

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PALMERA
MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA
LABORATORIO**

**OSCAR MAURICIO MEJIA MIRANDA
SANDRA ROCIO PATIÑO VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PALMERA
MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA
LABORATORIO**

**OSCAR MAURICIO MEJIA MIRANDA
SANDRA ROCIO PATIÑO VILLAMIZAR**

**Trabajo presentado como requisito
Para optar el título de Ingeniero Químico**

Código de proyecto: 2005 - 73

**Director
Ph.D MARIO ALVAREZ CIFUENTES
Profesor de la Escuela de Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

RESUMEN

1. TITULO *

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA PALMERA MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO

2. AUTORES **

Oscar Mauricio Mejía Miranda
Sandra Rocío Patiño Villamizar

3. PALABRAS CLAVES

Carbón activado, cuesco de palma, aprovechamiento de residuos, carbonización, pirólisis.

4. DESCRIPCIÓN

El cuesco de fruto de palma se usó para la preparación de carbón activado. En primer lugar el cuesco fue sometido a un proceso de pirólisis; el carbón resultante se trató mediante un proceso de activación física. Se comparó la influencia de la activación física a nivel de laboratorio, con los resultados del carbón activado comercial; los resultados se compararon con base en la actividad con el respecto al número de yodo y la actividad con respecto al azul de metileno. La pirólisis se realizó en un horno con capacidad de 500 Kg de carga a una temperatura de 380° C y un tiempo de carbonización de 10 días. La activación física se llevó a cabo con vapor de agua sobrecalentado a 350° C en un tubo de vidrio en lecho fijo. Se encontró que el carbón activado obtenido posee un área superficial de 520 m²/g y una distribución de poro en su mayoría microporosa.

Con este trabajo se pretende buscar una alternativa para el uso del cuesco de la palma de aceite, utilizándolo como materia prima para producir carbón activado, ya que con una moderada transformación de la materia prima se consigue un producto de mayor valor agregado.

* Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas – Escuela de Ingeniería Química

ABSTRACT

1. TITLE*

UTILIZATION OF PALM KERNEL SHELL TO PRODUCE ACTIVATED CARBON AT LABORATORY SCALE

2. AUTHORS **

Oscar Mauricio Mejía Miranda
Sandra Rocío Patiño Villamizar

3. KEY WORDS

Activated carbon, palm kernel shell, waste usage
Carbón activado, huesco de palma, aprovechamiento de residuos, carbonización, pirólisis.

4. DESCRIPTION

Palm kernel oil shell was used in the activated carbon preparation. In the first step, shell was treated by thermal pyrolysis; the resulting charcoal was activated physically in the presence of superheated steam. The influence of the physical activation at laboratory scale was compared with the results of the commercial activated carbon; the properties were compared by determination of iodine activity and methylene blue activity. Pyrolysis was carried out at temperature of 380° C and carbonization time of 10 days, in a 500 kg capacity furnace. The physical activation was carried out with superheated steam up to 350° C, in a glass tube in a fixed bed. The activated carbon obtained had a surface area of 520 m²/g and microporous pore distribution.

With this work it is tried to look for an alternative for the use of palm kernel oil shell, like a raw material to produce activated carbon, since with a moderate transformation of the raw material a product of greater added value is obtained.

* Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas – Escuela de Ingeniería Química

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	
1. Generalidades	1
1.1. Procesos de activación	3
1.1.1. Proceso físico	3
1.1.2. Proceso químico	4
1.2. Utilidad de los sólidos porosos de carbón	4
1.3. Evaluación de desempeño del carbón activado	5
2. Metodología experimental	7
2.1. Caracterización de la materia prima	8
2.2. Montaje del horno	9
2.3. Carbonización	10
2.4. Caracterización del carbonizado	10
2.5. Reducción del tamaño de partícula del carbonizado	11
2.6. Activación del carbonizado	11
2.7. Caracterización del carbón activado obtenido	12
2.8. Análisis de resultados	14
2.9. Análisis de mercados	14
3. Resultados y análisis	15
3.1. Caracterización de la materia prima	15
3.2. Montaje del horno	16
3.3. Material alimentado al horno	17
3.4. Reducción del tamaño de partícula del carbonizado	20
3.5. Caracterización del carbón activado obtenido	20
3.6. Análisis del mercado de carbón activado	23
Conclusiones	27

Recomendaciones	28
Bibliografía	29
Anexos	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Aceite de Palma en Colombia	
Tabla 2.1 Análisis Elemental del cuesco de palma	8
Tabla 2.2. Análisis inmediato del carbonizado	10
Tabla 2.3. Caracterización del carbón activado	12
Tabla 3.1. Caracterización del Cuesco	15
Tabla 3.2. Análisis próximo del carbón vegetal	19
Tabla 3.3. Gases de combustión	19
Tabla 3.4. Área superficial del carbón activado experimental.	22

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Red cristalina (a) del diamante (cúbica), (b) del grafito (hexagonal) y (c) del carbón activo (no cristalina).	1
Figura 1.2. Distribución del tamaño de poro en algunos carbones activos obtenidos a partir de diferentes materiales ⁽²⁸⁾ .	2
Figura 2.1 Diagrama de Bloques de la Metodología.	7
Figura 2.2. Reacciones de activación.	11

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 3.1. Termograma del cuesco de palma con circulación forzada de oxígeno. (Anexo E)	38
Gráfica 3.2. Termograma del cuesco de palma con circulación natural de oxígeno. (Anexo D)	37
Gráfica 3.3. Isoterma de adsorción de Azul de metileno.	21
Gráfica 3.4. Isoterma de Adsorción de Azul de Metileno para el carbón Merck.	21
Gráfica 3.5. Histórico de importaciones de carbón activado CAN.	25
Gráfica 3.6. Histórico de exportaciones de carbón activado CAN.	25

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A Cuesco del fruto de la palma
- ANEXO B Cuesco Carbonizado
- ANEXO C Carbón Activado Experimental
- ANEXO D Termograma del cuesco de palma con circulación natural de oxígeno.
- ANEXO E Termograma del cuesco de palma con circulación forzada de oxígeno.

INTRODUCCION

El aceite de palma ha logrado una importante presencia en la economía mundial especialmente en países del sureste asiático como Malasia e Indonesia. En Colombia el cultivo de la palma de aceite ha venido creciendo durante las últimas décadas, a tal punto que actualmente en el país se tienen más de 243.037 hectáreas sembradas de las cuales se tuvo una producción de aceite en el 2004 de 631.000 toneladas, como puede apreciarse en la tabla 1.1 (3).

Tabla 1.1 ACEITE DE PALMA EN COLOMBIA (Toneladas)			
	2004	2005	% Crecimiento (2004-2005)
Siembra de Palma Aceitera (Ha)	243.037	253.557	4,3
Producción	631.000	671.000	6,3
Consumo	390.000	397.000	1,8
Exportación	244.000	284.000	16,4
Fuente: FEDEPALMA y MADR-Dirección de Cadenas Productivas			

Durante el procesamiento del fruto de la palma africana, su fraccionamiento permite la generación de una gran variedad de productos como la oleína y la estearina, que son materias primas necesarias para la fabricación de aceites refinados de cocina y para la elaboración de margarinas. Además, se utiliza para la producción de mantecas y jabones, así como en procesos oleoquímicos. Los productos de desecho, como son los efluentes líquidos del proceso también son aprovechados en la producción de biogás o como alimento para animales (ganado), parte de los residuos sólidos se utilizan

como biomasa que sirve de combustible en las calderas usadas en las plantas extractoras ⁽⁸⁾.

Con este proyecto se pretende buscar una alternativa para la utilización de los cuescos de palma utilizándolos como materia prima para producir carbón activado a nivel de laboratorio, buscando establecer una metodología para su fabricación y estudiando las variables que afectan directamente el proceso de carbonización y de activación.

De acuerdo con los balances de masa de una planta extractora de aceite se estima que en promedio por cada 100 Kg. de racimos frescos de fruto de palma se producen 22 Kg. de aceite crudo y 8.5 Kg. de cascarilla o cuesco de palma como parte de los residuos sólidos ⁽⁵⁾, considerando la producción nacional de aceite se estima que aproximadamente al año se generan cerca de 243.000 toneladas de cuesco; parte de este material tiene aplicación como combustible en los generadores de vapor de las plantas extractoras pero este tipo de combustión puede generar sustancias gaseosas que no son ambientalmente deseadas; otra parte del cuesco que se produce se usa en construcción de caminos rurales como material de relleno y también triturado, en un tamaño fino, puede servir como complemento alimenticio de animales ⁽¹⁸⁾.

El carbón activado se fabrica a partir de cualquier material carbónico como la madera, el carbón mineral, la cáscara de coco, e incluso el cuesco de palma de aceite entre otros materiales, este es clasificado según el tamaño, carbonizado y activado para crear la enorme área de superficie y la estructura interna del poro que define al carbón activado. Son las altas temperaturas (1,800-2,000° F), la atmósfera especial del horno y la inyección

de vapor al proceso de fabricación del carbón activado lo que “activa” y crea la porosidad, dejando mayormente una “esponja” de esqueleto de carbón.

El carbón activado es un excelente adsorbente universal, que también tiene algunas propiedades catalíticas. Se utiliza ampliamente para purificar agua y corrientes de aguas residuales para remover orgánicos, cloro y algunos inorgánicos. El carbón activado es el mejor adsorbente de uso general para remoción/reducción de muchos compuestos orgánicos y aún algunos inorgánicos del agua y de aguas residuales (7).

1. GENERALIDADES

El término carbón activado, en su sentido más amplio, incluye gran variedad de materiales de carbón no cristalino que presentan alto grado de porosidad y área superficial muy extensa. Su estructura es microporosa y esta característica lo hace absorber moléculas orgánicas tanto gaseosas como disueltas en líquidos.

Se obtienen por combustión, o combustión parcial, y descomposición térmica de diversas sustancias que contengan carbono. La estructura del carbón activo se ha comparado, a menudo, con la del grafito y se dice que el carbón activo es microcristalino. Sin embargo, con la microscopía electrónica se ha demostrado que es muy distinto del grafito. Se le debe imaginar como hojuelas planas de anillos aromáticos distribuidos en desorden (Figura 1.1). Dependiendo del material de origen, varían las características del carbón activo obtenido (Figura 1.2).

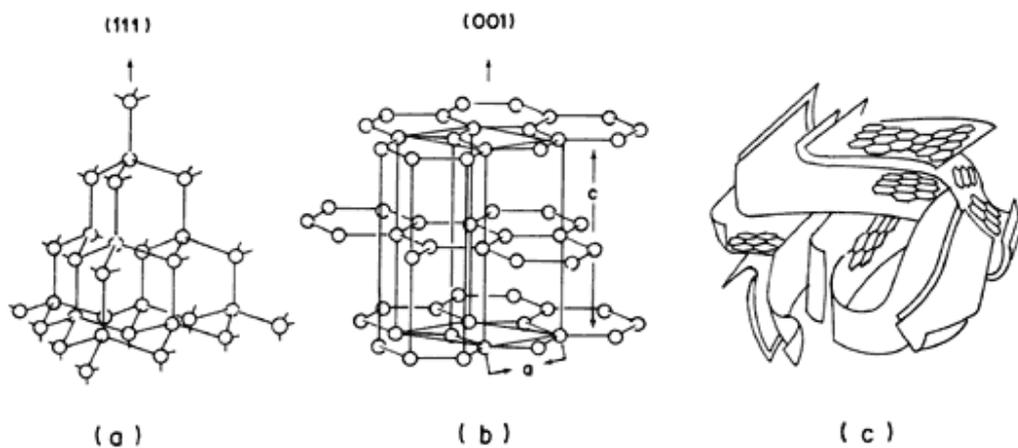


Figura 1.1. Red cristalina (a) del diamante (cúbica), (b) del grafito (hexagonal) y (c) del carbón activo (no cristalina) (28, 29).

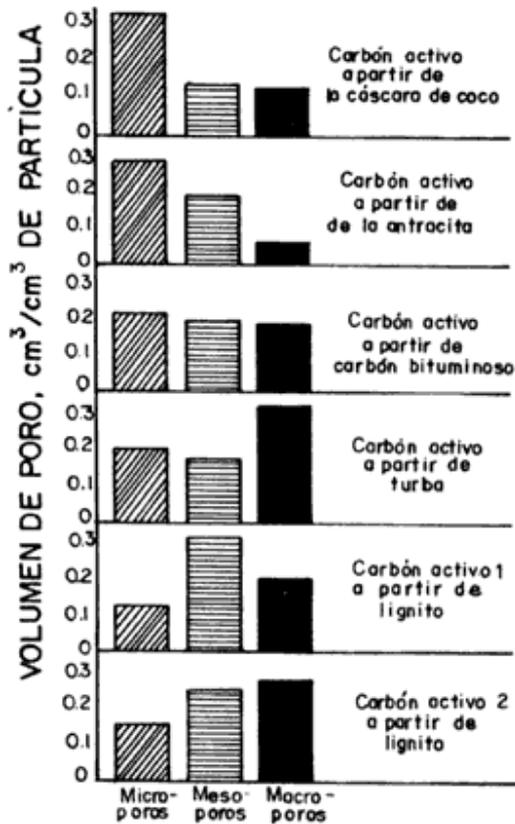


Figura 1.2. Distribución del tamaño de poro en algunos carbones activos obtenidos a partir de diferentes materiales (28).

Básicamente se consigue dos tipos de carbón activado: los de lignito, que es sintético y producido de sustancias bituminosas; y los de coco, hechos a partir de madera del árbol de coco. Por supuesto que también hay carbón de maderas duras, pero es mucho más escaso en el mercado de los carbones activado.

1.1. PROCESOS DE ACTIVACION

Las características específicas de los distintos tipos de carbones activados dependen principalmente de ^(1,4):

- a) La materia prima
- b) El proceso de activación utilizado

Es importante mencionar que 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.

Existen básicamente dos procesos a través de los cuales se puede lograr la activación:

1.1.1. *Proceso Físico*

La activación física consiste en oxidar la materia prima a altas temperaturas en presencia de un agente oxidante, usualmente, vapor de agua. Debido a que la reacción es endotérmica es necesario generar una temperatura constante, normalmente y dependiendo de la materia prima, ésta es de 800°C.

1.1.2. Proceso Químico

La activación química se basa en la deshidratación de la materia prima, mediante sustancias químicas y a una temperatura media (400 a 600 °C.), ésta depende de la sustancia química a utilizar para activar el carbón. Los agentes químicos normalmente utilizados son el ácido fosfórico, el cloruro de zinc y el ácido sulfúrico.

1.2. UTILIDAD DE LOS SÓLIDOS POROSOS DE CARBÓN

Los sólidos porosos se utilizan ampliamente en el campo de la adsorción tanto en fase gaseosa como en fase líquida, debido a esto y a que pueden retener contaminantes tanto en aguas como en aire, el uso de estos materiales se ha incrementado en las dos últimas décadas.

Como las disposiciones ambientales tratan de reducir los niveles de contaminación, el uso de los adsorbentes es indicado en muchos de los procedimientos. Una de las formas comerciales en que se consiguen los adsorbentes de carbón, es la forma granular. Sin embargo, también se disponen en polvo, fibras, impregnados y otros.

Los carbonos activados se utilizan para purificar, decolorar, desodorizar y purificar agua; recuperar solventes o purificar el aire viciado en espacios cerrados como los restaurantes y purificar los productos químicos o alimentos. Su uso es creciente en campos como la hidrometalurgia, la recuperación del oro o de la plata. Sin embargo, muchos de estos usos requieren de ciertas características de la superficie adsorbente ⁽²⁰⁾.

Algunos de los sectores en los cuales el carbón activado tiene aplicación, son presentados a continuación:

- Aeronáutica. En cabinas de pintura usada, se utilizan en sistemas de recuperación de solventes y de tratamiento de efluentes
- Agroindustria. En purificación de jugos, remoción de cenizas del jarabe de maíz, purificación de azúcar de remolacha, decoloración de endulzantes. También en la remoción de pesticidas y herbicidas de corrientes de agua.
- Automotriz. En remoción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) del terminado de superficies durante las operaciones de formado de metal. En el tratamiento de soluciones desengrasantes y solventes.
- Biotecnología. En aplicación optimizada de enzimas y separaciones cromatográficas.
- Química. En purificación, decoloración, separación, recuperación y catálisis.
- Militar. En el tratamiento de emisiones de pintura de vehículos navales y militares; en la purificación de aguas superficiales.
- Termoplásticos. En la captura de emisiones fugitivas de COVs de las operaciones de formado del plástico.

1.3. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL CARBÓN ACTIVADO

En el laboratorio es posible evaluar la capacidad del carbón activado para remover sustancias de una solución por el mecanismo de adsorción, mediante la construcción de “isotermas de adsorción”. Las isotermas son expresiones de equilibrio que relacionan la cantidad de soluto removido por unidad de masa de carbón activado adicionado (carga del carbón, q) con la concentración residual de soluto en la solución (C_e). Esa condición de equilibrio ha sido estudiada y, bajo algunas suposiciones, se han

desarrollado varios modelos de isothermas con varios parámetros que se determinan empleando datos experimentales de procesos de adsorción y haciendo un ajuste por mínimos cuadrados. Los modelos de isothermas más comúnmente empleadas son los de Langmuir y de Freundlich (11, 12, 13,15).

Isoterma de Langmuir
$$\frac{C_A}{q_A} = \frac{1}{QK} + \frac{C_A}{Q} \quad (1)$$

Donde:

C_A : concentración de equilibrio del soluto en el líquido.

q_A : capacidad de intercambio en el equilibrio.

Q : constante relacionada con los lugares ocupados y libres en la superficie del adsorbente.

K : constante de equilibrio de la reacción.

Isoterma de Freundlich
$$q_A = K(C_A)^{1/n} \quad (2)$$

Donde:

q_A : capacidad de intercambio en el equilibrio.

C_A : concentración de equilibrio del soluto en el líquido.

K : constante.

n : constante adimensional.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

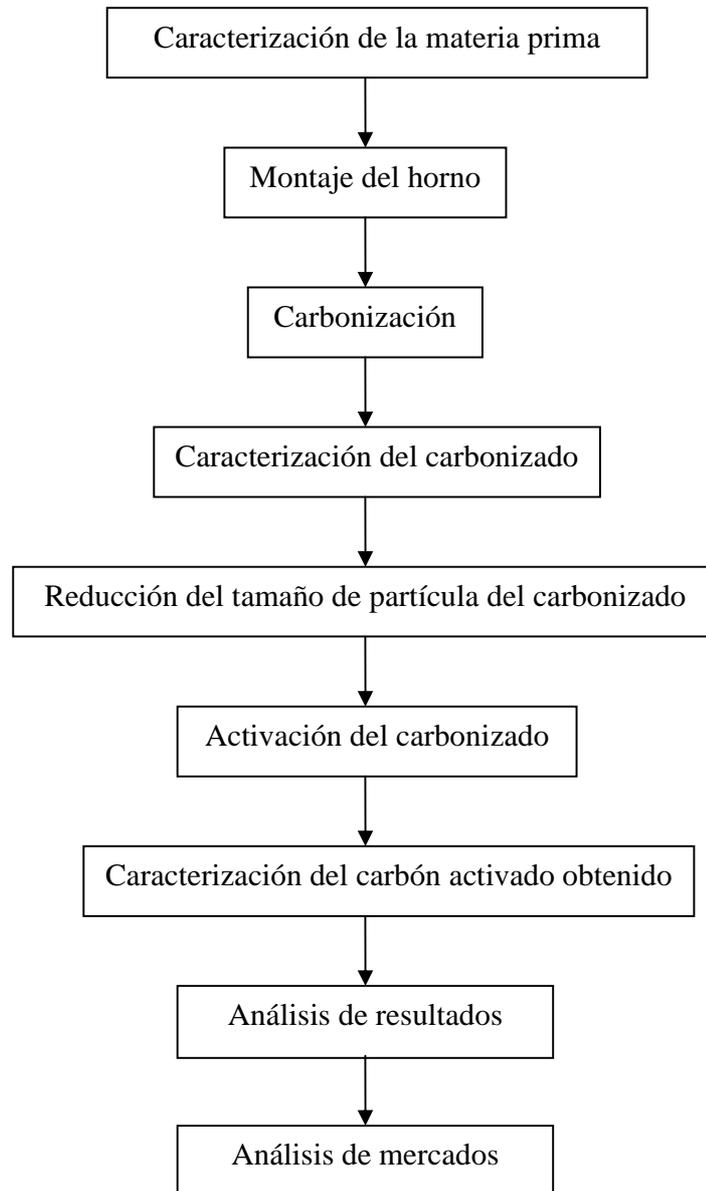


Figura 2.1 Diagrama de Bloques de la Metodología

A continuación se describe cada una de las fases que comprendió el desarrollo metodológico y las respectivas actividades que se requirieron para alcanzar los objetivos propuestos.

2.1. CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en el trabajo fue cuesco del fruto de la palma (ver anexo A). La caracterización fue realizada a una sola muestra de cuesco, la cual se escogió luego de un cuarteo de toda la carga disponible como materia prima (50 Kg.). La cantidad de muestra fue de 200 gramos, la cual se sometió a un proceso de caracterización con el fin de conocer sus propiedades y determinar las condiciones de operación del proceso de transformación del cuesco. Esta caracterización consistió en la medición de la densidad, análisis elemental, calorimétrico y termogravimétricos con base en las normas ASTM para materiales carbonosos:

- Análisis elemental

El análisis elemental es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas. La técnica está basada en la completa e instantánea oxidación de la muestra que transforma todos los compuestos en productos de combustión a una temperatura aproximada de 1000 °C ⁽²⁷⁾.

Tabla 2.1 Análisis Elemental del cuesco de palma

Parámetro	Método o Norma
Carbono	ASTM D3178-73
Hidrógeno	ASTM D3178-73
Azúfre	LECO IR-33
Nitrógeno	ASTM D3179

- Análisis Calorimétrico

El análisis calorimétrico se realizó en una bomba calorimétrica la cual se usa para determinar el poder calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante, siguiendo la norma 4809 ⁽²⁸⁾.

- Análisis Termogravimétrico

Este análisis se basa en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. La técnica utilizada fue TGA y como atmósfera controlada se utilizó oxígeno en circulación natural. El análisis termogravimétrico estudia el comportamiento térmico de los materiales, por medio del cual se determinó la estabilidad térmica de la materia prima así como su descomposición al elevarse la temperatura ⁽²⁷⁾

2.2. MONTAJE DEL HORNO

Con los datos de la caracterización física y química del cuesco, se continuó en el siguiente paso de la metodología, que consistió en el estudio y diseño del horno para la carbonización o pirolisis, proceso de descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de o con poco oxígeno de modo que no hay combustión directa ⁽²⁵⁾. Al finalizar el diseño se procedió a la construcción del horno con una capacidad de 500kg, en ladrillo y con recubrimiento refractario en su interior. La construcción se llevó a cabo en la Empresa Multiservicios de Ingeniería 1A en la ciudad de Barrancabermeja.

2.3. CARBONIZACION

Finalizada la etapa de caracterización, se llevó a cabo la carbonización en el horno construido en el paso anterior. Esta etapa se realizó de la siguiente manera: la muestra (200 Kg. de cuesco) se introdujo en un horno a temperatura ambiente; una vez cargada se elevó la temperatura hasta 380°C que es la temperatura de carbonización para llevar a cabo la pirolisis de acuerdo con los resultados de los análisis de caracterización de la materia prima y a los reportados en la literatura (4, 7, 10, 15, 16, 19, 20). Al alcanzar esta temperatura, la carbonización continuó durante 10 días y al finalizar este tiempo se retiró el carbonizado (ver anexo B), para ser sometido luego a una caracterización como se presenta en la siguiente sección. El seguimiento de la carbonización fue realizado a diario.

2.4. CARACTERIZACION DEL CARBONIZADO

El material carbonizado obtenido fue caracterizado por medio de análisis inmediatos para carbones:

Tabla 2.2. Análisis inmediato del carbonizado

<i>Parámetro</i>	<i>Norma</i>
Humedad	ASTM D3173-87
Materia Volátil	ASTM D3175-82
Cenizas	ASTM D31 74-89
Carbono fijo	ASTM D3172-89

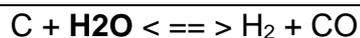
2.5. REDUCCION DEL TAMAÑO DE PARTICULA DEL CARBONIZADO

Luego de la caracterización, este carbonizado se sometió a un proceso de reducción de tamaño de partícula y granulometría. La reducción de tamaño se realizó por medio de un molino de mandíbulas para obtener el sólido de un tamaño granular, a continuación se realizó la granulometría correspondiente, escogiéndose el sólido que represente a la malla de mayor porcentaje en peso para facilitar su activación (ver anexo C).

2.6. ACTIVACION DEL CARBONIZADO

El método de activación escogido fue el de activación térmica, donde el carbón vegetal resultante se somete a temperaturas cercanas a los 1000°C, en una atmósfera inerte o reductora, saturada con vapor de agua. En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO₂, y otros se recombinan y condensan por medio del paso de vapor de agua a elevada temperatura a través del carbonizado ⁽²⁴⁾ Esto se llevó a cabo por medio del montaje de una pequeña muestra de carbonizado (10 g.), como lecho fijo, dentro de un tubo al cual se conectó un flujo de vapor sobrecalentado a 300 °C, que atravesó el lecho de una manera continua; esta activación se llevó a cabo durante 4 horas. Las reacciones que ocurren durante la activación son las siguientes:

Figura 2.2. Reacciones en la activación



2.7. CARACTERIZACION DEL CARBON ACTIVADO OBTENIDO

El carbón activado producido por activación térmica fue caracterizado bajo los siguientes parámetros:

Tabla 2.3. Caracterización del carbón activado

Análisis	Norma o técnica
Azul de metileno	ASTM D3860
Número de yodo	ASTM D4607
Área superficial	BET
Humedad	ASTM D2867
Cenizas	ASTM D2866
Acidez	ASTM D3838

- Determinación de la capacidad adsorptiva del carbón activado por medio de la técnica de isoterma en fase acuosa.

Esta técnica también es conocida como Actividad respecto al azul de metileno o número de azul de metileno, en el trabajo nos referiremos a ella como azul de metileno. Este método es una forma fácil y sencilla para estimar la actividad del carbón; el azul de metileno es el compuesto mas usado en la evaluación del poder decolorante del carbón activado y su adsorción da indicios de la presencia de macro y mesoporos. Para la realización de esta prueba se empleo la norma técnica ASTM D3860, variando únicamente el porcentaje de carbón utilizado

El objetivo de esta técnica es el trazado de una isoterma de adsorción siguiendo la Ecuación de Freundlich:

$$\frac{X}{m} = KC^n$$

X: mg de Azul de Metileno

M: gramos de carbón empleado

C: color que permanece, en unidades de concentración ppm

K y n: constantes

- Determinación del número de yodo en el carbón activado

La adsorción de yodo se realizó con el propósito de establecer la capacidad del carbón activado obtenido por activación térmica, de adsorber moléculas no polares de diámetro pequeño. Para esta determinación se utilizó la norma ASTM D4607.

- Área superficial

Para la determinación del área superficial se utilizó la isoterma de adsorción (BET). Además del área superficial, el análisis permite determinar ⁽²³⁾:

- Distribución de tamaños de microporos
- Porosidad total

- Humedad

Se determinó la humedad del carbón activado aplicando la norma ASTM D2867.

- Cenizas

Esta prueba se obtuvo aplicando la norma ASTM D2866.

2.8. ANALISIS DE RESULTADOS

En esta sección se tomaron los resultados obtenidos de la caracterización del carbón activado obtenido y se analizaron con el fin de clasificar el carbón activado experimental con respecto al que encontramos en el mercado. Además, con este análisis podemos realizar un estudio del mercado del carbón activado en el país.

2.9. ANALISIS DE MERCADOS

Se realizó un estudio del mercado del carbón activado en Colombia, para así conocer la demanda del país, utilización del carbón activado, producción en Colombia y en el mundo, importaciones y precios.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1. CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA

A continuación se presentan los datos correspondientes a la caracterización del cuesco:

Densidad Aparente: 1,47 g/cm³

- Análisis elemental y Calorimetría

Tabla 3.1. Caracterización del Cuesco

Carbono	61 %
Hidrógeno	5.91 %
Nitrógeno	1.06 %
Azufre	0.022 %
Oxígeno	29.14 %
Cenizas	1.76 %
Capacidad Calorífica	25.46 MJ/Kg.

Es fácilmente observable el alto contenido de carbono en el cuesco de palma, y es en este elemento en el que se basa la producción de carbón activado, ya que el procedimiento posterior es la modificación de la estructura porosa de ese carbono fijo.

- Termogravimetría

En este análisis se realizaron dos corridas: la grafica 3.1. se refiere al análisis con circulación forzada de oxígeno y la gráfica 3.2. corresponde al análisis con circulación natural de oxígeno.

De acuerdo a la gráfica 3.1. se nota el aumento rápido de la temperatura hasta alcanzar los 402 °C, y luego su disminución hasta los 369°C; esto

indica el encendido con generación de llama en el cuesco. En la gráfica 3.2., existe el aumento de temperatura pero de una manera mas controlada y sin disminución de esta, lo cual indica que al carbonizar el cuesco con una circulación natural de oxígeno, es poco probable la generación de llama, que es contraproducente ya que genera un mayor contenido de cenizas en el carbonizado.

Con base en los resultados de este análisis se determinó la temperatura de carbonización del cuesco en el horno, la cual es a 380°C, ya que en ambas gráficas se aprecia que a partir de esta temperatura el porcentaje de pérdida de peso se mantiene de una manera asintótica.

3.2. MONTAJE DEL HORNO

Para realizar la carbonización del cuesco de palma se construyó un horno tipo colmena, en forma cúbica y con un volumen de 1m³, este se construyó en ladrillo refractario con capacidad para 500 kg de cuesco, el horno contó con dos orificios pequeños en la parte inferior mediante los cuales se controló el flujo de aire y se le cerró en la parte superior permitiendo la salida de los gases de combustión.

El principio usado para la carbonización de la materia orgánica presente en el cuesco, fue usar este mismo material como combustible en condiciones controladas de flujo de aire, que permitieron eliminar por combustión los compuestos volátiles y dejar el carbono fijo formando una estructura carbonácea para su posterior activación. Esta combustión debe ser deficiente en aire para impedir que el cuesco genere llama y el material se quemara completamente reduciéndose a cenizas.

Dentro del proceso, el cuesco se sometió a eliminación de la humedad mediante su exposición al sol por tres días, posteriormente se dispuso en el horno de carbonización donde se cubrió y se inició la ignición de una pequeña porción del material en la parte inferior. El cuesco se dejó en proceso de carbonización durante diez días, transcurrido este tiempo se descargó el horno observando que la cantidad de cuesco alimentada no se carboniza completamente en la región central inferior, puesto que es el sitio donde se presenta mayor deficiencia de aire.

3.3 MATERIAL ALIMENTADO AL HORNO

El horno de carbonización fue cargado con 200 Kg de cuesco de palma seco, con una densidad aparente de 550 Kg/m^3 , este material fue encendido y se garantizó el suministro de aire por flujo natural.

Para determinar la cantidad de aire necesario para la combustión incompleta del cuesco se partió de datos reportados en la literatura ⁽⁸⁾ en donde se establecen que el requerimiento estequiométrico de aire para lograr la combustión completa del cuesco de palma es de 6,31 Kg de aire seco por Kg de cuesco a ser quemado. En donde esta combustión desprende 25,46 MJ/Kg.

Con esta información se determinó la cantidad de aire necesaria en el horno para producir la combustión completa del cuesco.

Una vez determinada la cantidad de aire para combustión completa y suponiendo condiciones relativamente constantes en el clima durante los 10 días de experimentación, se consultaron datos climáticos promedios de la ciudad de Barrancabermeja⁽²³⁾, durante el mes de experimentación, como

son: temperatura promedio, porcentaje de humedad relativa y velocidad promedio del viento. Con base en estos datos se hizo un estimativo del área máxima de los orificios que permiten la entrada de aire al horno a fin de controlar la deficiencia de oxígeno y obtener el material carbonizado.

Cuesco: 200 Kg

Humedad Relativa: 80%

Temperatura promedio: 27,9 ° C

Densidad del aire: 1,175 kg/m³

Velocidad promedio del viento: 2,5 Km/h

Requerimiento estequiométrico de aire para combustión completa: 6,31 Kg aire/ Kg cuesco

Con estos datos se estimó que el flujo másico (F) necesario para la combustión total del cuesco debe ser de 5,37 Kg/h, considerando que el aire tiene una humedad absoluta de 0,021 kg H₂O/ kg aire seco.

Partiendo del flujo F se estimó el diámetro (D) máximo posible que pueden presentar los orificios del horno mediante la ecuación siguiente.

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi v \rho}}$$

Resolviendo la ecuación anterior, en donde v es la velocidad del viento y ρ es la densidad promedio del aire, se encontró que el diámetro máximo permitido para los orificios del horno es de 4,8 cm.

Se realizaron tres experimentos variando el diámetro del orificio así: 5 cm., 4 cm., y 3 cm. En la prueba con diámetro de orificio de 5 cm. el material se

incineró casi completamente, en la prueba de diámetro de orificio de 3 cm. el material se carbonizó parcialmente quedando gran cantidad de cuesco sin carbonizar. Con el diámetro en 4 cm. el material obtenido presentó buena carbonización y eliminación de la materia volátil por combustión. Se obtuvo el siguiente análisis próximo:

Tabla 3.2. Análisis próximo del carbón vegetal

Humedad (%)	Volátiles (%)	Carbón Fijo (%)	Cenizas (%)
4	13.5	81	1.5

Haciendo una relación con respecto al peso del cuesco alimentado se observa que el carbonizado tiene un peso de 63,7 Kg lo cual indica que el 31,8% del cuesco se transforma en carbonizado.

En cuanto a los gases de chimenea, se considera que el horno no debe presentar acumulación de masa, por ello todos los gases generados durante la pirolisis del cuesco serán emitidos, según la literatura, los gases producto de la descomposición térmica de materiales como el cuesco de la palma presentan la siguiente composición:

Tabla 3.3. Gases de combustión

Gases Condensables	% Vol	Gases No Condensables	% Vol
Vapor de agua	67,9	Dióxido de Carbono	16,4
Acético	1,9	Monóxido de Carbono	11,9
Alquitrán	0,8	Metano	0,6
Acetona	0,1	Etileno	0,3
Metanol	0,1		

En cuanto a la cinética de la reacción de pirolisis de acuerdo con estudios sobre el tema, se ha encontrado experimentalmente, por medio de análisis termogravimétricos que el orden de la reacción se aproxima a 2 cuando la reacción se realiza cercana a 400° C obteniéndose un rendimiento en carbonizado entre 34% y 39% (22).

3.4. REDUCCION DEL TAMAÑO DE PARTICULA DEL CARBONIZADO

La granulometría obtenida luego de la trituración en el molino de mandíbulas fue la siguiente: el 65% corresponde a la malla 120 y el 35% eran partículas de un tamaño menor, que no se pudieron evaluar.

3.5. CARACTERIZACION DEL CARBON ACTIVADO OBTENIDO

Para complementar el análisis de la calidad adsorbente del carbón activado experimental, se realizaron las pruebas de Azul de Metileno y Número de Yodo a un carbón analítico producido por Merck.

- Actividad con respecto al azul de metileno

Se trazó una isoterma de adsorción que sigue la ecuación de Freundlich:

$$\frac{X}{m} = KC^n$$

X: mg de Azul de Metileno

M: gramos de carbón empleado

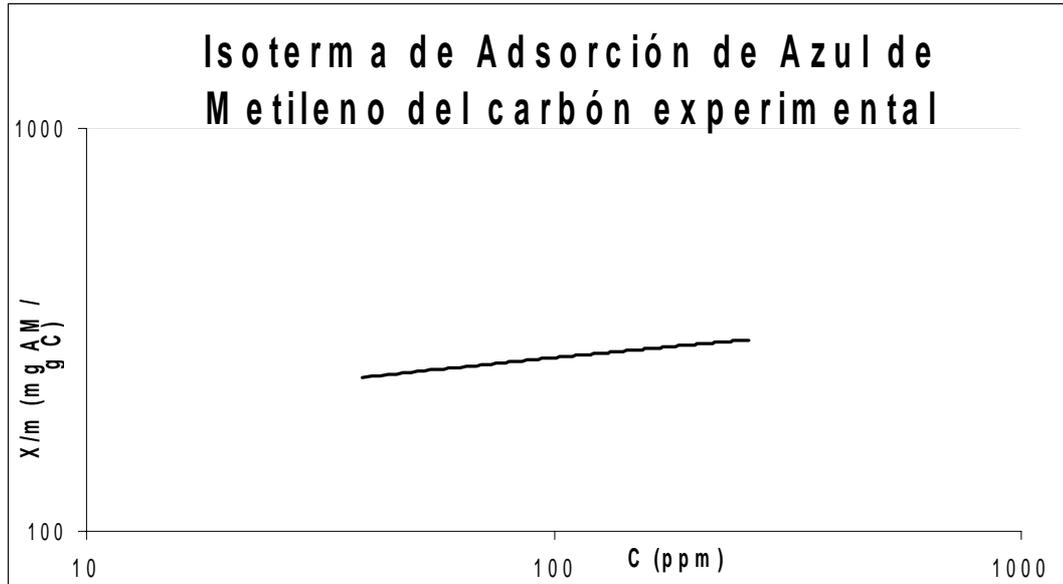
C: color que permanece, en unidades de concentración ppm

K y n: constantes

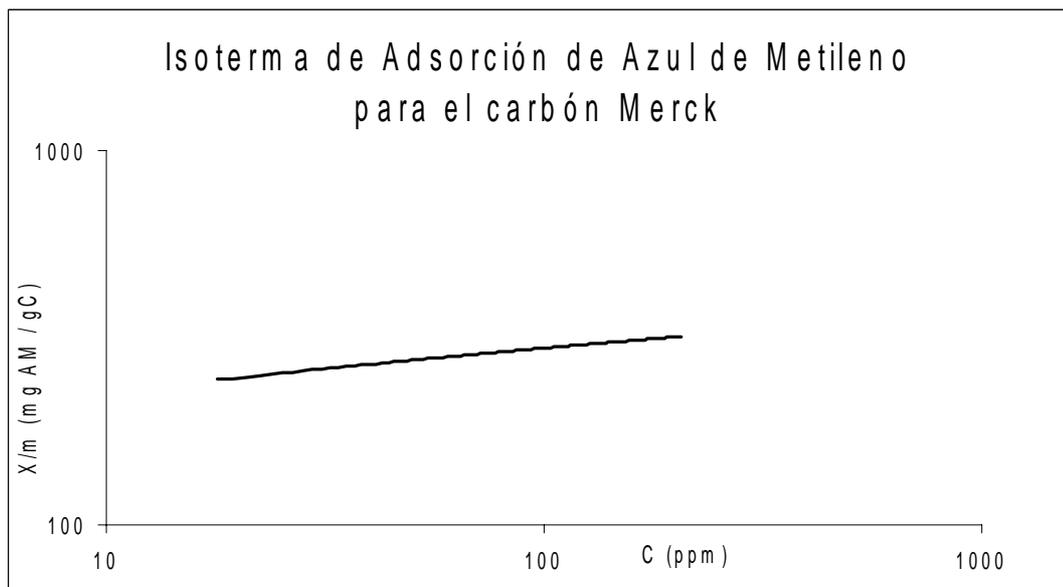
$$\frac{X}{M} = (C_0V - CV)M$$

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Gráfica 3.3. Isotherma de adsorción de Azul de metileno



Gráfica 3.4. Isotherma de Adsorción de Azul de Metileno para el carbón MERCK



- Actividad con el respecto al número de yodo

Aplicando la norma correspondiente que obtuvo los siguientes datos:

Número de Yodo _(carbón experimental) = 308.52 mg I₂ / g C

Número Yodo _(carbón Merck) = 450.65 mg I₂ / g C

Los valores de número de yodo de los dos carbones activados son cercanos y permiten calcular la actividad relativa del carbón obtenido experimentalmente, la cual es del 68.46 %.

- Determinación del Área Superficial

Los resultados obtenidos del análisis de área superficial por medio del equipo BET, son los siguientes:

Tabla 3.4. Área superficial del carbón activado experimental.

Área BET (m ² /g)	Volumen Total (cm ³ /g)	Área de Microporo (m ² /g)	Volumen de Microporo (cm ³ /g)
521	0.346	366	0.173

El área superficial obtenida es de 521 m²/g, siendo esta, un área superficial alta y corresponde a los requerimientos mínimos que debe tener un carbón activado para garantizar su capacidad adsortiva ⁽¹⁵⁾.

El carbón activado obtenido experimentalmente posee una estructura microporosa en su mayor parte que es la esperada para un carbón activado de origen vegetal.

- Humedad

Se determinó la humedad del carbón activado y se obtuvo un resultado del 5%.

- Cenizas

Aplicando la norma correspondiente del análisis de cenizas se obtuvo un valor de 1.5%.

- Acidez

Se realizó la prueba de pH y se determinó que el carbón activado experimental es neutro.

El carbón activado experimental presenta un bajo contenido de cenizas y humedad, al igual que es neutro

3.6. ANALISIS DEL MERCADO DE CARBÓN ACTIVADO

A continuación se presenta el análisis del mercado del carbón activado, considerando tanto el ámbito nacional como el internacional, se expone una perspectiva de las tendencias para los próximos años; se analizan la oferta, demanda y consumo de este producto para determinar su comportamiento a nivel comercial y se realiza un análisis en cuanto a producción y disponibilidad.

Mercado Mundial

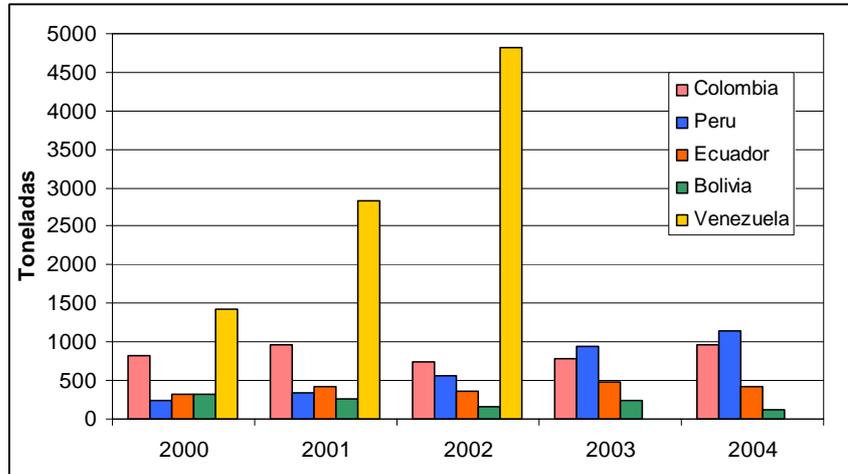
El mercado mundial del carbón activado alcanza aproximadamente 595 millones de dólares, con una tasa de crecimiento de 8% anual (en volumen) durante el periodo 1999-2003.

La demanda mundial de carbón activado crecerá al 5,2 % anualmente hasta el 2007, debido al crecimiento industrial y las aplicaciones en el tratamiento de agua, los mejores prospectos se dan en las economías emergentes, y se espera que esta industria mueva alrededor de 882 millones de dólares; puesto que la capacidad instalada ha pasado de 750.000 ton/año en 2002 a cerca de 840.000 ton/ año en el 2005.

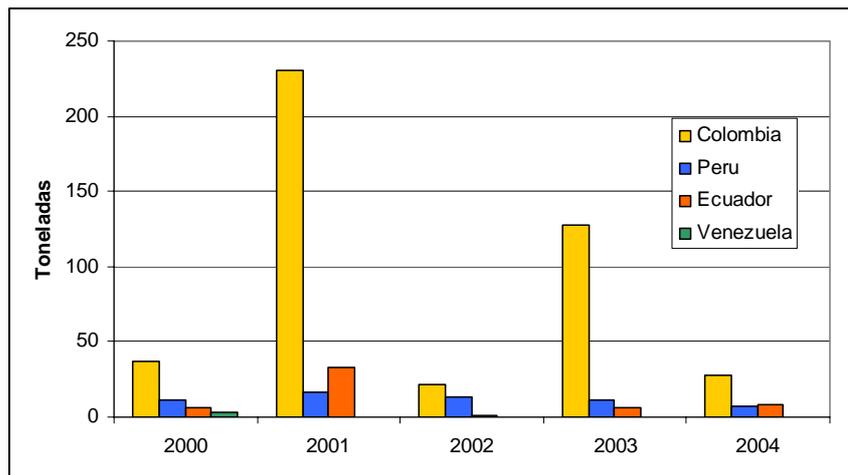
Mercado Comunidad Andina de Naciones

Como se puede observar en las siguientes figuras en los países de la Comunidad Andina el consumo de carbón activado se ve satisfecho principalmente por importaciones. Venezuela es el país con mayor volumen de importación del producto, alcanzando cerca de 4000 toneladas en 2002. Los principales orígenes de las importaciones son Estados Unidos y Asia. En cuanto a las exportaciones que se generan desde los países de la comunidad andina estas se encuentran en un nivel bastante inferior en comparación con las importaciones. Colombia es el país que presenta mayor nivel de exportaciones, siendo sus principales destinos los países Centroamericanos y alcanzando hasta 200 toneladas al año, pero en promedio las exportaciones no son superiores a las 30 toneladas anuales, en tanto que Bolivia no registra comercio de este producto.

A pesar de no pertenecer a la CAN, en el caso de Chile, alrededor del 70% del carbón activado que se consume en el país es importado, lo que representa un monto de importación de 1,8 millones de USD CIF/año, por volumen anual de 1230 toneladas año. Y en Chile se han realizado trabajos sobre la factibilidad de producción de carbón activado a partir de bambú.



Gráfica 3.5. Histórico de importaciones de carbón activado CAN



Gráfica 3.6. Histórico de exportaciones de carbón activado CAN

Mercado Nacional

Se encontró que la demanda total de carbón activado en Colombia se acerca a los 2.000.000 kilogramos por año, con una tendencia creciente desde 1990. Esta demanda es prácticamente satisfecha en su totalidad mediante importaciones. Los precios del material importado se encuentran entre \$6.500 y \$7.500 por kilogramo y los del nacional entre \$4.000 y \$5.000.

Los países de origen del carbón activado son México, Reino Unido y China con el 45.09%, 17.75% y 13.78% de participación en las importaciones colombianas.

Estos indicadores permiten concluir que en Colombia y los países vecinos existe un nicho de mercado para el carbón activado, el cual potencialmente sería el cliente directo de una planta de producción de carbón activado en la región.

CONCLUSIONES

- El carbón activado preparado por pirolisis del cuesco de palma y activado físicamente presenta una cercana capacidad de adsorción de azul de metileno y yodo con respecto a la adsorción presentada por el carbón Merck.
- Se obtuvo que el área superficial del carbón activado experimental es de 521 m²/g la cual sobrepasa levemente los requerimientos comerciales, los cuales son de mayores de 500 m²/g; mostrando que el carbón activado obtenido posee un cierto grado de utilidad
- Analizando las características obtenidas por medio del equipo BET, puede ser establecido que se obtienen una porosidad micro porosa aceptable por medio de la pirolisis de cuesco de palma de aceite.
- Los resultados obtenidos de la caracterización del carbón activado que se obtuvo ha permitido mostrar una opción interesante para convertir residuos de la industria palmera en producto de mayor valor agregado, considerando que la materia prima es de bajo costo y además la demanda de carbón activado es alta.

RECOMENDACIONES

- Se considera conveniente realizar el estudio de producción de carbón activado utilizando un horno de lecho fluidizado en el cual se realice el proceso de pirólisis y activación en el mismo equipo.
- Para mejorar la estructura porosa del carbón activado, se hace necesario la utilización de vapor de agua sobrecalentado a una temperatura superior a 300°C que fue la usada en el presente estudio.
- Sería conveniente la realización de pruebas a escala piloto a fin de obtener datos confiables para realizar un análisis financiero para evaluar la factibilidad económica de la producción de carbón activado a partir de cuesco de palma.

BIBLIOGRAFIA

1. ADINATA, Donni; ASHRI, Wan Mohd y KHEIREDDINE, Mohd. Preparation and Characterization of Activated Carbon from Palm Shell by Chemical Activation with K_2CO_3 . Bioresource Technology. 2005.
2. AGUIRRE, J.; OCAMPO, A.; ESPINEL, J.; BECKER, H. y BARTON, S.S. Production of Active Carbon by Continuous Pyrolysis and Activation in Fluidized Beds. Journal of Engineering for International Development, Vol 2. No. 1. 1998. 35-43.
3. Anuario Estadístico 2005; La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo; Fedepalma; 2005.
4. ASHRI, Wan Mohdy SHADUDDIN, Wan. Comparison on pore Development of Activated Carbon Produced from Palm Shell and Coconut Shell. Bioresource Technology 93. 2004. 63-69.
5. Báez H. Alexander; Estudio técnico-económico de los procesos de prensado, desfibrado y sedimentación en una planta de beneficio de aceite de palma. Tesis de grado; Universidad Industrial de Santander; 2005.
6. CAGNON, Benoit; PY, Xavier, GUILLOT, André y STOECKLI, Fritz. The Effect of the Carbonization/Activation Procedure on the

Microporous Texture of the Subsequent Chars and Active Carbons. Microporous and Mesoporous Materials 57. 2003. 273-282.

7. Carbón Activado, Magia Negra para Tratamiento de Agua; Red de desarrollo sostenible y medio ambiente - REDESMA, Boletín electrónico AÑO INTERNACIONAL DEL AGUA DULCE II - 27 noviembre 2003.
8. Combustion-Related Characteristics of Some By-products of Agricultural Processing Industries. Biomass 18. 1989. 69-72.
9. GARCIA, Garcia A.; GREGORIO A.; FRANCO, C.; PINTO, D.; BOAVIDA, I. Unconverted Chars Obtained During Biomass Gasification on a Pilot-Scale Gasifier as a Source of Activated Carbon Production. Bioresource Technology 88. 2003. 27-32.
10. GAÑAN, J.; TUREGANO, J.P.; CALAMA, G.; ROMAN, S. Y AL-KASSIR, A. Plant for the Production of Activated Carbon and Electric Power from the Gases Originated in Gasification Processes. Fuel Processing Technology 87. 2006. 117-122.
11. GUO, Jia y LUA, Aik Chong. Textural and Chemical Characterizations of Activated Carbon Prepared from Oil-Palm Stone with H₂SO₄ and KOH Impregnation. Microporous and Mesoporous Materials 32. 1999. 111-117.
12. GUO, Jia y CHONG, Aik. Microporous Activated Carbons prepared from Palm Shell by Thermal Activation and Their Application to Sulfur

Dioxide Adsorption. Journal of Colloid and Interface Science 251. 2002.

13. GUO, Jia y LUA, Aik Chong. Characterization of Chars Pyrolyzed from Oil Palm Stones for the Preparation of Activated Carbons. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 46. 1998. 113-125.
14. GUO, Jia y CHONG, Aik. Textural and Chemical Characterizations of Adsorbent Prepared from Palm Shell by Potassium Hydroxide Impregnation at Different Stages. Journal of Colloid and Interface Science. 254. 2002.
15. HESCHEL, Wolfgang y KLOSE, Erhard. On the suitability of Agricultural by Products for the Manufacture of granular Activated Carbon. Butterworth Heinemann. Fuel. 1995. Volume 74. Number 12.
16. Instituto de Hidrografía, Meteorología y Estudios Ambientales.
17. LUA, Aik Chong y GUO, Jia. Activated Carbon Prepared from Oil Palm Stone by One-step CO₂ Activation for Gaseous Pollutant Removal. Carbon 38. 2000. 1089-1097.
18. LUA, Aik Chong y GUO, Jia. Preparation and Characterization of Chars from Oil Palm Waste. Carbon 36. 1998. 1663-1670.
19. LUA, Aik Chong; LAU, Fong Yow y GUO, Jia. Influence of Pyrolysis Conditions on Pore Development of Oil-Palm-Shell Activated Carbons. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 76. 2006. 96-102.

20. Medina Jorge Eduardo, Rueda Flor Matilde; Diseño de una planta piloto para la fabricación de carbón activado a partir de los cuercos de nueces de la palma africana; Tesis de grado; Universidad Industrial de Santander; 1976.
21. NASSER, Abdel y HENDAWY, El. Surface and Adsorptive Properties of Carbons Prepared From Biomass. Applied Surface Science 52. 2005. 287-295.
22. OLUFAYO A. A.; Combustion-related characteristics of some by-products of agricultural processing industries; Department of Agricultural Engineering and Mechanisation, Federal University of Technology; Nigeria; Biomass Volume 18, Issue 1 , 1989, Pages 69-72.
23. SAVOVA, D.; APAK, E.; EKINCI, E.; YARDIM, F.; PETROV, N.; BUDINOVA, T. RAZVIGOROVA, M. Y MINKOVA, V. Biomass Conversion to Carbon Adsorbents and Gas. Biomass and Bioenergy 21. 2001. 133-142.
24. Sistema de Información Ambiental Aeropuerto Yarigüés.
25. SU, Wei; ZHOU, Li y ZHOU, Yaping. Preparation of Microporous Activated Carbon from Coconut Shells without Activating Agents. Carbon 41. 2003. CO1-863.
26. SMITH, J.M. Ingeniería de la Cinética Química. Compañía Editorial Continental, S.A. México. 1997.

27. WILLIAMS, Paul T. y REED, Anton R. Development of Activated Carbon Pore Structure Via Physical and Chemical Activation of Biomass Fibre Waste. *Biomass and Bioenergy* 30. 2006.144-152.
28. ZHONGHUA, Hu; HUIMIN, Guo; SRINIVASAN, M.P. y YAMING, Ni. A Simple Method for Developing Mesoporosity in Activated Carbon. *Separation Purification Technology* 31. 2002. 47-52.
29. www.carbonapelsa.com.mx
30. www.cas-instrumental.com.ar
31. www.cchen.gov.cl
32. www.iprocro.org
33. www.noharm.org
34. www.oviedo.es
35. www.ua.es
36. www.uned.es

ANEXO A

Cuesco del fruto de la palma



Fuente: Los autores

ANEXO B
Cuesco Carbonizado



Fuente: Los autores

ANEXO C

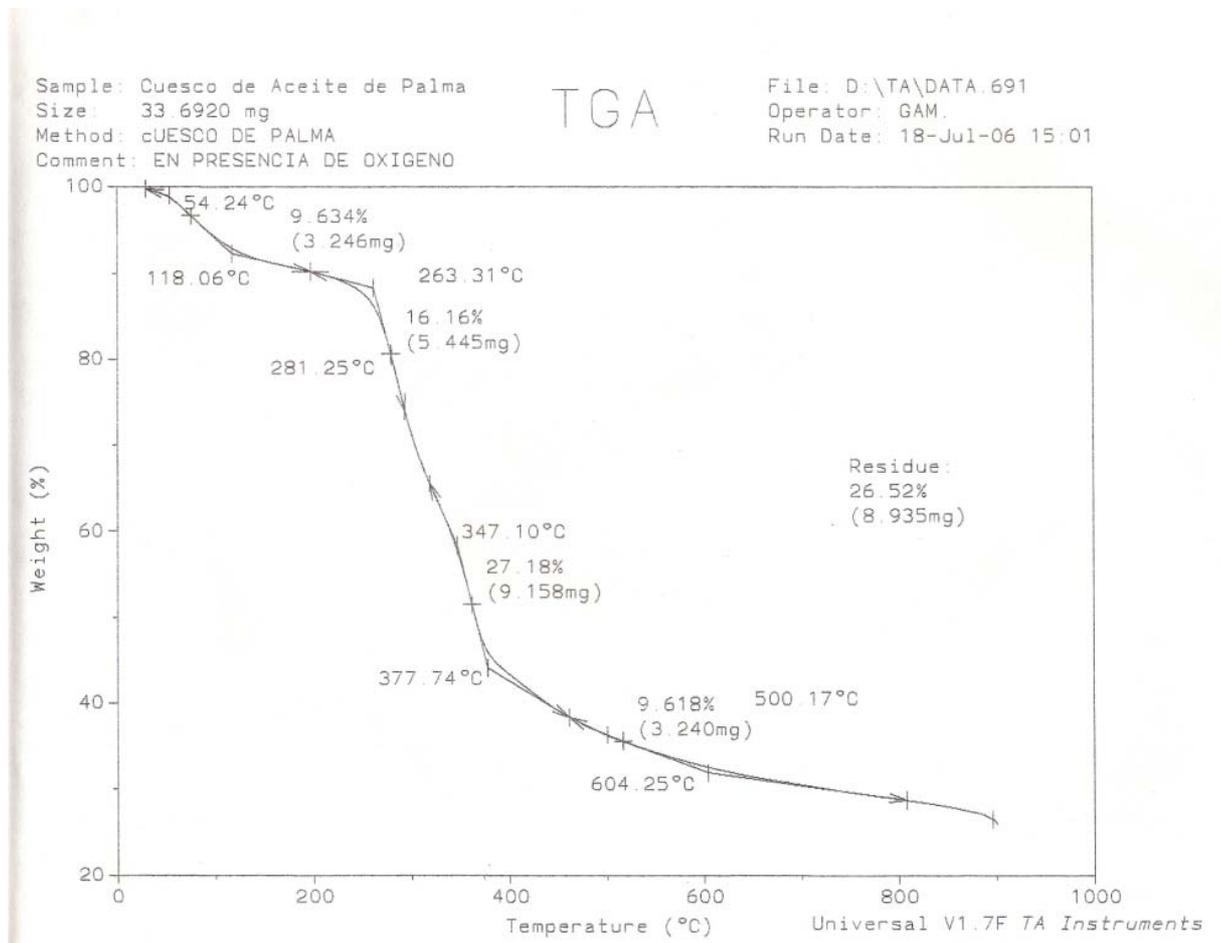
Carbón Activado Experimental



Fuente: Los autores

ANEXO D

Termograma con circulación natural de oxígeno



ANEXO E

Termograma con circulación forzada de oxígeno

Sample: Cuesco quemado
Size: 25.9110 mg
Method: cUESCO DE PALMA
Comment: EN PRESENCIA DE OXIGENO

TGA

File: D:\TA\DATA.693
Operator: GAM.
Run Date: 19-Jul-06 13:56

