 2573-2579.
3. BEENACKERS, A.A.C.M. Y BRIDGWATER, A.V, 1989. "Gasificación y pirolisis de la biomasa en Europa", en *Pyrolysis and Gasification, Conferencia Internacional*, Luxemburgo, Pág. 129.
4. BERNAL, G, 1973 "Producción de carbón activado a partir de bagazo de la caña de azúcar". *Informe de investigaciones*. Instituto Central de Investigaciones de Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).
5. BRIDGWATER A.V. Y GRASSI G. 1991. Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilisation. Elsevier Applied Science, London and New York.
6. BROWNING, B.L, 1967 Carboxymethylcellulose. *Methods of Wood Chemistry*. Vol II. Interscience New York/London Pág. 490-492.
7. COPPEN, J.J. W. (1993). Xylem resin composition and chemotaxonomy of three varieties of *Pinus caribaea*. *Phytochemistry*. 33, Pág. 103 1109.

8. CORDERO, T., GARCÍA HERRUZO, F. Y LAHOZ GÓMEZ, C., 1989. "Estudio de la pirolisis convencional de madera de Encina (*Quercus rotundifolia*) y pino (*Pinus halepensis*), An. Quim. 85, No 3, Pag. 445 – 447.
9. CUKIERMAN A.L., DELLA ROCCA P.A., BONELLI P.R. Y CASSANELLO M.C. 1996. On the study of thermochemical biomass conversion. Trends in Chemical Engineering, 3, Pág. 129 – 144.
10. DELLA ROCCA P.A., 1998. Tesis Doctoral Universidad de Buenos Aires.
11. DOUGALL, Mc J.S. 1991., Afr. Inst. Min. Metall, 91, 4, Pág. 109 – 120.
12. EARL, D.E. 1975. informe sobre el carbón vegetal, Organización De Las Naciones Unidas Par La Agricultura Y La Alimentación. Roma. Pág. 94.
13. FAO, 1994. Integrated energy systems in China – The cold Northeastern region experience. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
14. FENGEL, D Y WEGENER, G., 1984 Wood. Chemistry, ultraestructure and reactions. Walter de Gruyter. Berlin/NewYork.
15. FEDEPALMA, COAGRO, 1993. Protección efectiva de cada uno de los procesos productivos de las tres cadenas principales que se derivan de las semillas oleaginosas y los aceites y grasas.
16. FIECHTER A. 1983. Pentosan and lignin. Advanced Biochemistry, Engineering and Biotechnology. 27, Pág. 1 – 186.

17. FONT, R., MARCILLA, A., DEVESA, J. AND VERDÚ, E., 1993. "Kinetics study of the flash pyrolysis of almonds shells in a fluidized bed reactor at high temperatures", Journal of Analytical and applied pyrolysis, Pág. 245 – 246.
18. GENTY, P 1984, Estudio entomológicos con relación a la palma africana en América Latina, Palmas 5, Pág. 22 – 31.
19. GREGG S.J. Y SING K.S.W. 1982. Adsorption, surface área and porosity. Academic Press Inc., London.
20. GOLDSTEIN, L.S., 1981, For. Prod. J, 31 (10), Pág. 63.
21. KOLLTHOFF, I. M.; SANDELL, E. B. y otros, 1988. "Análisis Químico Cuantitativo." 6° Edición. Librería y Editorial Nigar S.R.L.. Buenos Aires, Argentina.
22. KIPLING, J.J; Quart. Revs, 1956, London, Pag. 1-10.
23. KIRK-OTHMER. 1978, encyclopedia of chemical technology, Vol 4, tercera edición, John Wiley, pag 561 – 569.
24. OCAMPO DURAN, 1997, Palmas una estrategia de vida tropical, Agroforestia para la producción animal en Latinoamérica.
25. PADILLA, A; SCOTT, C.; GAMBOA, R.; SÁNCHEZ, R., 1998 "Activated Carbon from Pinus Caribaea and Tectona Grandis" Proceeding of the Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg, Alemania
26. J. PÉREZ y et al. Factibilidad de producción de carbón activado por proceso autotérmico con carbones colombianos. Medellín: Universidad Nacional de

Colombia – Sede Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, COLCIENCIAS, 2003.

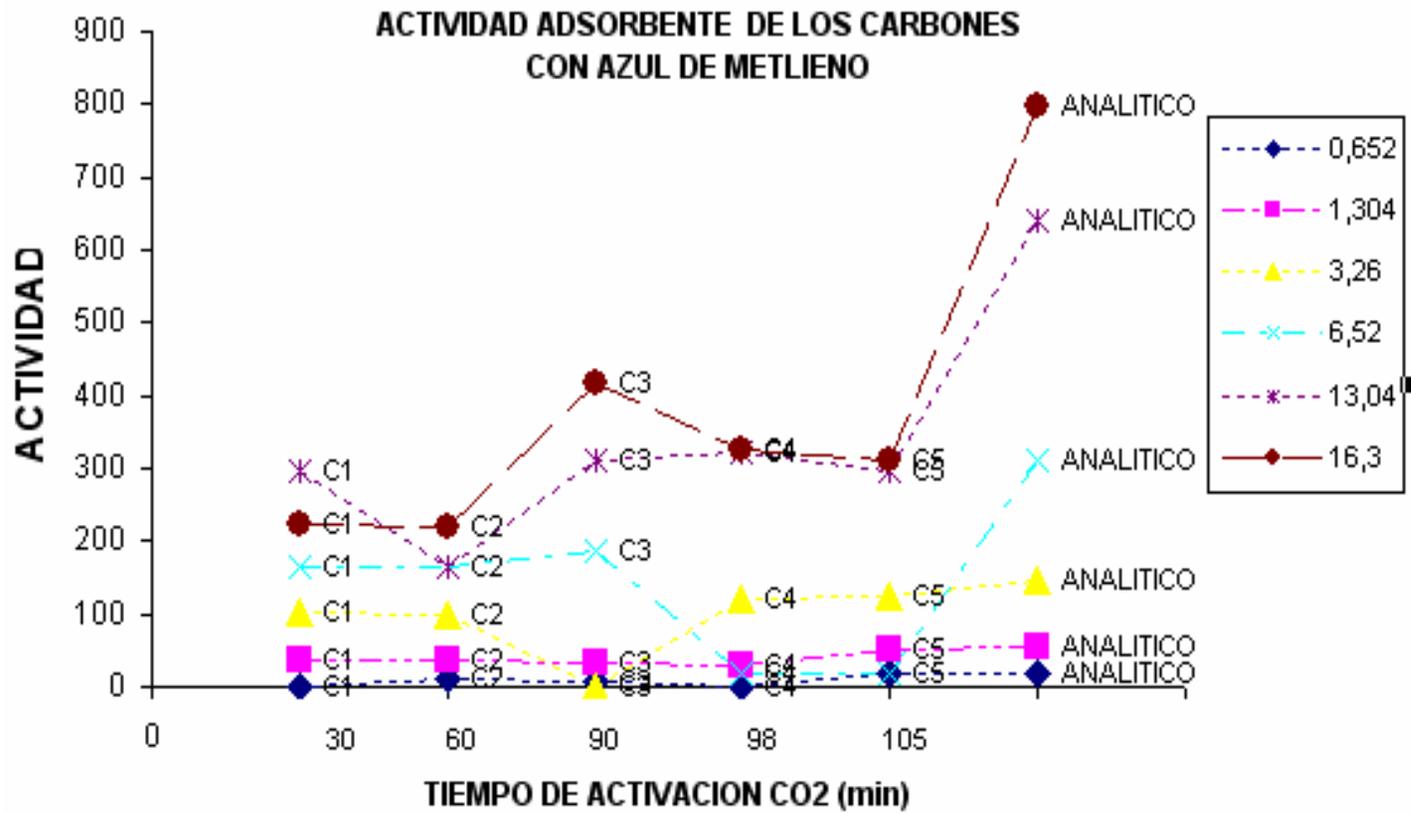
27. QUESADA, G, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Tecnología de palma aceitera INTA
28. QUEVEDO, V; 2000 Estudio de la biotransformación aeróbica de los desechos lignocelulosicos rev .Fac .Agron. (Luz) 17: Pág. 505 – 517.
29. VILLALVAZO, N. J. Y O. FAIX. 1981. Caracterización analítica de las ligninas de cuatro especies del genero *Quercus* y sus posibilidades de aprovechamiento. IMCyP Publicación No. 4. Guadalajara, Jal. Pág. 7.
30. RODRÍGUEZ Y LINARES, 1984. Microporous structure of activated carbons s revealed by adsorption methods. Chemistry and physics of carbon. Marcel dekker, inc, vol 1.
31. RODRÍGUEZ, 1990. la pirolisis como vía de aprovechamiento de los residuos lignocelulosicos: revista mensual, ing. química, # 249 Pág. 141 – 147.
32. SHAFYZADEH, 1984. F.,Avd Chem. Ser, 207,Pág. 489.
33. SOLTES, E.J. Y ELDER, T.J, 1981. "Pyrólisis in Organic Chemicals from Biomass", Goldstein, I.S. (Eds), Cap. 5, CRC Press, Boca Raton. Fla.
34. SMISECK, M, 1970. activate carbon manufacture properties and applications. New York. American everbier publishing.
35. TYLOR, H.S. Proc. Roy. Soc, 1925, London, Pag 105 – 108 .

36. ULLMAANN´S, 1986. Encyclopedia of industrial chemistry. Vol. A₅, Pág. 124 – 140.
37. ZANZI, R., SJOSTROM, K. AND BJÖRNBOM, E. 1996. "Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor", Fuel, vol. 75, No 5, Pág. 547.
38. Catalogo de productos Mollab, 2006. www.mollabs.com/archivos/productos/03-16%20precios.pdf

ANEXOS

Anexo I. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≤ 0.14 mm (malla N° 100)

MALLA	T (min)	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A					
100	CO2	S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5	S/N6
C1	30	0	36 ± 3.14	102,7 ± 1.13	163,7 ± 3.58	296,6 ± 3.19	221,9 ± 6.25
C2	60	11,1 ± 2.06	35,3 ± 3.16	100,6 ± 2.16	163,7 ± 6.17	164,2 ± 2.14	218,9 ± 6.13
C3	90	8,7 ± 2.12	32,3 ± 4.02	0	188,3 ± 3.52	311,6 ± 6.12	417,5 ± 5.78
C4	98	0	29,3 ± 2.04	121,3 ± 6.18	17,2 ± 2.01	320,6 ± 8.59	327,2 ± 8.45
C5	105	18,9 ± 3.11	50,3 ± 5.14	123,7 ± 5.68	16,9 ± 1.19	296,5 ± 8.47	312,2 ± 9.16
ANALITICO		17,4 ± 2.16	54 ± 6.11	147,9 ± 4.67	312,8 ± 3.45	640,1 ± 8.26	798,8 ± 9.85

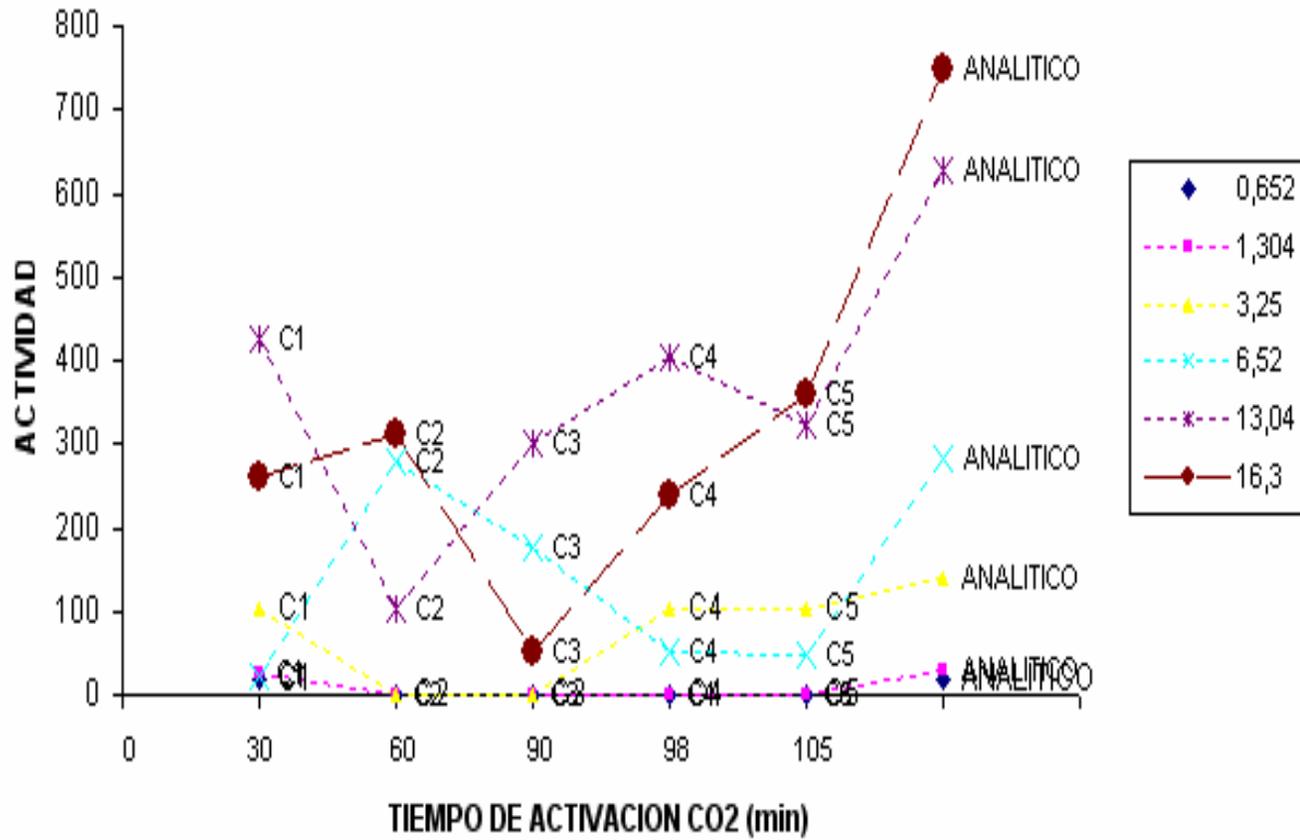


Grafica 3. Efecto del tiempo de activación usando CO_2 como gas activante en carbones de tamaño ≤ 0.14 (malla No 100)

Anexo II. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano $\geq 0.037\text{mm}$

MALLA	TIEM. ACT	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A					
		S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5	S/N6
400	CO2						
C1	30	17,73 ± 2.14	24,46 ± 4.12	102,71 ± 6.45	20,52 ± 2.46	426,54 ± 8.16	261,02 ± 6.23
C2	60	0	0	0	277,44 ± 8.15	101 ± 6.54	312,17 ± 6.45
C3	90	0	0	0	175,16 ± 8.41	299,5 ± 7.85	51,82 ± 2.89
C4	98	0	0	102,71 ± 5.59	50,3 ± 2.06	404,88 ± 8.45	239,99 ± 8.89
C5	105	0	0	104,21 ± 6.78	46,99 ± 3.15	323,66 ± 4.26	360,3 ± 6.57
ANALITICO		17,74 ± 3.12	30,18 ± 3.15	138,81 ± 5.89	282,25 ± 6.15	627,81 ± 6.25	750,19 ± 9.85

ACTIVIDAD ADSORBENTE DE LOS CARBONES CON AZUL DE METILENO

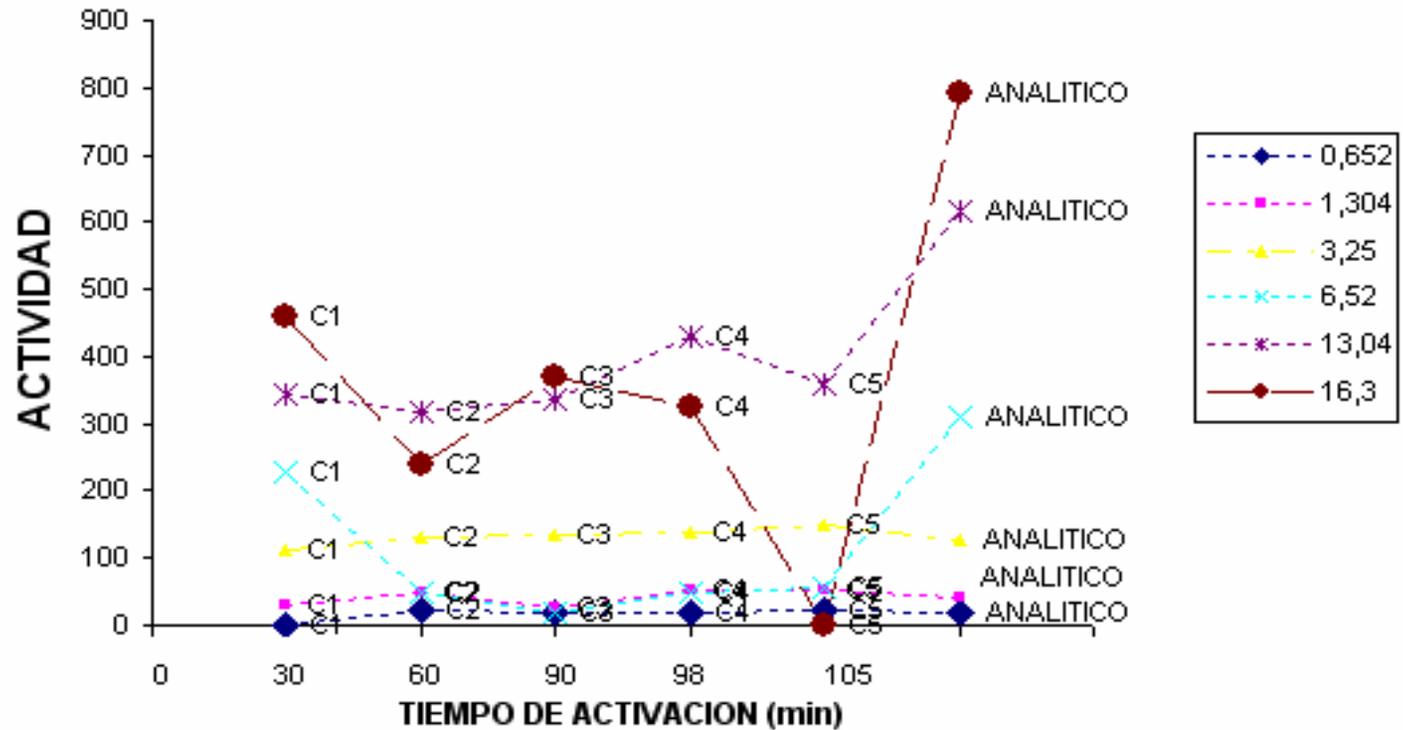


Grafica 1. Efecto del tiempo de activación usando CO₂ como gas activante. Carbones de tamaño ≥ 0.037 mm (malla No 400)

Anexo III. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano 0,14 - 0.037mm

MALLA	T (min)	CO2	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A				
			S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5
C1	30	0	28,68 ± 2.06	111,43 ± 8.56	227,2 ± 8.48	343,21 ± 8.25	459,58 ± 8.26
C2	60	21,95	50,047 ± 6.15	129,79 ± 6.23	47 ± 2.52	316,14 ± 8.12	239,97± 6.18
C3	90	17,43	26,27 ± 2.08	134 ± 6.15	19,02 ± 2.65	337,2 ± 8.16	370,83± 7.16
C4	98	17,43	50,64 ± 6.15	138,81± 6.19	49,1 ± 3.23	430,16 ± 8.13	324,2 ± 5.69
C5	105	21,64	53,94 ± 6.18	147,84 ± 7.14	57,83 ± 4.12	358,26 ± 7.59	0
ANALITICO		18,03	42,21 ± 6.12	127,38 ± 6.14	310,84 ± 8.19	615,78 ± 9.12	790,21 ± 8.29

ACTIVIDAD ADSORBENTE DE LOS CARBONES CON AZUL DE METILENO



Grafica 2. Efecto del tiempo de activación usando CO_2 como gas activante.
Carbones de tamaño 0.14 – 0.037mm (malla No 100 – 400)

Anexo IV Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≥ 0.14 mm (malla N° 100)

MALLA	T (min)	T (min)	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A					
100	H2O	CO2	S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5	S/N6
C6	35	120	17,4 ± 2.14	54,2 ± 4.16	148,4 ± 8.96	315,9 ± 8.45	642,2 ± 8.65	800,7 ± 9.16
C7	60	120	9,9 ± 1.19	38,3 ± 3.29	105,4 ± 6.78	16,9 ± 8.85	326,7 ± 5.68	218,9 ± 9.12
C8	130	120	0	39,5 ± 3.45	135,8 ± 5.89	50,3 ± 8.95	313,1 ± 4.69	236,9 ± 8.45
C9	155	120	9,6 ± 1.45	51,2 ± 4.12	149 ± 5.62	296 ± 6.32	342,9 ± 5.78	511 ± 8.16
C10	300	120	18,3 ± 5.62	39,5 ± 3.78	126,8 ± 5.42	304,2 ± 2.56	600,1 ± 6.26	511,9 ± 5.69
ANALITICO			17,4 ± 3.26	54 ± 4.56	147,9 ± 5.78	312,8 ± 5.68	640,1 ± 6.78	798,8 ± 9.12

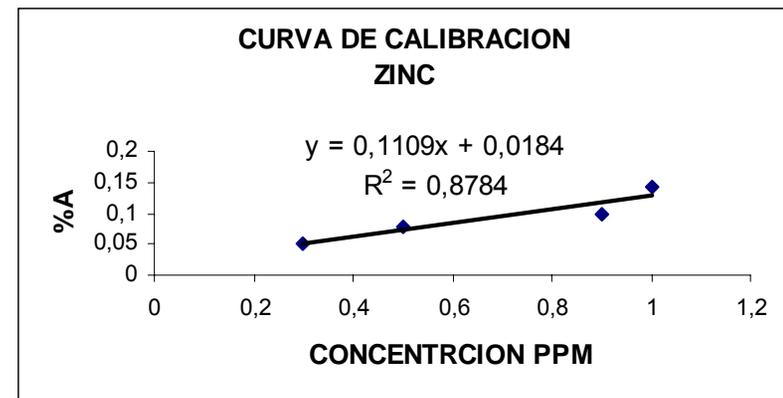
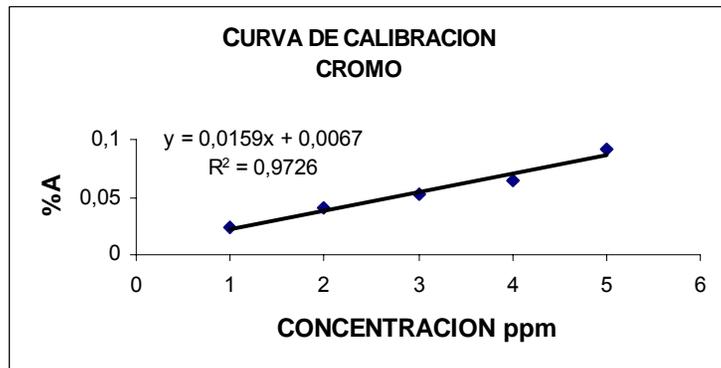
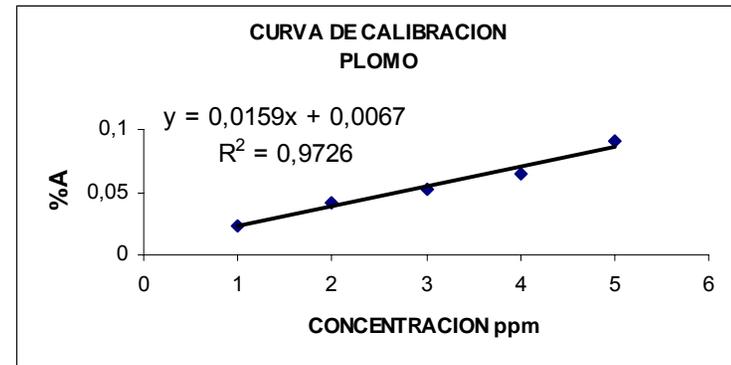
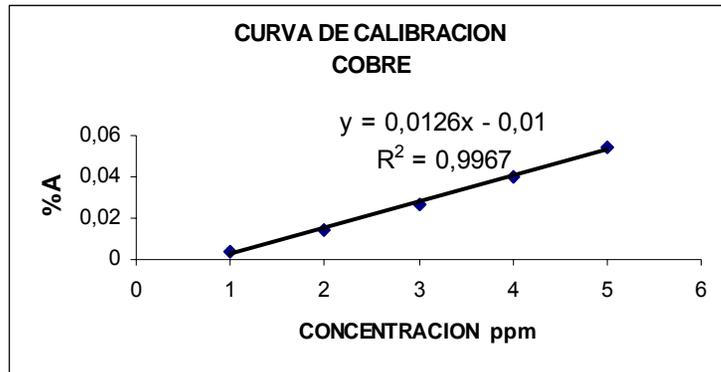
Anexo V Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano 0.14 – 0.037 mm

MALLA	T (min)	T (min)	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A					
100 – 400	H2O	CO2	S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5	S/N6
C6	35	120	0	53,95 ± 3.58	148,14 ± 8.45	313,54 ± 6.87	638,34 ± 5.36	780,28 ± 8.98
C7	60	120	18,94 ± 2.36	11,83 ± 2.14	64,8 ± 2.36	248,56 ± 6.85	404,89 ± 6.32	233,95 ± 6.17
C8	130	120	20,44 ± 3.25	51,24 ± 5.63	135,5 ± 8.23	295,49 ± 6.23	585,69 ± 5.32	650,32 ± 5.28
C9	155	120	22,25 ± 3.12	52,74 ± 5.12	152,35 ± 5.23	302,11 ± 5.98	627,81 ± 6.48	782,39 ± 8.94
C10	300	120	17,43 ± 3.69	50,64 ± 5.12	149,04 ± 3.54	289,48 ± 8.75	624,2 ± 4.85	748,69 ± 9.15
ANALITICO			18,03 ± 2.05	42,21 ± 2.52	127,38 ± 6.18	310,84 ± 8.25	615,78 ± 6.89	790,21 ± 8.78

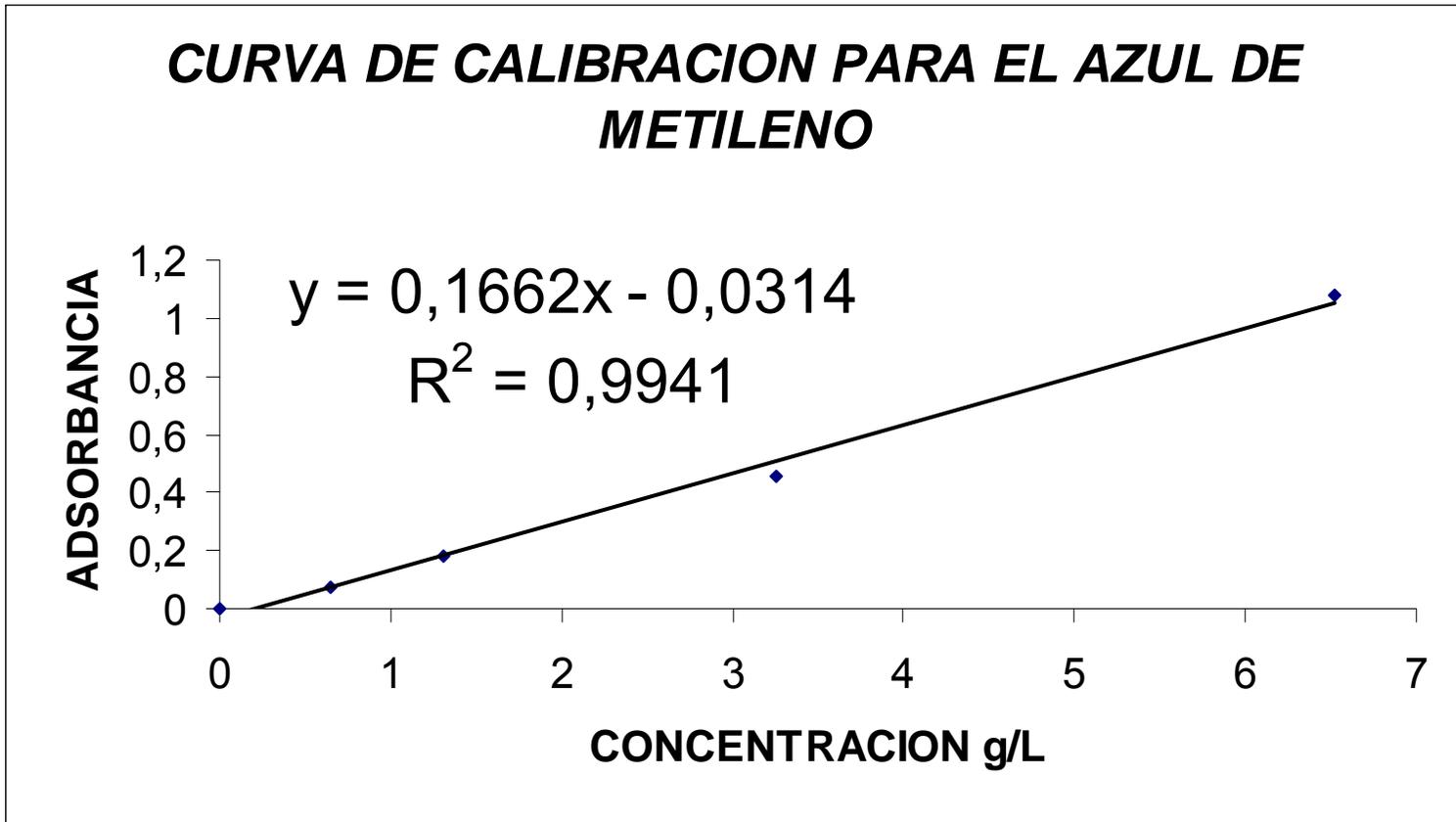
Anexo VI. Poder adsorbente de los carbones con un tamaño de grano ≤ 0.037 mm

MALLA	TI EM .ACT	TI EM .ACT	ACTIVIDAD = Mg A.M./g C A					
			S/N1	S/N2	S/N3	S/N 4	S/N5	S/N6
400	H2O	CO2						
C6	35	120	20,44 ± 2.65	55,45 ± 5.19	150,84 ± 5.69	312,4 ± 2.36	363,83 ± 7.69	786,3 ± 9.15
C7	60	120	8,71 ± 1.69	41,61 ± 5.41	138,21 ± 7.58	261,19 ± 2.57	463,25 ± 7.58	488,16 ± 6.59
C8	130	120	18,64 ± 3.78	29,58 ± 3.56	126,17 ± 5.26	296,09 ± 8.59	587,19 ± 7.12	652,42 ± 6.54
C9	155	120	11,11 ± 2.95	30,48 ± 3.54	0	295,79 ± 5.96	586,59 ± 7.46	751,1 ± 5.98
C10	300	120	0	50,33 ± 2.64	151,14 ± 5.36	291,28 ± 5.69	615,17 ± 6.89	785,99 ± 5.23
ANALITICO			17,74 ± 3.15	30,18 ± 3.52	138,81 ± 5.11	282,25 ± 6.87	627,81 ± 9.58	750,19 ± 6.12

Anexo VII. Curvas de calibración para adsorción atómica de los iones Cr^{++} , Pb^{++} , Cu^{++} , Zn^{++}



ANEXO VIII. Curva de calibración para el azul de metileno



Anexo IX curvas de calibración para el Mg y el Ca

