

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A
PARTIR DE CÁSCARA DE COCO**

**NATALY CORAL CALPA
JOHANA MARCELA MUÑOZ CASTRO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SAN JUAN DE PASTO
2011**

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A
PARTIR DE CÁSCARA DE COCO**

**NATALY CORAL CALPA
JOHANA MARCELA MUÑOZ CASTRO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Agroindustrial**

**Director:
Ing. RENATO PANTOJA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SAN JUAN DE PASTO
2011**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado, son responsabilidad exclusiva de los autores”.

“Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño”.

Nota de aceptación

DIRECTOR

JURADO

JURADO

San Juan de Pasto, Noviembre de 2011

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	14
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. MARCO REFERENCIAL.....	20
4.1 MARCO CONCEPTUAL	22
4.1.1 Mercado del carbón activado:	22
4.1.2 Coco.....	23
4.1.3. Cáscara de coco.	23
4.1.4 Carbón activado	25
4.1.5 Clasificación de los carbones activados.....	26
4.2 OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE COCO	27
4.2.1 Activación.....	28
4.2.2 Carbonización.	31
4.3 CARACTERIZACION DEL CARBÓN OBTENIDO	31
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	33
5.1.1 Análisis del diseño experimental.	34
5.2 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA.....	35
5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	35

5.3.1. Humedad (%H):.....	36
5.3.2. Contenido de materia volátil (% VM):	36
5.3.3 Cenizas (%A):	36
5.3.4. Carbón fijo (% FC):.....	36
5.4. ENSAYOS EN PLANTA PILOTO	37
5.4.1 Adecuación de cáscara de coco.....	37
5.4.2 Tamizado.....	37
5.4.3 Impregnación.....	38
5.4.4 Secado de la materia prima.....	38
5.4.5 Carbonización.	38
5.4.6 Lavado con HCl.....	39
5.4.7 Caracterización del carbón activado resultante.....	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	42
6.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	42
6.2.1 Análisis para la variable de respuesta: adsorción de cromo.	44
6.2.2. Análisis del diagrama de Pareto.....	45
6.2.3. Análisis del diagrama de efectos principales.....	46
6.2.4. Análisis de la superficie de respuesta para adsorción de cromo.....	47
6.2.5. Análisis del contorno de la superficie de respuesta.....	48
6.2.6. Optimización de respuesta.....	49
6.2.7. Ecuación matemática para la adsorción de cromo.....	50
6.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	51
6.3.1. Isotermas de adsorción.	53

7. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO	55
7.1 BASE DEL DISEÑO	55
7.2 MATERIAS PRIMAS	55
7.3 EQUIPOS NECESARIOS PARA EL PROCESO	57
7.4 SERVICIOS INDUSTRIALES	57
7.5 EVALUACIÓN DE COSTOS	58
7.5.1 Costos de materia prima, insumos y servicios industriales	59
7.5.2 Costos del personal.....	60
7.5.3 Resumen de Costos.....	61
8. CONCLUSIONES.....	62
9. RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFIA	64
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rendimiento de materias primas orgánicas en la producción de carbón activado a diferentes temperaturas*.....	24
Tabla 2. Densidad aparente (dap), densidad real (dr), y porosidad (P) en materias primas orgánicas*.....	25
Tabla 3. Descripción del diseño experimental*.....	34
Tabla 4. Propiedades de la materia prima*.....	35
Tabla 5. Diseño experimental para la obtención de carbón activado*.....	43
Tabla 6. Análisis de varianza para la adsorción de cromo*.....	44
Tabla 7. Respuesta óptima para la adsorción de cromo*.....	50
Tabla 8. Soluciones de azul de metileno*.....	52
Tabla 9. Absorbancias para curva de calibración*.....	52
Tabla 10. Concentración final después del tratamiento con carbón activado*.....	53
Tabla 11. Datos para isoterma de adsorción*.....	54
Tabla 12. Insumos necesarios para 2 toneladas de Carbón activado*.....	55
Tabla 13. Equipos para la producción de carbón activado.....	57
Tabla 14. Servicio industriales necesarios para la producción de carbón activado.....	57
Tabla 15. Precios de los equipos Principales del proceso.....	58
Tabla 16. Precio de las materias primas por día.....	60
Tabla 17. Precio de servicios industriales por día.....	60
Tabla 18. Valor Salarial en Colombia.....	60
Tabla 19. Costos de personal.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Clasificación del carbón por tamaño de partícula.....	27
Figura 2: Diagrama de activación química	30
Figura 3. Molino de martillos (Javar), Planta piloto de la Universidad de Nariño*.	37
Figura 4. Mufla (Thermolab), Ciencias pecuarias, Universidad de Nariño*	39
Figura 5. Placa de agitación Thomas Scientific*	40
Figura 6. Diagrama de Pareto para el estudio de los factores de adsorción de cromo obtenido en las muestras	46
Figura 7. Diagrama de efectos principales para adsorción de cromo*	47
Figura 8. Superficie de respuesta para la adsorción de cromo*	48
Figura 9. Contorno de la superficie de respuesta estimada sobre la adsorción de cromo*	49
Figura 10. Balance de Materia para 2 Ton / día	56
Figura 11. Inversión de Capital	59

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CÁSCARA DE COCO	70
ANEXO B. CURVA DE CALIBRACIÓN.....	71
ANEXO C. ISOTERMA DE ADSORCIÓN.....	72

GLOSARIO

Activación: proceso por medio del cual se activa la superficie de un material carbonoso.

Adsorbato: partícula retenida en la interfase de adsorción.

Adsorbente: material utilizado para eliminar sustancias indeseables.

Adsorción: es el proceso mediante el cual un sólido poroso (a nivel microscópico) es capaz de retener partículas de un fluido en su superficie tras entrar en contacto con éste.

Absorción: es la operación que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución.

RESUMEN

El presente trabajo se basa en el estudio de las condiciones óptimas para la obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco. Este material considerado como residuo, se trató por medio de activación química utilizando como agente activante NaOH en concentraciones de 5, 17.5 y 30% p/p, en condiciones de activación NaOH/cáscara de coco de 3:1, un tiempo de impregnación de 2.5 horas y carbonización en una mufla a temperaturas de 400°C, 600°C y 700°C variando el tiempo de exposición de 1 a 4 horas.

El carbón activado resultante se evaluó en la adsorción de cromo en una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) de concentración inicial 2ppm, la solución después del tratamiento con el carbón se analizó por adsorción atómica; posteriormente el análisis estadístico de los resultados arrojó una respuesta óptima determinando que las condiciones adecuadas para la elaboración de carbón activado a partir de cáscara de coco son: agente activante 25.8139%, temperatura 679.078°C y tiempo de carbonización de 2.7106 horas.

Con el fin de realizar la caracterización, se efectuó la medición del porcentaje de decoloración ejecutada por el carbón activado por medio del método de azul de metileno con espectrofotometría y sus respectivas isothermas. Los resultados mostraron que el carbón obtenido tiene una capacidad de decoloración del 96.89% promedio, demostrando la eficiencia de las condiciones óptimas estudiadas.

ABSTRACT

This work is based on the study of the optimal conditions for obtaining activated carbon from coconut shell. This material, considered as waste, was treated by chemical activation using NaOH as the activating agent at concentrations of 5, 17.5 and 30% w / w, with NaOH activation conditions / coconut shell, 3:1, a soaking time of 2.5 hours and charring in a muffle at temperatures of 400 ° C, 600 ° C and 700 ° C by varying the exposure time from 1 to 4 hours.

The resulting activated carbon was evaluated in the adsorption of chromium in a solution of potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$) 2ppm initial concentration. After treatment, the solution with carbon was analyzed by atomic absorption. The statistical analysis of the results show a response determining the optimal conditions for preparing activated carbon from coconut shell, these are: 25.8139% activating agent, temperature and time of carbonization 679,078 of 2.7106 hours.

In order perform the characterization, we measured the percentage of bleaching aused by the activated carbon using the method of the methylene blue with spectrophotometry and their respective isotherms. The results showed that the obtained carbon have a bleaching capacity of 96.89%, demonstrating the efficiency of the optimal conditions studied.

INTRODUCCION

En Nariño, la siembra de coco representa el 8% de la producción total de los principales cultivos; sin contar el café, con un total de 49.576 toneladas al año, las cuales son destinadas principalmente al consumo inmediato sin procesamiento y a la producción de coco deshidratado para repostería [Silva, J., & Rodríguez, C., 1990]; de aquí se desliga el desuso de los residuos que se generan a causa de su procesamiento refiriéndose a que la estopa y la cáscara se pierden ocasionando grandes volúmenes de desperdicio [Luna, D., González, A., 2007].

El cuesco esta compuesto principalmente por lignina, celulosa y pentosano; este material puede ser usado para la remoción de sustancias orgánicas, como catalizador [Machado, R., & Hurtado, L., 1996] y en la elaboración de carbón activado, ya que contiene gran cantidad de carbono fijo, que es aquel compuesto que no se altera a pesar de ser sometido a diferentes condiciones de proceso [Reyes, E., Cerino, M., & Suárez, 2006]. Esta característica es la principal responsable de las capacidades adsorbentes, que son utilizadas ampliamente en aplicaciones tanto en fase gas como fase líquida. [Pérez, 2003],

A través del tiempo se han propuesto realizar una gran variedad de procesos para utilizar la cáscara de coco en la producción de carbón activado, el cual se considera apto en la purificación de líquidos y gases, refinación del azúcar, decolorante, desodorante, recuperación de solventes, recuperación de material radioactivo, en filtros de cigarrillos y separación de gases [Proexport, 2010]; aun así, en las industrias de Nariño no se conoce que esta materia prima tenga un destino final con aprovechamiento útil, que además beneficie económicamente a quienes generan el desecho y al mismo tiempo aporte a la economía del departamento de Nariño y ayude a disminuir un gran impacto ambiental.

La demanda de carbón activado en Colombia es tan grande que no existe suficiente suministro de cáscara de coco para satisfacerla. Su producción es del orden de 900 a 1300 ton/año, de los cuales un 48% es abastecido por importaciones desde México, Europa, Estados Unidos y China [Flores, J. & Castillo, E., 2003].

En este orden de ideas se encontró la posibilidad de realizar la investigación y estudiar las condiciones para producir por medio de activación química y a partir de cáscara de coco, un carbón activado de características adecuadas para adsorción. De esta manera se está aprovechando en buena medida los residuos generados en el procesamiento del coco, fomentando la agroindustria como un mecanismo para la maximización de los recursos que se tienen a la mano y no se les ha dado un buen uso, es así como esta investigación, contempló el primer paso para generar ese empuje en el desarrollo de una nueva empresa.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La cáscara de coco es considerada un óptimo material ya que produce un carbón activado de características excelentes comparado con otras materias primas más costosas como madera y carbón mineral. [Granados,D. et al., 2008]

En Colombia al año se generan cerca de 243.000 toneladas de cuesco de coco provenientes de las industrias procesadoras de coco las cuales generan un impacto ambiental considerable; por cada 100 kg de coco se producen 8,5 kg de cascarilla o cuesco como parte de los residuos sólidos, esto es equivalente a 200g de cáscara por coco, de donde se puede obtener un promedio de 40g de carbón activado [Mejia, O. et al., 2007].

La determinación de las condiciones requeridas para llevar a cabo el proceso de fabricación de carbón activado a partir de cáscara de coco se constituye en una etapa necesaria para la industrialización de estos residuos, al mismo tiempo que se convierte en una alternativa al impacto ambiental generado por su disposición final, ya que es una materia prima que puede ser beneficiada para la obtención de carbón activado.

De este modo, la eficiencia del carbón obtenido se evalúa con la reducción de cromo en agua, ya que es altamente contaminante y los problemas que causa están relacionados con el desarrollo industrial en general, lo cual puede alterar seriamente el equilibrio biológico causando efectos tóxicos tanto en plantas como en animales [Departamento de salud y seres humanos de EE.UU., 2007]; y su capacidad de absorción se determina por medio de decoloración con azul de metileno, ya que es un método indicador considerado muy efectivo.

2. JUSTIFICACIÓN

Los residuos generados por las industrias procesadoras de coco son provenientes de ciudades como Cali, Bogotá y Medellín; en el departamento de Nariño proceden del Municipio de Tumaco en donde esta fruta es procesada en menor cantidad de lo que es llevada hacia empresas fuera del departamento. Por esta razón se ha propuesto plantear estudios que generen un valor agregado a dicho residuo y el proponer nuevas alternativas de uso, se convierte en una oferta atractiva para quienes generan este material provechoso.

El uso del carbón activado ha venido aumentando con el tiempo, reemplazando a otros productos tales como el gel de sílice, alúmina activada, arcilla activada, tierra de batan, entre otros, en actividades de adsorción, debido a su menor costo comparativo, su fácil tratamiento, por ser inerte, la posibilidad de reactivación y sobre todo por su poder de adsorción. [Quintana & et al., 1977]

En Colombia los carbones activados producidos son de condiciones muy generales (poco específicas) y de baja calidad por lo que se adquiere preferiblemente en el exterior [Uribe, T. & et al., 2005]. Por consiguiente se ha propuesto estudiar las condiciones de obtención de carbón activado tomando como materia prima la cáscara de coco considerada como residuo por industrias procesadoras de coco, contribuyendo con la solución a un problema en primer lugar económico, pues se busca generar un excedente al momento de la transformación de un material en desuso y además minimizar en cierta medida el problema ecológico mediante la utilización de este subproducto, ya que se constituye en el subproducto más abundante del procesamiento del coco y representa alrededor del 10% del peso del fruto fresco [Velásquez, J. & et al., 2007].

Por esto se valora el desempeño de esta materia prima en la elaboración de carbón activado, obtenido bajo diferentes condiciones que se evalúan, en la adsorción de cromo y cuya capacidad de adsorción se determina por medio de la decoloración con azul de metileno como método indicador; y de esta forma lograr incrementar las oportunidades para nuevas investigaciones tendientes a la industrialización de este desecho.

Esta investigación, se perfila para promover la agroindustria en el departamento; pretende que la comunidad reconozca la labor del Ingeniero Agroindustrial como promotor de desarrollo en el campo agrícola y pecuario en el departamento de Nariño; además se promoverá el desarrollo agroindustrial como una fuente de ingresos masivos debido a la generación de empleos y al aprovechamiento de subproductos que genera el sector industrial, los cuales bien aprovechados en cualquier proceso generan bienestar.

Por lo anterior, se ha encontrado una posibilidad de aprovechamiento de un residuo agroindustrial proveniente del procesamiento del coco, como es el cuesco, dándole una transformación mediante la cual se obtenga una alternativa de provecho que pueda entrar al mercado proporcionando un producto de gran auge contribuyendo así a mejorar regionalmente el sector agroindustrial.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones óptimas para la obtención de carbón activado elaborado a partir de cáscara de coco (cuesco) a nivel de laboratorio.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar las condiciones que optimicen el proceso de obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco empleando un análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio.
- ✓ Caracterizar el carbón activado obtenido en el laboratorio para determinar el potencial de la producción de carbón activado a partir de cáscara de coco a través de una evaluación técnica.
- ✓ Establecer el grado de adsorción de cromo para el carbón activado producido en el laboratorio, con el propósito de evaluar su desempeño comparado con el grado de adsorción del indicador utilizado.

4. MARCO REFERENCIAL

El desarrollo de ésta investigación pretende brindar una oportunidad para generar un valor agregado a la cáscara de coco, ya que es una materia prima que por mucho tiempo ha sido considerada como desecho en el departamento de Nariño y que tiene propiedades provechosas para la producción de carbones activados, de esta forma se despliega el forjar un incremento en la actividad económica del departamento y del mismo modo aportar con la disminución del riesgo ecológico que provoca.

Hasta ahora han existido diversas aplicaciones de la cáscara de coco como materia prima, entre ellas la más conocida en el departamento de Nariño es la de su uso para realizar artesanías, pero ésta, sin estimar en alguna medida la composición de la materia prima utilizada. Este material se caracteriza por ser adecuado para la preparación de carbón activado microporoso, debido a su excelente estructura natural y a su bajo contenido de cenizas [Rouquerol, I. & et al., 1999], pero también es posible obtener diferentes tipos de carbones activados para aplicaciones diversas, variando las condiciones de preparación [Bastidas, M. & et al., 2010], por ejemplo, empleando altas temperaturas se obtiene carbón hidrofílico (afinidad con el agua) y micro poroso (con ultra microporos de diámetros < 0.7 nm); a bajas temperaturas y usando agentes químicos como el ácido fosfórico, el hidróxido de potasio y el cloruro de zinc, [Luna, D., Gonzáles, A., 2007] se puede obtener un carbón hidrofílico de poros más anchos (con mesoporos > 2 nm) y comparado con el obtenido de la madera, resulta con mayor dureza y resistencia.

Algunos carbones activados obtenidos a partir de cáscara de coco se emplearon en la adsorción de fenol en solución acuosa a diferentes concentraciones y se comparó con carbones activados obtenidos de endocarpio de palma, este alcanzó

la mayor área superficial y adsorbió la mayor cantidad de fenol. [Velásquez, J. et al., 2007]

Teniendo en cuenta la gran importancia comercial del carbón activado en el país, se han generado una serie de estudios sobre la manufactura de este material, variando aspectos como materias primas, en donde se alternan entre aserrín y carbón mineral durante las condiciones de proceso y los métodos de fabricación, exponiendo las diferencias en el material conseguido y sus características específicas que lo hacen un producto superior para un uso particular e inadecuado para otro [Troccoli, C. et al., 2008].

En el momento de determinar un proceso óptimo para obtener carbón activado se encuentran diversos métodos donde varían las características físicas de éste, para su obtención, se ha sometido la cáscara de coco a tratamientos con vapor en donde se pretende incrementar el contenido de lignina, donde se contribuyo a obtener un índice máximo de yodo en el carbón obtenido por medio de la activación química. [Cardona, E. & Peña, A., 1982]

Durante el proceso de la activación química la carbonización y la activación se llevan a cabo por medio de una descomposición térmica en un horno, impregnando la materia prima con agentes químicos y es utilizada regularmente cuando se trabaja con materiales lignocelulíticos la cual es llevada a cabo a una temperatura entre 400 y 800 °C. Los agentes activantes químicos utilizados reducen la formación del material volátil y alquitranes aumentando el rendimiento del carbono [Zapata, Z. et al., 2005].

Debido a la creciente demanda de carbones activados, en los últimos años, se han intensificado las investigaciones para el desarrollo de carbones adsorbentes a partir de precursores abundantes y renovables, los cuales se usan principalmente para remover metales pesados de ecosistemas acuáticos.

La adsorción de estos materiales (cromo y oro), empleando carbones activados resulta ser una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas contaminadas con pequeñas cantidades de dichos metales tóxicos y su aplicación ha sido especialmente recomendada a fin de alcanzar los límites de admisibilidad establecidos por los entes reguladores. Si bien el empleo de carbones activados para la remoción de compuestos orgánicos en fase líquida ha sido evidente en varios estudios, el uso de estos adsorbentes en la eliminación de iones metálicos presentes en el agua en bajas concentraciones es relativamente reciente. [Silva, J. & Rodríguez, C., 1990]

4.1 MARCO CONCEPTUAL

El carbón activado es un adsorbente muy versátil ya que el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de tecnología actual y futura [Rouquerol, I. & et al., 1999]

Los carbones activados comerciales son preparados a partir de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente, materiales orgánicos como, madera, huesos, cáscaras de semillas de frutos, como también, carbón mineral, breas, turba y coque. La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final deben ser igualmente tomados en cuenta. Los carbones activados tienen un alto costo que va desde US \$ 1200 hasta US \$14,000 la tonelada [Luna, D., et al, 2007]

4.1.1 Mercado del carbón activado:

- Mercado Mundial

El mercado mundial de carbón activado alcanzó un crecimiento de 8% anual (en volumen) durante el periodo 1999-2003. La demanda de carbón activado ha

seguido creciendo debido al crecimiento industrial y las aplicaciones en tratamientos de agua. La capacidad instalada ha pasado de 750.000 ton/año en 2002 a cerca de 840.000 ton/ año en el 2005, lo que nos da un indicio del crecimiento del mercado del carbón activado [Mejía, O., Patiño, S., 2006].

Los principales países exportadores de carbón activado a nivel mundial son Estados Unidos, Alemania, Bélgica, Reino Unido, China, España, Países Bajos y México [Archivo Seiki Proexport, 2008]

- Mercado Nacional

La necesidad de carbón activado en Colombia ha aumentado dado a la gran utilidad de éste, en los procesos de adsorción de los distintos tipos de industrias: Química, Farmacéutica, de Alimentos, Óleo química, Minera y Ambiental.

Para el año 2008 Colombia importó 1200 Ton por un valor FOB de USD 2'041.047 que corresponden a un 48% de la demanda nacional actual. Los principales países que abastecieron la demanda de carbón activado fueron: México, Estados Unidos, Alemania, Canadá y Reino Unido [Proexport, 2010].

4.1.2 Coco. El cocotero, está constituido por una parte blanda interior y un líquido, a los cuales se les realizan procesos industriales para la obtención de grasas, aceites comestibles, confites y copra; sin embargo, también está constituido por la estopa o mesocarpio, que se encuentra entre el exocarpio duro o cubierta externa, y el endocarpio o envoltura dura, que encierra la semilla; el valor de ésta radica en su contenido de fibra y carbono fijo [Quintero, S., González, L., 2011].

4.1.3. Cáscara de coco. El endocarpio o cáscara cuenta con una estructura interna a nivel molecular similar a la de una esponja, que permite la retención de partículas [Universia, 2008]. Está compuesto principalmente por lignina, celulosa y pentosano, y representa entre un 15 y 19% del peso total del fruto, ésta estructura

interna permite que el carbón activado elaborado sea de un volumen de poros óptimo y con gran área superficial permitiendo altas velocidades de flujo. [Zapata., Z. et al., 2005].

Tabla 1: Rendimiento de materias primas orgánicas en la producción de carbón activado a diferentes temperaturas*.

Materia Prima	Rendimiento de la pirolisis		
	T° 400°C	T° 600°C	T° 800°C
Corteza de aroma	36	33	28
Semillas de mamey	39	33	31
Semillas de aceituna	30	28	24
Cáscaras de caoba africana	37	33	27
Cáscaras de coco	40	35	33
Bagazo de caña de azúcar	30	22	17
Residuos agrícolas cañeros (RAC)	29	20	16

*Fuente: [Medina, 2003]

La porosidad de los carbonizados esta estrechamente relacionada con la resistencia mecánica de los carbones activados a obtener y a su vez con la porosidad de sus precursores. Para seleccionar dichos precursores, que posibilitan la preparación de carbones activados se debe tener en cuenta que dicha resistencia mecánica debe ser $P < 40$.

Tabla 2: Densidad aparente (dap), densidad real (dr), y porosidad (P) en materias primas orgánicas*.

Materia Prima	dap (g/cm ³)	dr (g/cm ³)	P (%)
Cáscaras del fruto de la caoba africana	0.382	0.612	0.37
Cáscaras del fruto de la caoba hondureña	0.371	0.750	0.50
Semillas de mamey	0.750	1.080	0.35
Cáscaras de guayaba	0.408	1.040	0.62
Cáscaras de coco	1.308	1.537	0.14
Cortezas de aroma	0.340	0.565	0.38
Tuza de maíz	0.168	0.820	0.79
Bagazo de caña de azúcar	0.090	0.700	0.86

*Fuente: [Medina, 2003]

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado. Los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas [Lozano, D. et al., 2007].

4.1.4 Carbón activado. Es un material que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1,500 metros cuadrados, por gramo de carbón. 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 ya que este es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta.

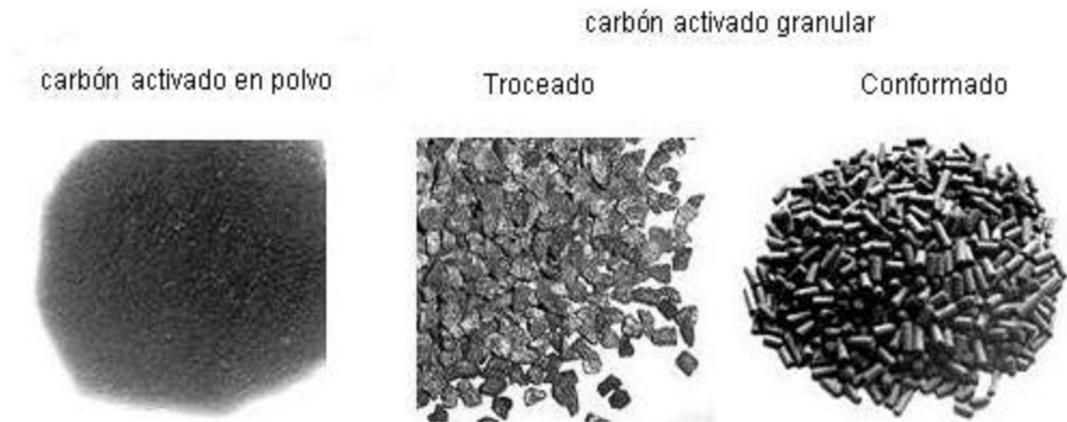
La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como " fuerzas de Van Der Waals". Por lo tanto al ser un fenómeno que

ocurre en la superficie, mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente será.

El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y tener una elevada superficie interna para así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución [manual del carbón activo, 2009].

4.1.5 Clasificación de los carbones activados. Los carbones activados pueden clasificarse como, carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG). Los CAP presentan tamaños menores de 100 μm , siendo los tamaños típicos entre 15 y 25 μm . Los CAG presentan un tamaño medio de partícula entre 1 y 5 mm y pueden dividirse en dos categorías: Carbón activado troceado (o sin forma) y carbón activado conformado (con una forma específica, cilindros, discos, etc.). Los carbones activados troceados se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de briquetas de carbón o de trozos más grandes. Los carbones conformados pueden obtenerse por peletización o por extrusión de carbón en polvo mezclado con distintos tipos de aglomerantes. Existen además otras formas de adsorbentes de carbón, como las fibras de carbón activadas, las telas y los filtros de carbón activado, las estructuras monolíticas, las membranas de carbón, etc. Ver figura 1.

Figura 1: Clasificación del carbón por tamaño de partícula.



Fuente: [Méndez, 2007]

4.2 OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE COCO

Para desarrollar el uso de la cáscara de coco se plantea el estudio de las condiciones de obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco por su beneficiosa composición. Conviene distinguir que no hay estudios que demuestran que se ha utilizado la cáscara de coco para caracterizaciones de obtención de carbón activado a nivel departamental; por ejemplo, este material se ha tratado fisicoquímicamente para la obtención de carbón activado de alta calidad, sometiéndose a procedimientos con vapor para incrementar su contenido relativo de lignina y su accesibilidad química en condiciones de activación química con ácido fosfórico [Velásquez, J. et al., 2007].

Exactamente la preparación de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos físicos o químicos, mediante la interacción con gases o la adición de químicos, respectivamente, partiendo de una materia prima con propiedades bien definidas. Las muestras se impregnan con una solución activante durante un determinado tiempo a temperatura ambiente y se secan de 90 a 100°C. Posteriormente, se realiza la carbonización de las muestras impregnadas bajo un

perfil de calentamiento. Finalmente el producto se lava con agua destilada, con el objetivo de remover el agente químico impregnado [Bastidas, M. et al., 2010].

En el medio se pueden encontrar diversas materias primas para la obtención de carbón activado, pero sus propiedades estarán muy influenciadas por la naturaleza de aquella con que es producido y por la calidad del proceso de activación. Entre muchas la cáscara de coco es la que rinde un producto final con mayor granulación y dureza, con un volumen de poros uniforme y un alto porcentaje de porosidad. Además, al ser más denso que los obtenidos por las otras materias primas mencionadas, lo hace más cotizado para la eliminación de productos químicos contaminantes del medio.

4.2.1 Activación. El objeto principal de la activación es el de agrandar el volumen y el diámetro de los poros que se originan en el proceso de carbonización y crear alguna nueva porosidad. La estructura de los poros y su tamaño es una consecuencia directa del proceso de carbonización y de la materia prima empleada. [Fernández, A. et al., 2006].

Éste consiste en la reacción del material con gases oxidantes (como CO_2 o aire), o con vapor de agua; o bien se ha expuesto a tratamientos con adición de productos químicos como el H_3PO_4 , NaOH , KOH , o ZnCl_2 durante (o después) de un proceso de carbonización, con el objeto de aumentar su porosidad. Mediante el control adecuado de los procesos de carbonización y el tipo de activación se puede obtener una gran variedad de carbones activados que posean diferentes distribuciones de tamaño de poros [Pulido, Z., 1999].

- **Activación química:** Este proceso involucra el mezclado de la materia prima original con el agente activante, formando una pasta que luego es secada y carbonizada en un horno, a una temperatura entre 400 y 800 °C, ocurriendo una deshidratación con el resultado final de la creación de una estructura porosa y una

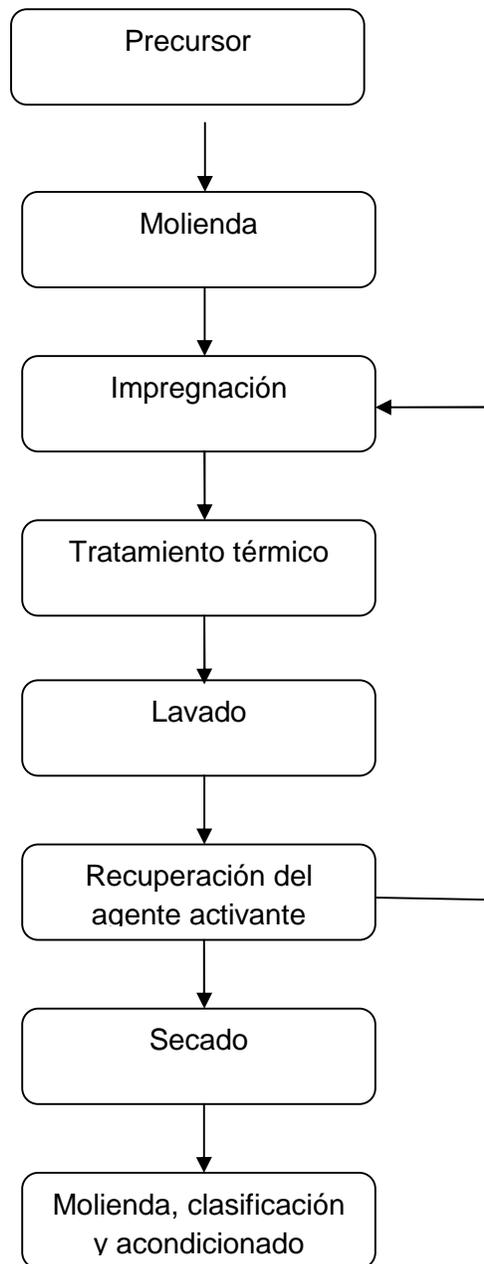
ampliación del área superficial. Los parámetros fundamentales que controlan el proceso de activación química y el producto a obtener son: la relación de impregnación, la temperatura de activación y el tiempo de residencia [Manual del carbón activo, 2009].

Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo los más utilizados industrialmente son el cloruro de zinc, el ácido fosfórico y el hidróxido de potasio. [Su, W. et al., 2003]

El KOH, NaOH y otros hidróxidos han sido usados como agentes de activación química para la fabricación de diferentes carbones, teniendo como resultados una alta e inusual área superficial. [Reinoso, F., 2005]

La activación química con estos agentes se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “*carbones superactivados*”, con superficies específicas del orden de los 3000 m²/g. A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles para la activación con KOH y NaOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc. En esta activación el agente activante se mezcla con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones KOH precursor entre 2:1 y 4:1. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas bajas, pero superiores a los 200 °C (que se utiliza solo para evaporar el agua y dispersar el KOH o NaOH) y el segundo entre 700 y 900 °C. En el caso de una mezcla física no es necesario llevar a cabo el primer tratamiento [Menéndez, A., 2007].

Figura 2: Diagrama de activación química



Fuente: [Donado Carlos; 2006]

4.2.2 Carbonización. En esta etapa el precursor es sometido a altas temperaturas (del orden de 800 grados centígrados) en ausencia de aire, con el fin de eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso. Durante la carbonización, la salida de gases y vapores de la materia prima produce una porosidad incipiente en el carbonizado, la cual se desarrollará más en la etapa de activación. [Uribe, T. et al., 2005]

La carbonización implica una descomposición térmica de material carbonoso, eliminando impurezas y produciendo una masa fija de carbón con una estructura rudimentaria de poros. Este proceso se lleva a cabo en hornos rotatorios en presencia de un gas inerte. El proceso de carbonización implica dos etapas decisivas que definen las propiedades del producto final:

- **Ablandamiento:** es la etapa durante la cual el control de la temperatura juega un papel muy importante sobre el tipo de carbón obtenido.
- **Endurecimiento:** este proceso es posterior al ablandamiento en el cual el material se endurece y contrae, cambios que a la postre influyen en el desarrollo de la porosidad del material.

En el caso del coco la etapa de ablandamiento no produce problemas especiales, a menos de que la rata de calentamiento sea muy baja, produciendo materiales demasiado duros [Quintana, G., et al 1977]

4.3 CARACTERIZACION DEL CARBÓN OBTENIDO

Se hace por medio de la evaluación de isothermas de adsorción en fase líquida que se obtienen del análisis de decoloración de azul de metileno que consiste en la decoloración que valora la existencia de poros de tamaño medio y grande,

indicando las posibilidades del carbón activado de adsorber una molécula que no puede, por su tamaño, acceder a todos los microporos

En la actualidad hay diversos métodos para la caracterización de carbones activados, algunos de estos son los métodos de azul de metileno, adsorción de yodo, la decoloración de malezas, la adsorción de fenol y adsorción de benceno.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el análisis estadístico, se ha creado un diseño factorial de experimentos, mediante la utilización del programa estadístico STATGRAPHICS Plus 5.0 (Statistical Graphics Corp 1994-2000), mediante la metodología de superficie de respuesta, en el que se consideran los diferentes factores o efectos que influyen sobre las variables de respuesta.

Los factores o variables independientes a analizar son: Temperatura de carbonización (X_1) en grados centígrados, tiempo de carbonización (X_2) en horas y concentración del agente activante NaOH (X_3) porcentaje P/P. Como variables de respuesta se obtendrá: capacidad de adsorción de cromo (Y_1).

El diseño experimental propuesto, estará formado por 15 experimentos y su respectiva réplica para un total de 30 experimentos, las variables independientes serán evaluadas a dos niveles, un nivel superior y un nivel inferior, con tres experimentos en el punto central, con los cuales se podrá determinar tanto el error experimental, la falta de ajuste, las interacciones entre los factores, la curvatura de la superficie de respuesta, los coeficientes del modelo que describan el comportamiento del sistema dentro del intervalo experimental estudiado y los valores físicos que pueden optimizar la variable de respuesta [STATGRAPHICS Plus 5.0]

Clase de diseño: Superficie de Respuesta

Nombre del Diseño: Diseño de Box-Behnken

Diseño Base

Número de factores experimentales: 3

Número de bloques: 2

Número de respuestas:	1
Número de corridas:	30, incluyendo 3 puntos centrales por bloque
Grados de libertad para el error:	19
Aleatorizar:	Sí

Tabla 3. Descripción del diseño experimental*.

FACTORES	BAJO	ALTO	UNIDADES	CONTINUO
Temperatura de carbonización	600,0	800,0	°C	Sí
Tiempo de carbonización	1	4	Horas	Sí
Concentración agente activante	5	30	% P/P	Sí

RESPUESTAS	UNIDADES
Capacidad de adsorción de cromo	Porcentaje

*Fuente: Esta investigación.

5.1.1 Análisis del diseño experimental. Para el análisis del diseño experimental propuesto, se hizo una selección de tablas y figuras para mostrar de una manera clara y de interpretación sencilla, el efecto de las variables evaluadas.

Las tablas y Figuras con información estadística seleccionadas fueron:

- Tabla ANOVA
- Diagrama de Pareto
- Diagrama de efectos principales
- Superficie de respuesta
- Diagrama de contorno de la superficie de respuesta
- Modelo matemático
- Respuesta óptima

5.2 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA

La cáscara de coco de la variedad *Cocos nucifera*, se obtuvo de plazas de mercado proveniente del municipio de Tumaco, donde el coco se comercializa en mayor cantidad; en la recepción de la materia prima se debe tener en cuenta que no haya pasado mucho tiempo desde su desecho, ya que se podrían afectar los ensayos. Inmediatamente se trasladó a Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial en la Universidad de Nariño, para adecuar y realizar el proceso de molienda (retirar la estopa e impurezas) y de esta forma preparar el material para cada uno de los cambios que sufre la materia prima [Paredes, A. & Peñuela, L., 1998].

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización se hizo a una parte de la materia prima total, después de llevar a cabo el adecuamiento de ésta por medio del cuarteo sucesivo de toda la materia prima disponible para la experimentación, 10 Kg. (ANEXO A); Con este cuarteo se buscó homogenizar perfectamente la muestra, por esto se dividió la muestra en cuatro cuadrantes, se mezclaron las partes opuestas, y éstas se dividieron nuevamente en cuatro cuadrantes. Este procedimiento se hizo sucesivamente hasta obtener una muestra de 300 gramos, suficiente para medir las propiedades y características mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de la materia prima*

PROPIEDADES DE LA MATERIA PRIMA

Contenido de Humedad

Contenido de materia volátil

Contenido de cenizas

Contenido de carbón fijo

*Fuente: Esta investigación.

Para los parámetros de humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo se realizaron mediante un análisis inmediato de carbonizado con base a las normas ASTM para materiales carbonosos.

5.3.1. Humedad (%H). Para esta medición se tomó una muestra húmeda de 5g. Dicha cáscara se secó en la mufla a 105°C por un tiempo estimado de 4 horas. Pasado este tiempo se retiró la muestra del horno, se dejó enfriar en un desecador y se pesó de nuevo. Esto se repitió hasta alcanzar un peso constante. El análisis se realizó por triplicado. ASTM D3173-87.

5.3.2. Contenido de materia volátil (% VM). En este parámetro se tomó la materia gaseosa que se desprende del carbón cuando éste es sometido a un calentamiento en condiciones determinadas. Es decir la pérdida de peso (sin contar la pérdida de humedad), durante el calentamiento del material a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno. En general, a mayor cantidad de material volátil, mayor será el humo que produce un tipo específico de material al quemarse. Según norma ASTM D3175-82.

5.3.3 Cenizas (%A). Se tomaron 2g de cáscara de coco y se pesaron en un crisol previamente pesado. La cáscara se calcinó inicialmente a 300°C por una hora y por más de dos horas a 800°C. Después de la calcinación, el crisol se enfrió y pesó. El análisis se realizó por triplicado. ASTM D3174-89

5.3.4. Carbón fijo (% FC). Se designó como carbón fijo la fracción residual de carbono, descontadas las cenizas, después de la pirolización del material en donde se desprende en el proceso la humedad y el material volátil.

Se calculó por la operación:

$$FC= 100-(H+VM+A) \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

5.4. ENSAYOS EN PLANTA PILOTO

5.4.1 Adecuación de cáscara de coco. La materia prima se libró totalmente de impurezas, raspada a mano y de esta forma se procedió a disminuir el tamaño de la materia prima en el molino de martillos ubicado en la planta piloto de la Universidad de Nariño, troceando anteriormente la cáscara de manera que sea mas fácil la molienda y poder realizar el tamizado. [Castro, J. & Montenegro, D., 2010]

Figura 3. Molino de martillos (Javar), Planta piloto de la Universidad de Nariño*.



*[Fuente: Esta Investigación]

5.4.2 Tamizado. Se tamizó el material hasta llegar a un tamaño óptimo en malla 10 el cual se consideró apropiado para obtener un carbón activado granular sin forma, contando con una cantidad fija de 150g de cáscara de coco para cada prueba.

5.4.3 Impregnación. Como actividad preliminar a la carbonización, se realizó la activación del material según la prueba a realizar. En beakers de 500ml se agregaron 150g de cáscara de coco y se impregnaron con la cantidad específica de agente activante necesario (NaOH) en una proporción de 1 a 3 respectivamente, por un tiempo de 2.5 horas agitando regularmente.

Para determinar las cantidades del agente activante en sus diferentes concentraciones fue necesario tener en cuenta la densidad de cada uno de la siguiente manera (proporción 3 partes de agente activante y 1 parte de cáscara de coco):

NaOH al % p/p

$$X \text{ g NaOH \% p/p} * \frac{1 \text{ ml NaOH \% p/p}}{\text{Densidad NaOH \% p/p}} = \text{Cantidad de NaOH para cada prueba}$$

(Ecuación 2)

5.4.4 Secado de la materia prima. Principalmente se pesó las muestras para tener en cuenta el balance de masa, se procedió a secar el material a una temperatura de 90°C +/- 5°C en la mufla de la Planta Piloto, en cápsulas de porcelana resistentes a altas temperaturas, el tiempo varió por del tamaño de la muestra.

5.4.5 Carbonización. Para completar el proceso de activación se llevó las muestras a la mufla del área de ciencias pecuarias, en donde el procedimiento se basó en calentarlas a temperaturas del orden 600 a 800°C según se disponía en el diseño experimental y variando el tiempo por la misma razón de 1 a 4 horas.

Figura 4. Mufla (Thermolab), Ciencias pecuarias, Universidad de Nariño*.



*[Fuente: Esta Investigación]

5.4.6 Lavado con HCl. El carbón obtenido se secó hasta llegar a temperatura ambiente, después del enfriamiento, se lavó con una solución de HCl comercial en una proporción de 3 a 1 con respecto al peso del material y agua destilada en abundancia hasta la completa eliminación de cenizas. Los carbones activados resultantes se secaron durante un día en la mufla de la planta piloto a una temperatura de 30°C.

La cantidad exacta del HCl, se determinó con la ecuación 2, al igual que para determinar la cantidad de NaOH, utilizando su densidad.

HCl al 33%

$$X \text{ g HCl } 33\% * \frac{1 \text{ ml HCl } 33\%}{\text{Densidad HCl } 33 \%} = \text{Cantidad de HCl para cada prueba}$$

(Ecuación 3)

5.4.7 Caracterización del carbón activado resultante. Finalmente con el carbón activado obtenido se procedió a realizar la prueba de su eficiencia, ésta se midió con una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) preparada a 2ppm, se mezclaron y agitaron constantemente por no menos de una hora y media en una placa de agitación, para esto se utilizaron 50g del carbón resultante y 150ml de la solución de dicromato de potasio.

Las soluciones que se obtuvieron después de éste tratamiento, se analizaron por medio de adsorción atómica en los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño para así conocer la cantidad de cromo que es capaz de adsorber el carbón activado resultante.

Figura 5. Placa de agitación Thomas Scientific*.



*Fuente: Esta investigación.

De igual manera se realizó la caracterización del carbón activado midiendo su capacidad de adsorción por medio de la prueba del azul de metileno, ésta consistió en tomar la muestra más significativa en cuanto a los resultados arrojados en la respuesta óptima del diseño experimental, la que más adsorción obtuvo en contacto con el cromo.

El procedimiento radicó en determinar la concentración de azul de metileno midiendo su absorbancia por medio de espectrofotometría, teniendo como base una curva de calibración en donde se relacionan el porcentaje de absorbancia (Y)

de las diferentes soluciones de azul de metileno con su concentración (X); para esto se utilizaron concentraciones de azul de metileno como 5, 10, 25, 50, 70 y 100mg/L a las cuales se les determinó la absorbancia por medio de espectrofotometría a una longitud de onda de 666nm determinada al realizar el barrido correspondiente a la solución utilizada.

Se tomó como base soluciones de 25, 15 y 5mg/L de azul de metileno y se mezclaron con 0.08g del carbón activado producido, esta mezcla se agitó por un periodo de 1 hora y después de esto se dejó reposar por 20 horas a 25°C, el tiempo necesario para que la solución quede en equilibrio; la mezcla se filtró y se determinó la absorbancia final de azul de metileno.

Con ayuda de la curva de calibración fue posible encontrar la concentración de la solución después de su interacción con el carbón activado y de esta manera poder realizar la isoterma de adsorción respectiva.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización de la cáscara que se utilizó para este estudio, presentó los siguientes resultados:

Carbón fijo: 26.36 %

Cenizas: 3.28 %

Material volátil: 62.75 %

Humedad: 7.61 %

De estos resultados resalta el gran contenido de material volátil del material (cuesco de coco variedad *Cocos nucifera*), lo cual disminuye considerablemente la cantidad del producto final.

Esta cáscara de coco también posee un bajo contenido de cenizas en comparación con materias primas como la madera o el carbón antracita, lo cual favorece al producto final ya que las cenizas son impurezas.

El porcentaje de humedad es menor que el de otras materias primas tales como madera, el cual es favorable para almacenar este material durante mayor tiempo, sin que éste se vea afectado.

6.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el análisis de los resultados obtenidos después de la lectura de absorción atómica (ANEXO D) en la elaboración de carbón activado a partir de cáscara de coco, se utilizó el programa estadístico Statgraphics 5.1 (Tabla 9).

Tabla 5. Diseño experimental para la obtención de carbón activado*.

Nº EXP	BLOQUE	Tiempo de carbonización (horas)	Temperatura de carbonización (°C)	Concentración NaOH (% P/P)	Adsorción de cromo (mg Cr+6/L)
1	1	4	600	17,5	0,193
2	1	2,5	700	17,5	0,296
3	1	1	800	17,5	0,1
4	1	4	800	17,5	0,06
5	1	1	600	17,5	0,083
6	1	1	700	30	0,188
7	1	4	700	30	0,202
8	1	2,5	600	5	0,023
9	1	4	700	5	0,103
10	1	2,5	800	30	0,197
11	1	2,5	700	17,5	0,261
12	1	2,5	700	17,5	0,27
13	1	2,5	600	30	0,216
14	1	2,5	800	5	0,139
15	1	1	700	5	0,086
16	2	4	600	17,5	0,205
17	2	2,5	700	17,5	0,278
18	2	1	800	17,5	0,095
19	2	4	800	17,5	0,072
20	2	1	600	17,5	0,104
21	2	1	700	30	0,184
22	2	4	700	30	0,21
23	2	2,5	600	5	0,045
24	2	4	700	5	0,087
25	2	2,5	800	30	0,191
26	2	2,5	700	17,5	0,275
27	2	2,5	700	17,5	0,256
28	2	2,5	600	30	0,232
29	2	2,5	800	5	0,11
30	2	1	700	5	0,1

* Fuente: esta investigación.

6.2.1 Análisis para la variable de respuesta: adsorción de cromo. El análisis de varianza para la cantidad de cromo adsorbido por los diferentes carbones, se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de varianza para la adsorción de cromo*.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:tiempo	0,002304	1	0,002304	3,41	0,0806
B:temperatura	0,00117306	1	0,00117306	1,73	0,2035
C:Concentracion NaOH	0,0537081	1	0,0537081	79,41	0,0000
AA	0,0459659	1	0,0459659	67,96	0,0000
AB	0,0093845	1	0,0093845	13,88	0,0014
AC	0,000162	1	0,000162	0,24	0,6301
BB	0,0469912	1	0,0469912	69,48	0,0000
BC	0,00726012	1	0,00726012	10,73	0,0040
CC	0,017565	1	0,017565	25,97	0,0001
Bloques	0,0000243	1	0,0000243	0,04	0,8517
Error total	0,0128502	19	0,000676324		
Total (corr.)	0,183649	29			

* Fuente: esta investigación.

R-cuadrado = 93,0029 porciento

R-cuadrado (ajustado por g.l.) =89,8542 porciento

Error estándar del est. = 0,0260062

Error absoluto medio = 0,0172183

Estadístico Durbin-Watson = 1,79863 (P=0,1999)

Auto correlación residual de Lag 1 = 0,0613452

Al analizar la tabla ANOVA (Tabla 6) se observa que los efectos de tiempo, temperatura, y las interacciones entre tiempo – concentración de NaOH no son significativos sobre la adsorción de cromo ya que su Valor-P es superior a 0,05. Estos efectos se ven con más claridad en el diagrama de Pareto, el cual se muestra más adelante (Figura 6).

Los efectos significativos sobre la adsorción del cromo son concentración de NaOH, la interacción de los cuadrados de todos los factores y la interacciones

tiempo – temperatura y temperatura – concentración de NaOH, tal como se muestra en la tabla ANOVA (Tabla 6) donde el valor de P es inferior a 0,05; esto se debe a que las condiciones empleadas en laboratorio dan paso a la obtención de diferentes tipos de carbón.

Se destaca también que el Valor-P de los bloques de 0,8517 (Tabla 6) es superior a 0,05 lo que indica que la variación entre las repeticiones de cada experimento, no tuvo un efecto significativo en el porcentaje de adsorción de cromo en las muestras, dando confiabilidad a los experimentos.

Por su parte el coeficiente R-cuadrado evidencia un buen ajuste indicando que el modelo diseñado explica el 93,00% de la variabilidad en la adsorción de cromo de las muestras, con lo que se puede deducir que el diseño cuenta con un buen ajuste permitiendo hacer análisis confiables sobre las variables implicadas en la obtención del carbón activado a partir de cáscara de coco.

El test estadístico de Durbin-Watson señala un valor de 1,79863 cercano a 2, lo que garantiza que no se presentan problemas de auto correlación, es decir “no se hizo omisión de ninguna variable importante y los errores estándar obtenidos no presentan sesgo alguno” [Moreu, 1999], garantizando una buena aleatorización de los experimentos.

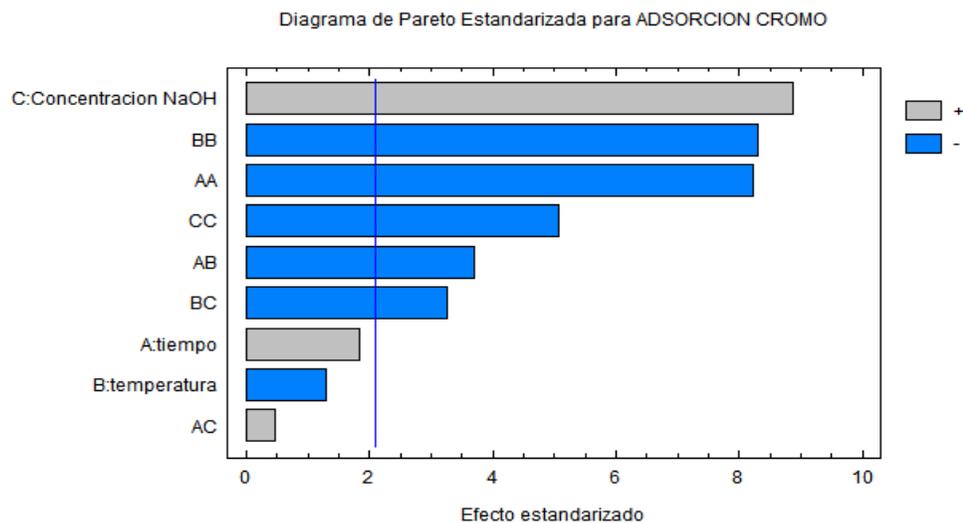
6.2.2. Análisis del diagrama de Pareto. El diagrama de Pareto (Figura 6), muestra de manera clara, el efecto significativo de la concentración de NaOH, sobre la adsorción del cromo lo que indica que los resultados más favorables para esta variable se muestran a medida que se aumenta la concentración de NaOH.

La interacción de los cuadrados de todos los factores y la interacciones tiempo – temperatura y temperatura – concentración de NaOH representan un efecto significativo demostrando que en el momento que una de las variables esté

trabajando desde su nivel superior a inferior y la variable con la que está interactuando que puede ser la misma o diferente se encuentra en el nivel opuesto pueden generar un efecto negativo, esto se demuestra en el momento que al encontrar la pendiente de la interacción, esta genera un signo negativo.

El efecto del tiempo y temperatura no influyeron significativamente en la variable de respuesta, ya que usándolas en excesos (inferiores o superiores) la adsorción de cromo no fue considerable.

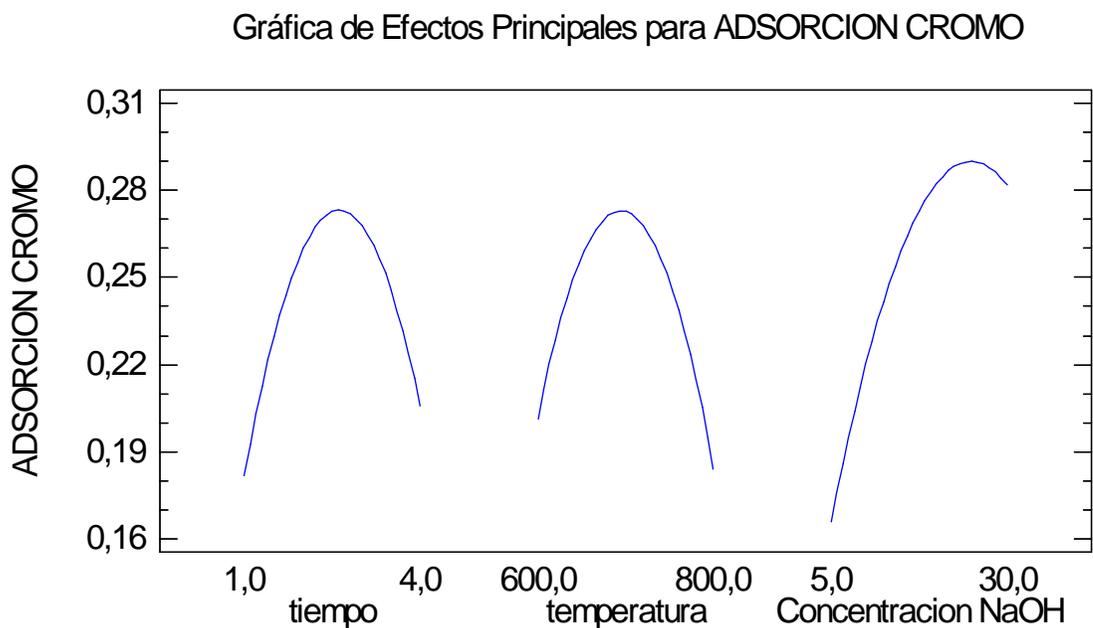
Figura 6. Diagrama de Pareto para el estudio de los factores de adsorción de cromo obtenido en las muestras



6.2.3. Análisis del diagrama de efectos principales. El diagrama de efectos principales (Figura 7), muestra un marcado efecto de la variable concentración de NaOH utilizada en el desarrollo del experimento. Se observa claramente el efecto positivo del incremento de la cantidad de NaOH sobre la variable de respuesta notándose que los incrementos en ella causan un aumento importante en la adsorción del cromo.

Por su parte el efecto de la temperatura y el tiempo de carbonización, aunque no es significativo, muestra un comportamiento particular sobre la variable de respuesta (Figura 7), así leves cambios en la relación, causa una variabilidad substancial tanto en el efecto positivo como negativo sobre el porcentaje de la adsorción de cromo obtenido. Dentro de estos dos niveles es donde se concentra más la adsorción de cromo, siendo evidente que a nivel superior e inferior su efecto será más marcado negativamente.

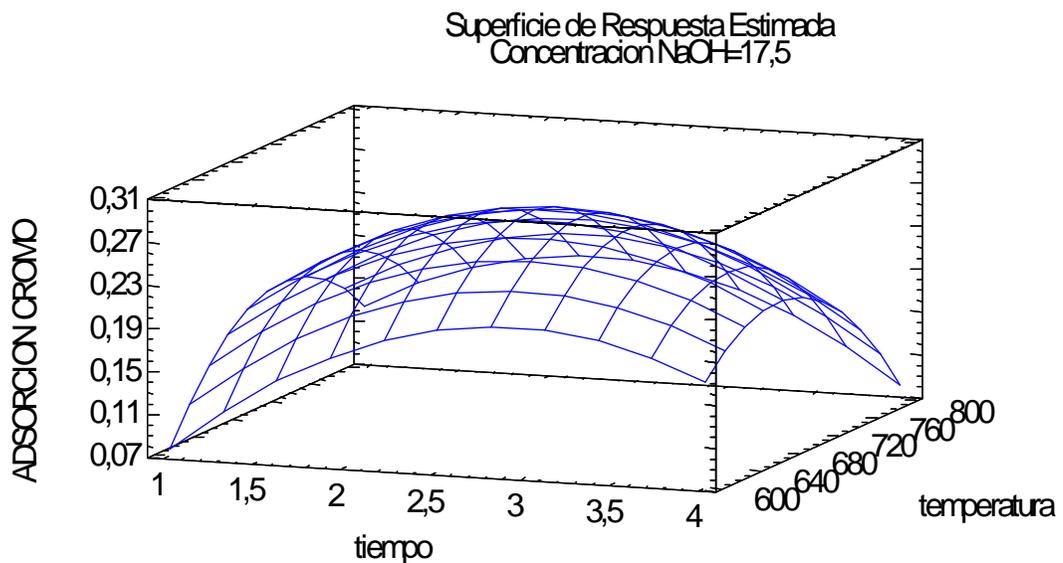
Figura 7. Diagrama de efectos principales para adsorción de cromo*



6.2.4. Análisis de la superficie de respuesta para adsorción de cromo. La superficie de respuesta que se presenta a continuación (Figura 8) muestra que la combinación óptima de las variables independientes para maximizar el rendimiento, se encuentra dentro de la region delimitada por los niveles mínimos y máximos de los factores.

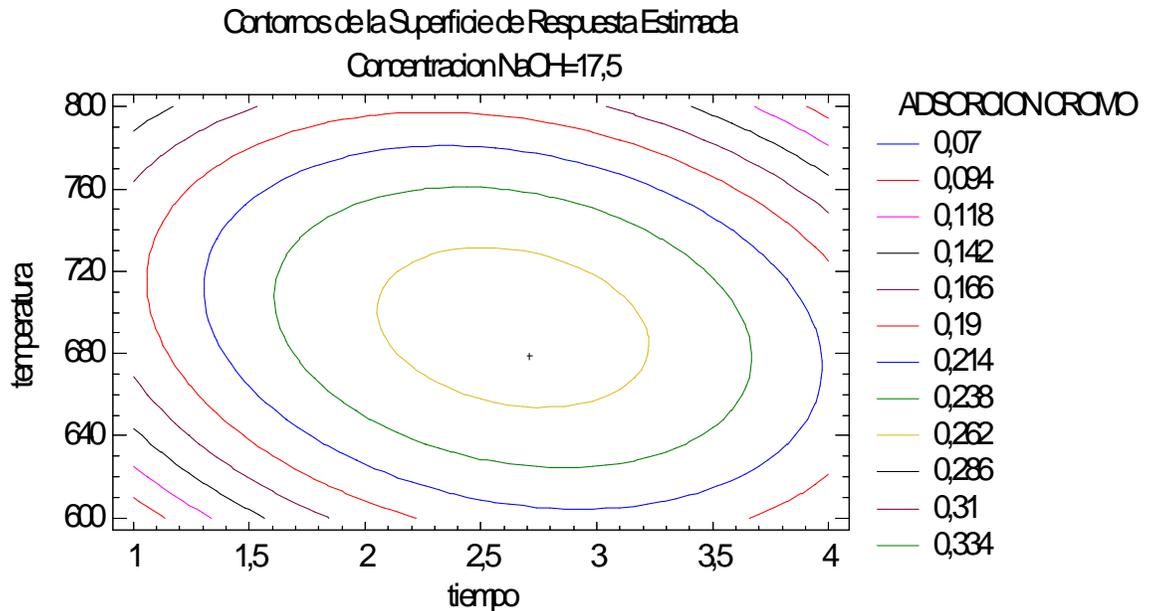
De este modo, se observa que la mayor adsorción de cromo se obtiene al trabajar en los niveles intermedio de temperatura y tiempo de carbonización de la cáscara de coco, manteniendo una concentración de NaOH de 17,5. Lo que concuerda con estudios realizados de producción de carbon activado donde los rangos de temperaturas óptimas son de 670 – 780 °C [Castro., C. et al., 2010]

Figura 8. Superficie de respuesta para la adsorción de cromo*



6.2.5. Análisis del contorno de la superficie de respuesta. La Figura del contorno de la superficie de respuesta (Figura 9) muestra que al desplazarse de izquierda a derecha (nivel mínimo hacia máximo) sobre el efecto de tiempo de carbonización y de arriba hacia abajo en el efecto de de la temperatura de carbonización, considerando una concentración de NaOH en un punto intermedio, se obtiene un mejor comportamiento de la variable de respuesta (existe mayor adsorción de cromo), donde se alcanza su punto óptimo.

Figura 9. Contorno de la superficie de respuesta estimada sobre la adsorción de cromo*



De acuerdo a las anteriores gráficas y consideraciones la respuesta óptima para la adsorción de cromo (Tabla 7), muestra de manera clara los valores óptimos para cada variable de respuesta, en el caso que se requiera un valor máximo para la cantidad de cromo absorbido.

6.2.6. Optimización de respuesta. El programa Statgraphics plus 5.0 evaluó el comportamiento del sistema dentro del intervalo experimental estudiado, arrojando los valores óptimos para maximizar la variable de respuesta.

Meta: maximizar ADSORCION CROMO

Valor óptimo = 0,293674

Tabla 7. Respuesta óptima para la adsorción de cromo*.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
tiempo	1,0	4,0	2,7106
temperatura	600,0	800,0	679,078
Concentración NaOH	5,0	30,0	25,8139

*Fuente: esta investigación.

6.2.7. Ecuación matemática para la adsorción de cromo. El modelo matemático que describe la adsorción de cromo se muestra en la ecuación 6. Esta ecuación, es el resultado de los experimentos y es la gráfica que modela el comportamiento de la variable de adsorción de cromo.

$$\text{ADSORCION CROMO} = -4,67633 + 0,338957*t + 0,0120749*T^\circ + 0,0318297*C \text{ NaOH} - 0,0350648*t^2 - 0,000228333*t*T^\circ + 0,00024*t*C \text{ NaOH} - 0,00000797708*T^\circ^2 - 0,0000241*T^\circ*C \text{ NaOH} - 0,000312133*C \text{ NaOH}^2$$

(Ecuación 4)

Donde:

t = tiempo

T° = temperatura

C = concentración

Este modelo matemático está bien ajustado como lo demuestra el análisis de varianza.

En el momento de comparar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido en este estudio con aquellos materiales utilizados en este proceso se encuentran diferentes resultados que dan a conocer que el carbón activado obtenido a partir de materiales orgánicos tiene mayores características favorables.

En el caso de la fibra de carbón activado, se ha observado que esta causa un buen desempeño sobre soluciones cromadas donde el Cr (VI) se reduce a Cr (III). Esto se comprueba evaluando la concentración de Cr (III) en solución acuosa, la

cual es la diferencia entre la concentración de cromo total [Cr (VI) + Cr (III)] y la concentración de Cr (VI) [Leyva, R. et al., 2008].

De esto se concluyo que no se obtuvieron datos de equilibrio de adsorción de Cr (VI) sobre fibra de carbón activado.

Esto indica que sus propiedades no son completamente optimas ya que a pesar de contribuir con la disminucion de peligrosidad del cromo aun deja residuos importantes.

Analizando, el agente activante NaOH y las temperaturas necesarias para la obtención del carbón activado en el presente estudio (600-800°C) es recomendable cambiar de agente activador por uno que logre disminuir las temperaturas de carbonización y así reducir perdidas de masa. Un ejemplo claro es el KOH que logra obtener resultados óptimos con temperaturas en rangos establecidos de 400 – 710°C [Castro, J. & Montenegro, D., 2010] ya que la bibliografía reporta que por encima de 700 °C usando KOH u otro hidróxido como agente activante, se obtiene un material muy reducido en peso sin amplia capacidad de adsorción para metales como el oro. [Herrera, F., Morales, A., & Pérez, J. 2004]

6.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Utilizando el método de decoloración con azul de metileno, para realizar la curva de calibración que se tiene en cuenta en el momento de encontrar la capacidad de decoloración del carbón obtenido, se utilizaron las proporciones que se relacionan en la Tabla 8.

Tabla 8. Soluciones de azul de metileno*.

Azul de metileno (mg)	Agua destilada (ml)
100	100
70	100
50	100
25	100
10	100
5	100

*Fuente: esta investigación.

Debido a que las soluciones se presentaron muy concentradas, se tomo 1ml de cada solución ya preparada y se diluyo en 100ml de agua destilada para que la lectura de su absorbancia se haga efectiva.

De estas soluciones se obtuvieron sus valores de absorbancia (Tabla 9) y de la misma forma en el programa estadístico Statgraphics plus 5.1 se obtuvo la curva de calibración deseada. (ANEXO B)

Tabla 9. Absorbancias para curva de calibración*.

Concentración (mg/L)	Concentración de dilución (mg/L)	Absorbancia
100	1	0.616
70	0.7	0.491
50	0.5	0.314
25	0.25	0.183
10	0.1	0.101
5	0.05	0.064

*Fuente: esta investigación

Los datos necesarios para determinar las concentraciones finales obtenidos por el análisis de la curva de calibración fueron:

R- Cuadrado: 99.9369

Ecuación del modelo ajustado:

$$C = -0.0583583 + 1.66769 * A \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

C: concentración (mg/L)

A: Absorbancia

Tabla 10. Concentración final después del tratamiento con carbón activado*.

Muestra	Absorbancia final	Concentración final (mg/L)
1 (25mg/L)	0.970	1.560
2 (15mg/L)	0.219	0.308
3 (5mg/L)	0.026	0.051

*Fuente: esta investigación

6.3.1. Isotermas de adsorción. Para esta prueba se tomaron 100ml de diferentes soluciones de azul de metileno con concentraciones de 25, 15 y 5mg/L y se mezclaron con una cantidad fija de 0.08g del carbón activado con valores más cercanos a la respuesta óptima arrojada por el análisis estadístico y que mayor adsorción de cromo demostró.

La adsorción de azul de metileno para un carbón activado se puntualiza así:

$$\frac{X}{M} = \frac{(C_i - C_f) * V}{g.CA} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

X: adsorción de azul de metileno (mg).

C_i: concentración inicial de la solución

C_f: concentración final o en equilibrio de la solución (mg/L)

V: volumen de la solución

g. CA: gramos de carbón activado (g)

Se determinaron los valores de la concentración final para realizar la isoterma de adsorción (Tabla 11).

Tabla 11. Datos para isoterma de adsorción*.

Muestra	x/m (Y)	Concentración final mg/L (X)
1 (25mg/L)	29.3	1.560
2 (15mg/L)	18.365	0.308
3 (5 mg/L)	6.19	0.051

*Fuente: esta investigación

$$\% \text{ decoloración muestra } X = \frac{(\text{concentración inicial} - \text{concentración final})}{\text{Concentración inicial}} * 100$$

(Ecuación 7)

$$\% \text{ decoloración muestra 1} = \frac{(25 - 1.560)}{25} * 100 = 93.76\%$$

$$\% \text{ decoloración muestra 2} = \frac{(15 - 0.308)}{15} * 100 = 97.94\%$$

$$\% \text{ decoloración muestra 3} = \frac{(5 - 0.051)}{5} * 100 = 98.98\%$$

En el ANEXO C se presenta la isoterma de adsorción para el carbón activado producido, la forma de la función generada por los valores experimentales en el rango de concentraciones estudiadas corresponde a la isoterma de Langmuir mostrando una capacidad de adsorción cercana al 100% en cada una de las concentraciones lo que corrobora la factibilidad técnica para la producción de carbón activado a partir de cáscara de coco.

7. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

7.1 BASE DEL DISEÑO

Se realizó la evaluación global de los costos más representativos de los equipos del proceso, la materia prima, los servicios industriales y el personal necesario, teniendo en cuenta las mejores condiciones obtenidas en la optimización del diseño experimental.

Se tomó una producción de 2 ton/día de carbón activado. Para lo cual se tiene en cuenta dos turnos de 8 h, durante un tiempo de operación de la fábrica de 350 días/año. Los costos se enfocaron en las operaciones unitarias principales por lotes para la producción de carbón activado.

7.2 MATERIAS PRIMAS

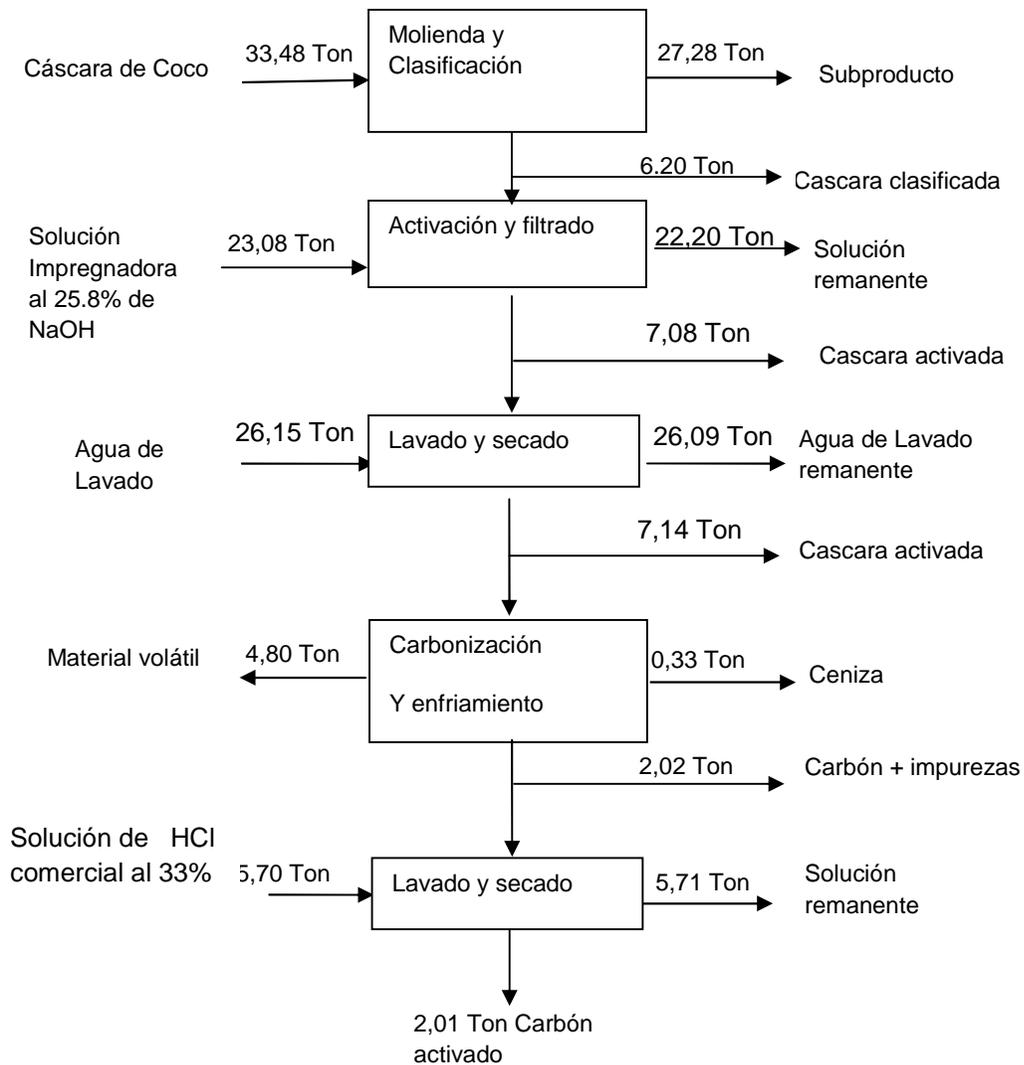
Las cantidades de materia prima para la producción de 2 toneladas de carbón activado, se listan en la tabla 12.

Tabla 12. Insumos necesarios para 2 toneladas de Carbón activado*.

Materia prima e insumo	Unidad de medida	Consumo
Cáscara de coco	Toneladas (ton)	33,48
Hidróxido de sodio(NaOH)	Kilogramos (Kg.)	230.08
Acido Clorhídrico (HCl)	Kilogramos (k.o.)	204
Agua	Metros cúbicos (m ³)	55.0
Producto	Unidad de medida	Producción
Carbón activado	Toneladas (ton)	2

*Fuente: Esta investigación.

Figura 10. Balance de Materia para 2 Ton / día



Cabe aclarar que el consumo de agua e hidróxido de sodio se reducirían considerablemente si se recircula flujo en la impregnación y lavado.

7.3 EQUIPOS NECESARIOS PARA EL PROCESO

En la tabla 13 se describen los equipos necesarios para la producción de carbón activado.

Tabla 13. Equipos para la producción de carbón activado.

Maquinaria - Equipo Industrial	Material
Reactor	Acero Inox 304
Tanque de recepción o Lavado	Acero Inox 304
Filtro prensa	Acero al Carbón
Secador rotatorio	Acero al Carbón
Horno rotatorio	Acero Inox 316L
Equipo de Tamizado	Acero al Carbón
Molino martillos	Acero al Carbón
Bandas transportadoras	Acero al Carbón
Bombas	Acero al Carbón
Tolvas	Acero al Carbón
Cosedora de sacos	Acero al Carbón

7.4 SERVICIOS INDUSTRIALES

Los servicios industriales consisten en electricidad y gas. En la tabla 14 se muestran los consumos para producir las 2,01 toneladas de carbón activado.

Tabla 14. Servicio industriales necesarios para la producción de carbón activado.

Servicio	Unidad de medida	Consumo
Electricidad	Kilowatt hora (KW/h)	100
Gas	Metros cúbicos (m ³)	27

7.5 EVALUACIÓN DE COSTOS

Los precios de los equipos se obtuvieron de la base de datos de Quimitodo Ltda. Los costos de capital para una planta deben considerar además de los equipos principales también los costos de tuberías, soportes, equipamiento eléctrico etc. Por lo que se le asignan un porcentaje aproximado del costo total de la inversión [Turton, R. et al. 2003, Tabla 5.5].

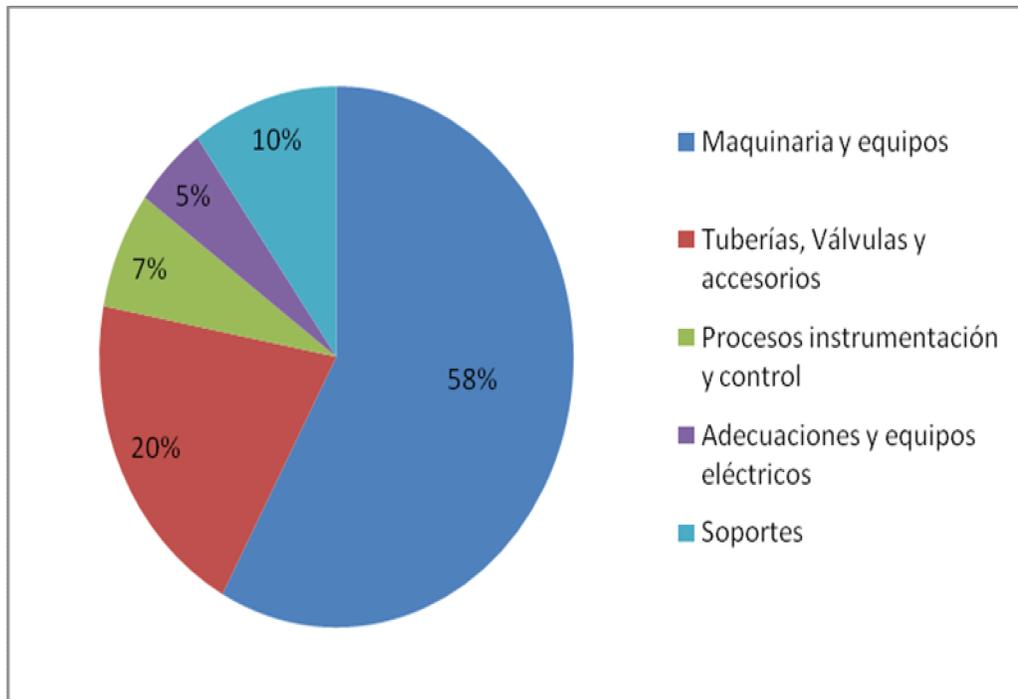
Tabla 15. Precios de los equipos Principales del proceso.

Maquinaria - Equipo Industrial	Valor unitario (pesos)	Cantidad	Valor total (pesos)
Reactor	25.000.000	2	50.000.000
Tanque de recepción o Lavado	9.000.000	4	36.000.000
Filtro prensa	8.000.000	1	8.000.000
Secador rotatorio	20.000.000	1	20.000.000
Horno rotatorio	70.000.000	1	70.000.000
Equipo de Tamizado	16.000.000	1	16.000.000
Molino martillos	7.000.000	1	7.000.000
Bandas transportadoras	20.000.000	1	20.000.000
Bombas	3.000.000	1	3.000.000
Compresor	3.000.000	1	3.000.000
Tanque de agua	1.200.000	1	1.200.000
Tolvas	10.000.000	2	20.000.000
Cosedora de sacos	800.000	1	800.000
TOTAL			255.000.000

* Fuente: esta investigación.

La mayor inversión se ve reflejada en maquinaria-equipos y en tubería-válvulas-accesorios equivalente a \$ 255.000.000 y \$ 87.931.034 respectivamente, ver figura 11.

Figura 11. Inversión de Capital



Teniendo en cuenta el costo de la instalación y puesta en marcha de la planta es \$171.465.517, se tiene que el monto total de la inversión es \$611.120.690.

7.5.1 Costos de materia prima, insumos y servicios industriales. Los valores utilizados son compilados de cotizaciones hechas directamente a productores de coco deshidratado. Hay que tener en cuenta que el cuesco de coco se vota como basura, sin embargo se le asignó un valor estimativo recomendado por la empresa Innoactiva ingeniería. Los Valores de los insumos provienen de cotizaciones hechas en químicos del sur. Ver tabla 16.

Tabla 16. Precio de las materias primas por día.

Materia prima e insumo	Unidad de medida	Costo unitario \$	Costo Total (Pesos)
Cáscara de coco	Toneladas (ton)	\$ 120.000/ ton	\$ 4.195.200
Hidróxido de sodio (NaOH)	Kilogramos (Kg.)	\$ 4.200/ ton	\$ 932.400
Acido Clorhídrico (HCL)	Kilogramos (Kg.)	\$ 1.300/ ton	\$ 265.200
Agua	Metros cúbicos (m ³)	\$ 1.200/ m ³	\$ 66.240
Total			\$ 5.459.040

* Fuente: esta investigación.

Los costos de los servicios industriales son calculados de acuerdo a los servicios prestados por las empresas, EMPOPASTO y MONTAGAS.

Tabla 17. Precio de servicios industriales por día.

Servicios industriales	Unidad de medida	Costo unitario (pesos)	Costo Total (pesos)
Electricidad	Kilowatt hora (KW/h)	1.200	240.000
Gas	Metros cúbicos (m ³)	1.500	81.000
Total			321.000

* Fuente: esta investigación.

7.5.2 Costos del personal. Para el cálculo de los costos del personal se tiene en cuenta los aportes y salarío mínimo según la legislación Colombiana, los valores se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Valor Salarial en Colombia.

Termino	Valor (pesos)
Salario Mínimo Legal	535.600

* Fuente: [estatuto trabajadores en Colombia 2011]

La mano de obra incluye un operario para cada etapa por turno y un ingeniero, además una persona para mantenimiento. En la tabla 19 se muestran la cantidad de personas que se emplearan en la planta de producción y los salarios.

Tabla 19. Costos de personal.

Producción	Personas por turno	Personas a contratar	Salario unitario	Salario + prestaciones	Salario total (\$)
Ingenieros	1	1	1.200.000	1.440.400	1.440.400
Operarios	2	4	800.000	1.040.400	4.161.600
Varios					
Seguridad	1	2	535.600	776.000	1.552.000
Aseo	-	1	535.600	776.000	776.000
Total					7.930.000

* Fuente: esta investigación.

7.5.3 Resumen de Costos. Para producir 2,01 toneladas diarias de carbón activado se necesita una inversión inicial de \$ 611.120.690 de pesos, incluida instalación, adicionalmente los costos diarios de materia prima son de \$ 5.459.040 de pesos, los costos diarios de servicios industriales diarios \$321.000 y los costos mensuales de nómina \$ 7.930.000. El costo de producción es \$ 3.022.187 pesos por tonelada de carbón activado. El precio del Carbón activado se estimó en promedio 4.500.000 pesos por tonelada teniendo en cuenta el carbón activado utilizado en la industria.

8. CONCLUSIONES

La cáscara utilizada fue la de coco variedad manila, la caracterización de esta materia prima muestra gran cantidad de material volátil (62,75%) lo cual disminuye considerablemente la cantidad de producto final. Esta cáscara también posee un porcentaje bajo de cenizas (3.28 %) que favorece al producto por no tener muchas impurezas y por tanto se disminuye la cantidad de solución de lavado con HCl.

El tiempo de carbonización y la temperatura, son variables que tienen poca influencia en la adsorción de cromo. La concentración de NaOH es la variable con mayor influencia.

El carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco presentó un porcentaje de decoloración de azul de metileno del 96.89 % promedio, demostrando la eficiencia de las condiciones óptimas estudiadas.

Estos resultados son de un impacto positivo a nivel ambiental, debido a que aportan solución a la generación de residuos, constituyendo una oportunidad para aumentar la productividad de las industrias que aprovechan el coco en forma sustentable, representando un valor agregado a los residuos.

De acuerdo con el rango de condiciones ensayadas las condiciones óptimas de operación ocurren a 679.08⁰C, 25.81% NaOH y 2.71 horas de carbonización; sin embargo hay que tener en cuenta que debido a la pérdida de masa por la temperatura, es recomendable cambiar el activador químico, con el fin de disminuir la temperatura de carbonización.

9. RECOMENDACIONES

Se debe tener en cuenta que este tipo de carbón, es solo una especialidad del carbón activado que se puede producir a partir de la cáscara de coco. Cambiando el tipo de activación se pueden producir especialidades de carbón activado para diferentes destinos como carbón activado en polvo o en fibra que se consideran óptimos para la adsorción de metales pesados como el cromo.

Se recomienda que la cáscara de coco se compre con la mínima cantidad de pelusa, ya que disminuye los consumos de energía en el proceso de molienda y de tamizado, se consume menos solución impregnadora y se presentan menos cenizas en el proceso de carbonización

Debe tenerse en cuenta que las corrientes remanentes de lavado se pueden recircular, de igual forma se pueden reutilizar el HCl y el NaOH. Por lo tanto los costos por tonelada se ven disminuidos. Para posteriores estudios se recomienda tener en cuenta esta consideración.

BIBLIOGRAFIA

BASTIDAS, M., BUELVAS, L., MÁRQUEZ, M. Y RODRÍGUEZ, K. Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar. Universidad Popular del Cesar, Centro de investigación y desarrollo tecnológico del carbón, Grupo de Energías Alternativas y Biomasa. En línea] Disponible en Internet: < http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642010000300010&script=sci_arttext>

CARDONA, E., Y PEÑA, A. Revista colombiana de química. En: obtención de carbón activado a partir de aserrín y carbón mineral. Departamento de Química, Universidad de Antioquia, Medellín. VOL. 11 No. 2. 1982

CASTRO, C. MONTENEGRO, D. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco a nivel piloto para la adsorción de oro. Cali. Universidad del valle, Ingeniería química. 2010

DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS HUMANOS de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Noviembre, 2010.

ESTATUTO TRABAJADORES EN COLOMBIA 2011, [En línea]. Disponible en internet, http://stics.intersindical.org/legis/ET%201_01_11%20STICS.pdf

FERNANDEZ. A, CASTILLO, C. MUÑIZ, R. GARCIA, I. & MARIN, MOISES. Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. Laboratorio de medio Ambiente. Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica. Boyeros, Ciudad de La Habana, Cuba. 2006

FLOREZ, J. & CASTILLO, E. Estudio de factibilidad para la producción de carbón activado a partir de la cascarilla de la palma africana (*Elaeis Guineen*) e el municipio de San Andrés de Tumaco. Tesis. Pasto. Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería agroindustrial, 2003, p. 65-67.

GRANADOS, D. & LOPEZ, G. Manejo de la palma de coco (*COCOS NUCIFERA L.*) en México. Universidad Autónoma de Chapingo, serie ciencias forestales y del ambiente número 001, 2008, p 39-48

LEYVA, R. FLORES, J. DIAZ, P. BERBER, M. Adsorción de Cromo (VI) en Solución Acuosa sobre Fibra de Carbón Activado. Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, La serena 2008.

LOZANO. D., CALO, D. CAZORLA AMORO´ S, A. LINARES-SOLANO. Carbon activation with KOH as explored by temperature Programmed techniques, and the effects of hydrogen. 2007. [En línea]. Disponible en Internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622307004095>

LUNA, D., GONZALEZ, A., GORDON, M., MARTIN, N. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. UAM–Azcapotzalco, Área Termo fluidos, Av. San Pablo 180, D.F., México.

MACHADO, Absalón. Economía de la agricultura. [En línea]. Disponible en Internet: < <http://www.scielo.org.co/pdf/rei/v2n2/v2n2a9.pdf>> Fecha de consulta enero 9 de 2008

MACHADO. R y HURTADO. Luis. Beneficios de la cáscara de coco para la fabricación de carbón activado. Tesis. Cali. Universidad del Valle, 1996

MANUAL DEL CARBÓN ACTIVO, 2009 [En línea]. Disponible en Internet: http://prueba2.aguapedia.org/master/presencial/pfm/proyecto_manual_carbon_activo/CARBoN%20ACTIVO%20DEFINITIVO.pdf

MENENDEZ. Ángel. El carbón activado. Breve historia del carbón activo. Última actualización 2007. Disponible en <http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>

MEDINA ÁLVAREZ, B. F.; VILLEGAS AGUILAR, P.J.; DE LAS POSAS DEL RIO, C.E., 2003.

MEJIA. O, PATIÑO. S, ALVAREZ. M., ABREU. L, Aprovechamiento de los residuos de la industria palmera mediante la obtención de carbón activado a escala de laboratorio., Escuela de ingeniería química, Universidad Nacional de Santander, 2007.

Archivo Seiki Proexport, 2008.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE CULTIVOS, El Cocotero y su cultivo. [En línea] Disponible en Internet: <http://www.calameo.com/books/000068238df5b9f720f68>

MOREU, P. Estadística informatizada Madrid: Editorial Paraninfo. 1999. Pág.117 - 123

OFIAGRO – SNV. Proyecto para el mejoramiento de la competitividad en la cadena del café en la Comunidad Andina. Marzo de 2005. Vol.: 2. Pág.: 7-8.

PAREDES. A. & PEÑUELA. L. Desorción de oro a partir de carbón activado cargado. Universidad Del Valle. Facultad de ingeniería. Tesis de grado, 1998, p. 21.

PEREZ, J. Factibilidad de producción de carbón activado por proceso auto térmico con carbones colombianos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, COLCIENCIAS., 2003.

PULIDO; ZALAZAR. Estadística aplicada. Editorial McGraw Hill. 2004. Pág. 101

QUINTANA, G. VELÁSQUEZ, J. CUARTAS, P. RAMÍREZ, I. VÉLEZ J. Y GARCÉS, B. Memorias y Trabajos, X Congreso de ingeniería química, Universidad Pontificia Bolivariana, Cartagena, 1977, p. 97.

QUINTERO. S, GONZALEZ. L, Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. [En línea]. Disponible en Internet: <http://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/10584/535/1/uso_de_la_fibra_de_coco.pdf>, 2011.

REINOSO. F. “Carbón activado: estructura, preparación y aplicaciones”, Revista Unidades, Colombia, 2005, p.66–69.Ibíd. 5.

REYES, E. CERINO, F. SUÁREZ, M. Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. Ingeniería química. Facultad de ciencias químicas, UANL. Abril – Junio 2006, Vol. IX.

ROUQUEROL. F, ROUQUEROL. I, SING. K. Adsorption by powders and porous solids, Academic press, London, 1999, p. 404.

SILVA, J., RODRÍGUEZ, C. Carbón activado. Estudio de las condiciones apropiadas para su obtención a partir de cáscara de coco. Tesis. Cali. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. 1990.

SU, Wei; ZHOU, Li y ZHOU, Yaping. Preparation of Microporous Activated Carbon from Coconut Shells without Activating Agents. Carbón 41. 2003. CO1-863.

TROCCOLI, C. M., RAMOS, M. E., BONELLI, P. R., CUKIERMAN, A. L., programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas Energía (PINMATE), Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. 2008.

UNIVERSIA. Evalúan producir carbón activo a partir de cáscara de coco. [En línea]. Disponible en Internet: <http://noticias.universia.com.ar/ciencia-ntt/noticia/2008/01/23/364804/evaluan-producir-carbon-activo-cascaras-coco.pdf>. 2008.

URIBE, T. M., ROJAS, N., MORENO J.C. Lodos industriales: basura utilizable, Universidad de los andes, 2005, v.1, p.103 - 112

VELÁSQUEZ J. †, MEJÍA T., CARRASQUILLA G., LÓPEZ S., GARCÉS B. Obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco pre tratada con vapor. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Química. Grupo de Investigación Pulpa y Papel. Medellín, Colombia. Abril 2007.

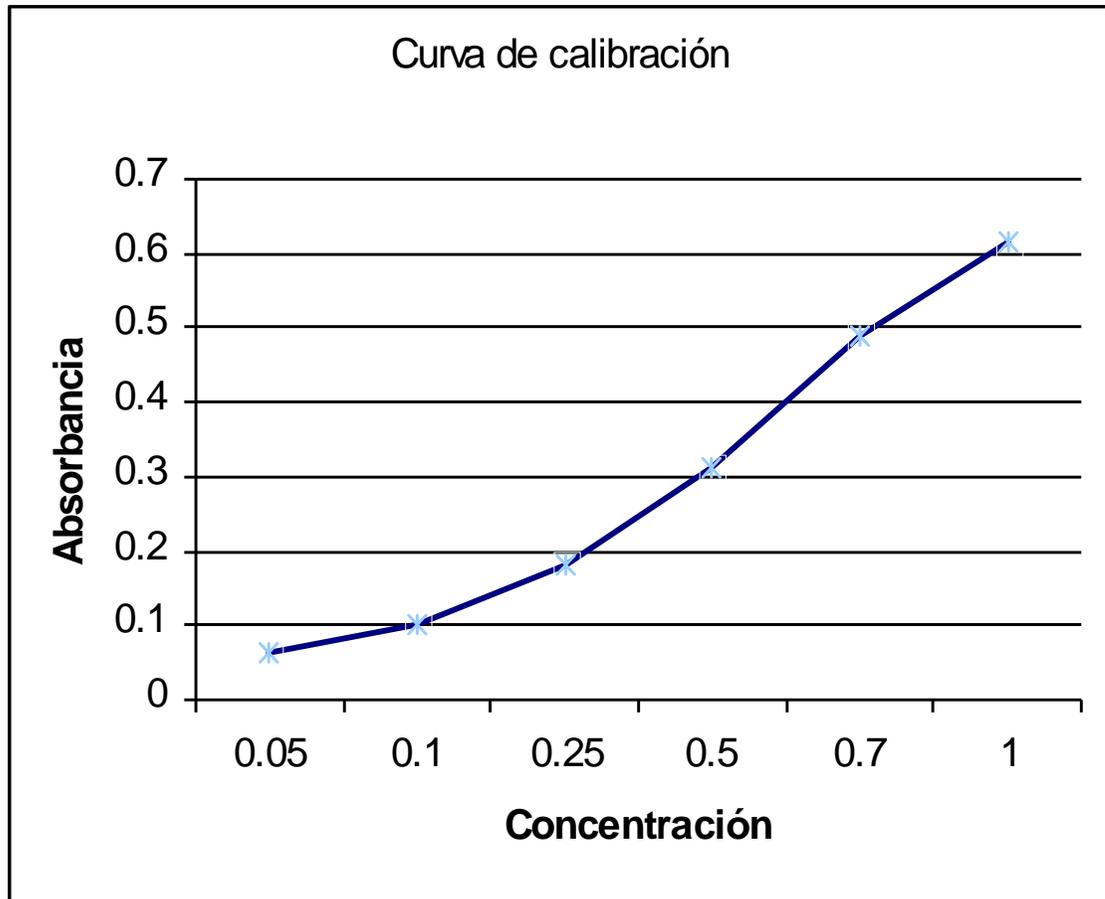
ZAPATA, Z., ROJAS, D., ARENAS, E., CHEJNE, F., LONDOÑO, C. & PEREZ, J.D. Producción de carbón activado a partir de carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. En: revista de la facultad de minas, Universidad nacional de Colombia, Medellín. ISSN 0012-7353.

ANEXOS

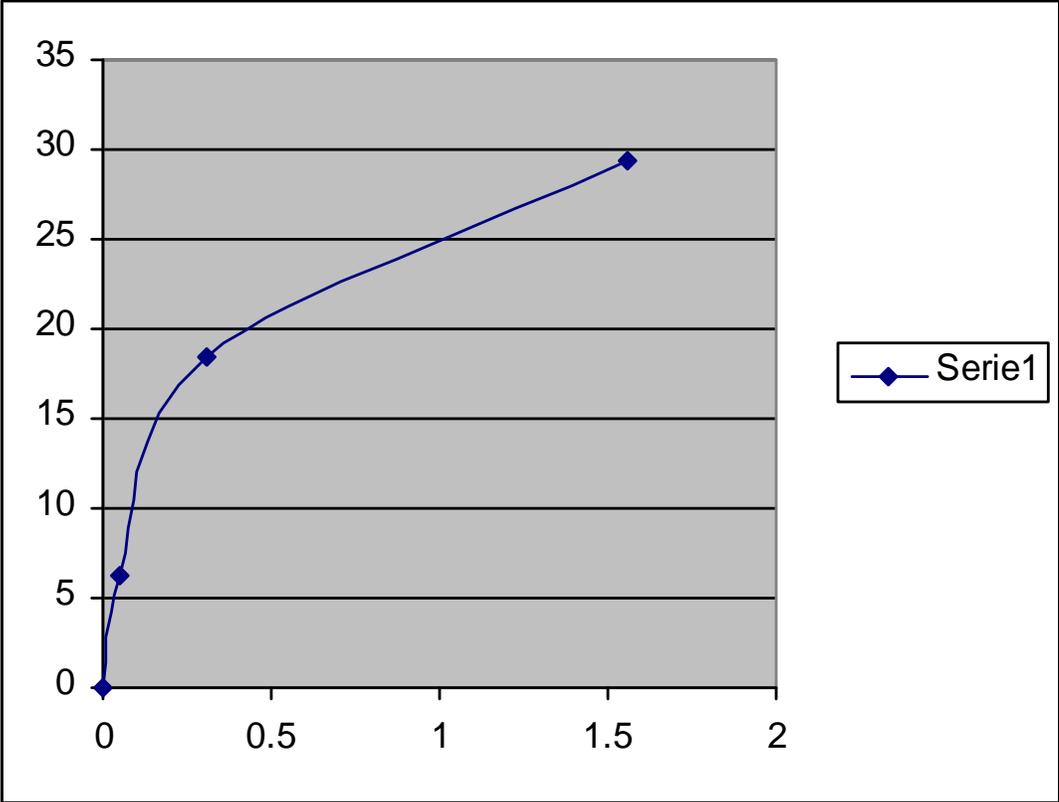
ANEXO A. CÁSCARA DE COCO



ANEXO B. CURVA DE CALIBRACIÓN



ANEXO C. ISOTERMA DE ADSORCIÓN



ANEXO D. RESULTADOS ABSORCIÓN ATÓMICA