

# PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CARBÓN SUBBITUMINOSO EN REACTORES DE LECHO FLUIDIZADO POR PROCESO AUTOTÉRMICO

## ACTIVATED CARBON PRODUCTION FROM SUBBITUMINOUS COAL IN FLUIDIZED BED REACTORS BY AUTOTHERMAL PROCESS

ZULAMITA ZAPATA BENABITHE

*Ingeniero Químico. Investigador. Instituto de Energía y Termodinámica, Universidad Pontificia Bolivariana.  
zulazb@upb.edu.co*

DIEGO A. ROJAS RODRÍGUEZ

*M.Sc. Ingeniero Mecánico. Docente - Investigador., Instituto de Energía y Termodinámica, Universidad Pontificia Bolivariana. diegorojasr@upb.edu.co*

ERIKA ARENAS CASTIBLANCO

*M.Sc. Ingeniero Químico. Estudiante doctorado. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.  
earenas@unalmed.edu.co*

FARID CHEJNE JANNA

*Ph.D. Físico, Ingeniero Mecánico. Profesor, Investigador. Grupo de Estudios en Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. fchejne@unalmed.edu.co*

CARLOS LONDOÑO GIRALDO

*M.Sc. Ingeniero Químico. Profesor, Investigador. Grupo de Estudios en Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. clondono@unalmed.edu.co*

JUAN D. PÉREZ SCHILE

*M.Sc. Ingeniero Minas y Metalurgia Profesor, Investigador. Grupo de Estudios en Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. jdperez@unalmed.edu.co*

Recibido para revisión 20 de Octubre de 2004, aceptado 14 de Enero de 2005, versión final 21 de Junio de 2005

**RESUMEN:** El presente trabajo se basa en el estudio de la producción de carbón activado a partir de carbón mineral subbituminoso en un reactor de lecho fluidizado por proceso autotérmico. El carbón utilizado provino de la región de Amagá (Antioquia - Colombia) y fue activado en dos reactores de lecho fluidizado de diferente diámetro interno, 10 cm y 22 cm. Los valores del área superficial específica y el volumen de poro de las muestras activadas fueron determinados a partir de las isothermas de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Los resultados experimentales mostraron que los valores de áreas superficiales BET y DR y del Índice de Yodo se encontraron alrededor de 460 m<sup>2</sup>/g (S<sub>BET</sub>), 490 m<sup>2</sup>/g (S<sub>DR</sub>) y 460 mg I<sub>2</sub>/g carbón.

**PALABRAS CLAVE:** Carbón activado, Activación, Área superficial, Lecho Fluidizado, Carbón.

**ABSTRACT:** This work is based on the activated carbon production from coal by physical activation in a fluidized bed reactor by an autothermal process (without an external energy source). Coal from Amagá region (Antioquia - Colombia) was activated in two fluidized reactors, 10 and 22 cm of diameter. The specific surface area and pore volumes values were determined by gas adsorption of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. Experimental results revealed that the BET and DR surface areas and Iodine Number values oscillated near to 460 m<sup>2</sup>/g (S<sub>BET</sub>), 490 m<sup>2</sup>/g (S<sub>DR</sub>) and 460 mg I<sub>2</sub>/g carbon.

**KEY WORDS:** Activated carbon, Activation, Surface area, Fluidized Bed, Carbon.

## 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de carbón activado en los últimos años en Colombia ha sido del orden de 900 – 1300 ton/año, de la cual la mayor parte en Colombia es abastecida por importaciones (5). El carbón activado es usado para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la remoción de sustancias orgánicas, recuperación de solventes y como catalizador. Su preparación puede ser por activación física y/o química (10), usando como materia prima carbón, madera, cáscara de coco, entre otros.

Durante el proceso de activación química, la carbonización y la activación es llevada a cabo por medio de una descomposición térmica en un horno impregnando la materia prima con agentes químicos (ácido fosfórico, cloruro de zinc o ácido sulfúrico). La activación química es utilizada regularmente cuando se trabaja con materiales lignocelulíticos y es llevada a cabo a una temperatura entre 500 y 700 °C. Los agentes activantes químicos utilizados reducen la formación de material volátil y alquitranes, aumentando el rendimiento del carbono. El carbón resultante se lava profundamente para eliminar los restos del agente. Una gran desventaja de este proceso de activación es el peligro que representa para el medioambiente las sustancias usadas para su preparación [16].

La activación física se divide en dos etapas, la carbonización del precursor y la activación o gasificación controlada del carbonizado el cual se realiza a temperaturas entre 700 y 1100 °C. En la carbonización se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor, para formar un esqueleto carbonoso con una estructura rudimentaria. Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmósfera oxidante (vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno, aire o una combinación de estos) que elimina los átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica. La activación física a su vez genera menor impacto ambiental que el proceso de activación química [16].

Debido a que la producción de carbón activado involucra una reacción no catalítica

entre sólido – gas, es esencial tener un reactor que permita un buen contacto entre las dos fases y un buen proceso de transporte. Los reactores de lecho fluidizado son conocidos como una tecnología que permite un excelente contacto entre sólido y gas, con altas tasas de calentamiento y transferencia de masa y permiten un mejor control sobre la temperatura de proceso, pero aun teniendo en cuenta los beneficios proporcionados no han sido ampliamente reconocidos en el sector industrial para la producción de carbón activado. Una de las principales ventajas de esta tecnología es la diversidad de combustibles que se pueden utilizar y su fácil manipulación, pero también tiene como desventaja las altas tasas de atricción, alto consumo de vapor y tiempos de residencia del sólido indeseable [11].

Conociendo el funcionamiento básico de un reactor de lecho fluidizado se procedió a recopilar en la literatura las metodologías y los resultados obtenidos en investigaciones que relacionadas estrechamente con el objetivo de este trabajo.

Martín-Gullón et al [1], estudiaron la producción de carbón activado a partir de carbón bituminoso con alto contenido en volátiles en un reactor de lecho fluidizado continuo multietapas. En las experimentaciones encontraron que la temperatura de activación alcanzada fue entre 800 – 850 °C y la velocidad del vapor fue de 1.5 – 3 veces la velocidad mínima de fluidización, y analizaron el efecto de estos parámetros sobre la reactividad y las características adsorptivas del carbón activado. En este trabajo se utilizó un reactor de lecho fluidizado de tres etapas idénticas en las cuales se da el contacto entre los sólidos y el agente activante. Para el control del calentamiento se utilizaron cuatro hornos eléctricos de 10 kW. Los carbones activados fueron caracterizados por medio de las isothermas de adsorción de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, los volúmenes de microporos obtenidos a partir de la isoterma de adsorción de N<sub>2</sub> encontraron en un rango de 0.1 y 0.4 cm<sup>3</sup>/g y el volumen de microporos obtenidos por medio de la isoterma de CO<sub>2</sub> se encontraron en el rango de 0.25 y 0.4 cm<sup>3</sup>/g y los valores de áreas

superficiales se encontraron alrededor de  $1700 \text{ m}^2/\text{g}$  daf. Ellos encontraron que al aumentar el grado de conversión el volumen de poros aumentaba y que los carbones activados eran de buena calidad

Satya et al [2], produjeron carbón activado a partir de cáscara de coco en un reactor de lecho fluidizado de 10 cm de diámetro y de 125 cm de altura. Este reactor está inmerso en otro calentado eléctricamente, obteniendo una temperatura máxima de  $870 \text{ }^\circ\text{C}$ . En este trabajo se estudió la influencia del tiempo de reacción, velocidad de fluidización, tamaño de partícula, altura del lecho estática, temperatura de activación, medio fluidizante y materia prima sobre el desarrollo del área superficial y la estructura porosa durante el proceso de activación. Los experimentos fueron llevados a cabo con diferentes tamaños de partículas utilizando como agentes reactantes vapor, dióxido de carbono y una mezcla de estos a diferentes velocidades y temperaturas. Se concluyó que al incrementar la velocidad de fluidización aumenta el número de yodo, el máximo valor de número de yodo fue de  $1328 \text{ mg I}_2/\text{g}$  carbón, obtenido a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  y un tiempo de reacción de 1.5 h, lo que corresponde a un área superficial BET de  $4300 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Linares-Solano et al [3], estudiaron el desarrollo de la porosidad en un reactor de lecho fluidizado a partir de carbón bituminoso. El diámetro interno del reactor es de 3 cm y posee un horno eléctrico interno para proporcionar la temperatura requerida. Estos carbones fueron carbonizados a una temperatura de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  y activados a la misma temperatura a diferentes tiempos de activación utilizando como agente activante vapor y  $\text{CO}_2$  y de esta forma analizar el efecto del contenido de ceniza sobre el desarrollo de la porosidad de los carbones resultantes. Los valores de áreas superficiales encontrados oscilaron en el rango de  $800$  y  $1600 \text{ m}^2/\text{g}$  y el volumen de los poros desarrollados es del orden de  $0.3 - 0.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

García-García et al [4], obtuvieron carbón activado a partir de biomasa en un gasificador

de lecho fluidizado a escala piloto. Realizaron cuatro ensayos a diferentes condiciones de suministro de combustible, diferentes relaciones de vapor – aire y temperaturas de reacción entre  $800$  y  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los rangos entre los cuales se encontraron los valores de áreas superficiales y el radio de poro promedio de los carbones activados producidos fueron de  $115 - 603 \text{ m}^2/\text{g}$  y  $1.125 - 1.375 \text{ nm}$ , respectivamente.

El Instituto de Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana y el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, desde el 2001 han estudiando la producción del carbón activado a partir de carbones colombianos y su aplicación. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los resultados de la activación de carbón mineral por proceso autotérmico, sin utilizar una fuente de energía diferente al propio carbón [5]. La materia prima utilizada fue un carbón mineral subbituminoso A y como agente activante vapor de agua; de esta manera teniendo una relación de aire/carbón similar para cada una de las muestras, de los dos reactores, se estudió el efecto de la relación vapor/carbón, velocidad del aire y grado de conversión sobre el área superficial y el desarrollo poroso de los carbones activados obtenidos.

## 2. SECCIÓN EXPERIMENTAL

### 2.1 MATERIA PRIMA

En estudios anteriores [6, 7] se logró identificar los carbones más promisorios de Colombia para la producción de carbón activado teniendo en cuenta su composición y ubicación geográfica. A partir de estos proyectos se concluyó que el carbón proveniente de la mina Nechí (Antioquia), era uno de los carbones más adecuados para el objetivo de este estudio debido a sus características reactivas. En la Tabla 1 se presentan los análisis próximo, elemental y petrográfico para el carbón mineral utilizado.

**Tabla 1.** Características del carbón Nechí  
**Table 1.** Characteristics of Nechí coal

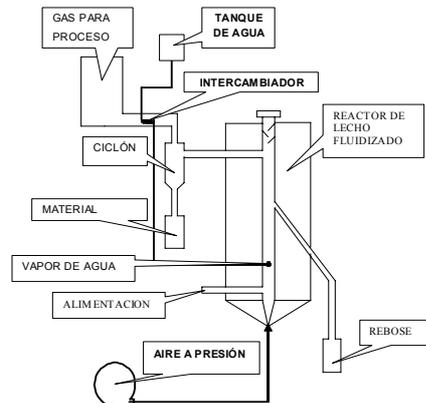
ANÁLISIS ELEMENTAL	
Contenido de Carbono (%)	64,37
Contenido de Oxígeno (%)	15,67
Contenido de Hidrógeno (%)	5,54
Contenido de Nitrógeno (%)	1,08
Contenido de Azufre (%)	0,4
ANÁLISIS PRÓXIMO	
Carbono Fijo (%)	46,3
Material Volátil (%)	39,94
Humedad Total (%)	10,45
Humedad Residual (%)	8,58
Cenizas (%)	5,18
Azufre Total (%)	0,47
ANÁLISIS PETROGRÁFICO	
Vitrinita (%)	72,8
Liptinita (%)	4,4
Inertinita (%)	19,2
Material Mineral (%)	3,6
Índice de Hinchamiento	0
Clasificación ASTM	SUBBA

## 2.2 EQUIPO

El proceso de activación fue llevado a cabo en dos reactores, uno de 10 cm de diámetro y 183 cm de altura (Reactor A) y el otro de 22 cm de diámetro y 200 cm de altura (Reactor B). En la Figura 1 se presenta un esquema general de las partes más relevantes del reactor de lecho fluidizado de 10 cm. El reactor de 22 cm posee características similares de construcción aunque posee un ciclón adicional.

Los dos reactores están compuestos por un cilindro vertical de cemento refractario, dividido en tres módulos, su exterior está recubierto con un aislante térmico y una lámina de acero. Los reactores poseen un sistema de precalentamiento necesario para el arranque del proceso, para esto se cuenta con un quemador de gas propano y aire comprimido. El quemador fue diseñado con el propósito de suministrar gases de combustión que permiten el precalentamiento del reactor y proporcionar temperaturas óptimas a las cuales el carbón comienza el proceso de desvolatilización.

Una vez alcanzadas la temperatura en estado estable y las condiciones fluidodinámicas esperadas, con alimentación continua de carbón, se realiza un balance de los flujos de carbón, agua, aire, rebose y ciclón durante un tiempo determinado.



**Figura 1.** Esquema general del reactor de lecho fluidizado de 10 cm de diámetro.

**Figure 1.** General scheme fluidized bed reactor of 10 cm diameter.

Este tipo de reactor se diferencia de los utilizados regularmente por su capacidad autotérmica, debido a que se genera una combustión parcial del carbón alimentado y utiliza una cantidad de aire inferior a la estequiométrica (defecto de aire) para evitar la combustión total del carbón. De esta forma, se calienta el reactor para alcanzar una temperatura de reacción adecuada y evitar la implementación de fuentes térmicas adicionales que favorezcan al calentamiento y sostenimiento de la temperatura de proceso del equipo.

### 2.2.1 Experiencias de Activación

Se realizaron quince experimentos en cada uno de los reactores variando la relación de vapor/carbón y aire/carbón. De esta forma, de los treinta balances realizados en las diferentes experimentaciones [5] se seleccionaron solo ocho muestras representativas, las cuales corresponden a los carbones activados obtenidos por rebose que poseen un flujo de carbón alimentado igual (2,8 kg/h reactor A y 10 kg/h reactor B), relación aire/carbón similar (~3 kg/kg reactor A y ~2.3 kg/kg reactor B), temperatura de

reacción mayor a 800 °C y con los valores de Índice de Yodo aceptables (mayores a 400 mg I<sub>2</sub>/g carbón). En la Tabla 2 se encuentra

un resumen de las condiciones de operación para las ocho experiencias escogidas.

**Tabla 2.** Condiciones de operación para los reactores A y B.  
**Table 2.** Operation conditions of reactors A and B.

Reactor Experiencia	Reactor A				Reactor B			
	3-1A	3-2A	3-3A	3-4A	5-1B	5-2B	7-1B	7-2B
Temperatura de reacción (°C)	806	831	822	834	810	803	827	839
Flujo de carbón (kg/h)	2,8	2,8	2,8	2,8	10	11	10	10
Flujo de vapor (kg/h)	0,2	0,3	0,4	0,5	2,6	2,6	1,5	2
Flujo de aire (kg/h)	7,2	8,5	8,5	9,1	23,3	23,3	25,2	25,2
Relación vapor/carbón (kg/kg)	0,07	0,11	0,14	0,18	0,26	0,24	0,15	0,20
Relación aire/carbón (kg/kg)	2,6	3,0	3,0	3,2	2,3	2,1	2,5	2,5
Caída de presión (cm H <sub>2</sub> O)	12,4	12,9	15,2	15,2	10	12	10	8

### 2.2.2 Caracterización de los carbones activados

Los carbones activados obtenidos por el rebose en los dos reactores fueron caracterizados determinando el Índice de Yodo y las áreas superficiales BET y DR. El equipo utilizado para la construcción de las isothermas de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> fue el Nova 3200 (Quantachrome). El área BET (S<sub>BET</sub>) reporta el área total aportada por los macro y mesoporos a partir de los datos obtenidos de la rama de adsorción de la isoterma de N<sub>2</sub> a 77 K [8]; el área DR (S<sub>DR</sub>) reporta el área microporosa a partir de los datos obtenidos de la rama de desorción de la isoterma de CO<sub>2</sub> a 273 K.

El contenido de cenizas puede proporcionar un medio para la transferencia de calor por radiación cuando es consumido el carbono, promueve los efectos catalíticos, aumenta la reactividad del carbonizado y forma una barrera al paso del fluido reactante, entre otros. Por tal motivo, el porcentaje de cenizas se considera como otro parámetro importante y es determinado por medio de un análisis próximo tanto en la muestra obtenida por rebose como por ciclón [10].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para propósitos de comparación del comportamiento de los reactores, además de las características del área superficial de los carbones activados, se utilizan el porcentaje

de rendimiento (R) y el porcentaje de conversión (X) calculados de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2), respectivamente [5].

$$R = \frac{F_{salida}}{F_{entrada}} \times 100\% \quad (1)$$

$$X = \frac{F_{entrada} \times CF - \sum_{i=1}^2 F_{salida} (1 - Cz_i)}{F_{entrada} \times CF} \times 100\% \quad (2)$$

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los porcentajes de cenizas (CZ), rendimiento (R), conversión (X) y en la Tabla 4 los valores de las áreas superficiales BET y DR, volumen de poros y microporos e Índice de Yodo para cada una de las experiencias.

**Tabla 3.** Porcentaje de rendimiento y conversión  
**Table 3.** Conversion, yield and ash percentages

Experiencia	CZ (%)	R (%)	X (%)
3-1A	7,70	13,2	54,30
3-2A	8,70	7,5	66,27
3-3A	8,90	10,4	63,77
3-4A	10,30	7,9	69,13
5-1B	8,95	2,1	81,10
5-2B	8,00	8,2	70,90
7-1B	8,96	5,7	72,05
7-2B	9,87	2,1	82,85

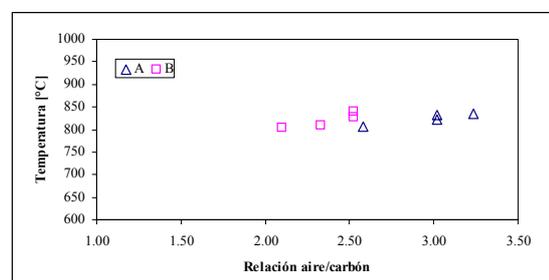
**Tabla 4.** Valores de áreas superficiales BET y DR, volúmenes de poro y microporo e Índice de Yodo.  
**Table 4.** BET and DR surface areas, pore and micropore volumes and Iodine Index values.

Experiencia	S <sub>BET</sub> m <sup>2</sup> /g	S <sub>DR</sub> m <sup>2</sup> /g	V <sub>BET</sub> cc/g	V <sub>DR</sub> cc/g	D <sub>BET</sub> nm	D <sub>DR</sub> nm	IY mg I <sub>2</sub> /g carbón
3-1A	369,0	513,6	0,185	0,171	2,57	1,134	331
3-2A	458,2	489,5	0,231	0,163	2,59	1,118	418
3-3A	531,6	487,8	0,268	0,163	2,58	1,129	454
3-4A	506,8	530,9	0,255	0,177	2,58	1,135	481
5-1B	446,9	472,7	0,226	0,158	2,58	1,120	489
5-2B	395,4	472,7	0,200	0,158	2,58	0,130	424
7-1B	428,7	458,7	0,215	0,153	2,59	1,130	482
7-2B	507,0	453,8	0,254	0,151	2,56	1,157	594

### 3.1 EFECTO DE LOS AGENTES REACTANTES

En el proceso de activación se emplearon dos agentes reactantes aire y vapor de agua, el primero de ellos actúa como principal medio de fluidización y ayuda a la combustión parcial de las partículas sólidas, mientras que el vapor contribuye al aumento de la porosidad del carbón al estar en contacto con éste.

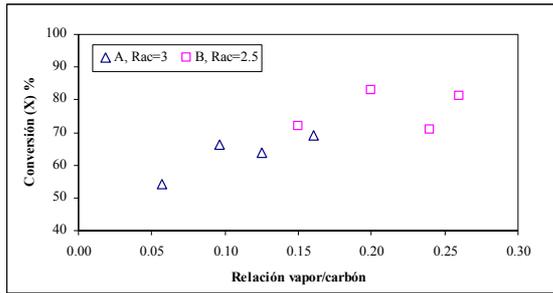
En la Figura 2, se presenta el efecto de  $R_{ac}$  sobre la temperatura para cada una de las experiencias realizadas. Las temperaturas alcanzadas oscilan entre 800 °C y 840 °C y se puede observar que a medida que se incrementa la  $R_{ac}$  la temperatura de reacción se aumenta levemente en ambos reactores y esto se debe a la combustión parcial del carbón efectuada por la interacción con el oxígeno [15]. El reactor de 10 cm (reactor A) necesita una mayor  $R_{ac}$  que el reactor de 22 cm (reactor B) para poder alcanzar el mismo rango de temperatura y esto se debe a que el porcentaje de pérdidas hacia el medio ambiente es mayor en el reactor A que en el reactor B. Los valores de temperaturas obtenidos para ambos reactores están considerados dentro del rango de temperatura óptima para la producción de carbón activado físicamente.



**Figura 2.** Efecto de la Relación aire/carbón sobre la temperatura del sistema.

**Figure 2.** Effect of air/carbon ratio on system temperature

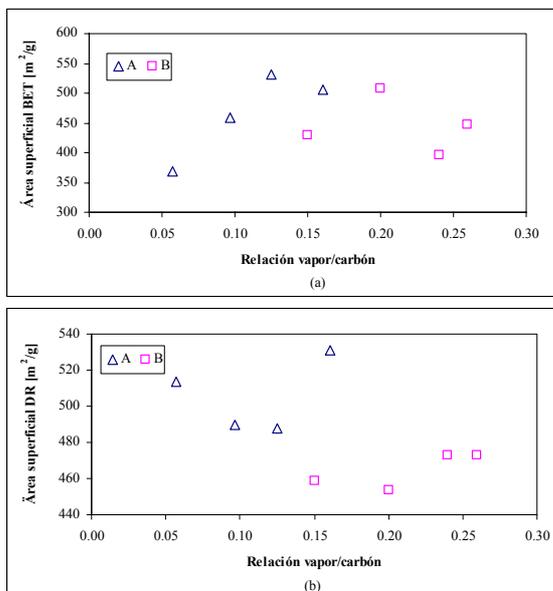
En la Figura 3 se presenta el efecto de la  $R_{vc}$  sobre la conversión del carbón alimentado. Las  $R_{vc}$  para el reactor A (0.07 a 0.18 kg/kg) son menores que para el reactor B (0.15 a 0.27 kg/kg), esto se refleja en la obtención de grados de conversión mayores en el reactor B que en el reactor A y se debe a que hay una mayor cantidad de vapor de agua en contacto con el carbón logra una mayor transformación del carbono fijo en gas combustible. Los porcentajes de conversión obtenidos en el reactor B son mayores al 70 % lo cual indica que predomina el proceso de gasificación en lugar de la activación de carbón. De esta forma, también se puede decir que los porcentajes de rendimiento obtenidos en los reactores disminuyen a medida que se da una mayor conversión del material.



**Figura 3.** Efecto de la relación vapor/carbón (Rvc) sobre la conversión del carbón

**Figure 3.** Effect of steam/carbon ratio on conversion coal

El área superficial es un indicativo de la porosidad desarrollada y varía de acuerdo al tipo de preparación del carbón activado, en la Figura 4 se presenta el efecto de la Rvc sobre las áreas superficiales BET (N<sub>2</sub>) y DR (CO<sub>2</sub>). En la Figura 4a se puede observar que al incrementar la Rvc aumenta el área superficial BET para el reactor A, desde 370 hasta 535 m<sup>2</sup>/g, mientras que para el reactor B se observa una variación en un rango estrecho del área BET (400 y 500 m<sup>2</sup>/g). En la Figura 4b se observa que tanto para el reactor A como para el reactor B al incrementar la Rac no varía el área superficial microporosa (S<sub>DR</sub>).



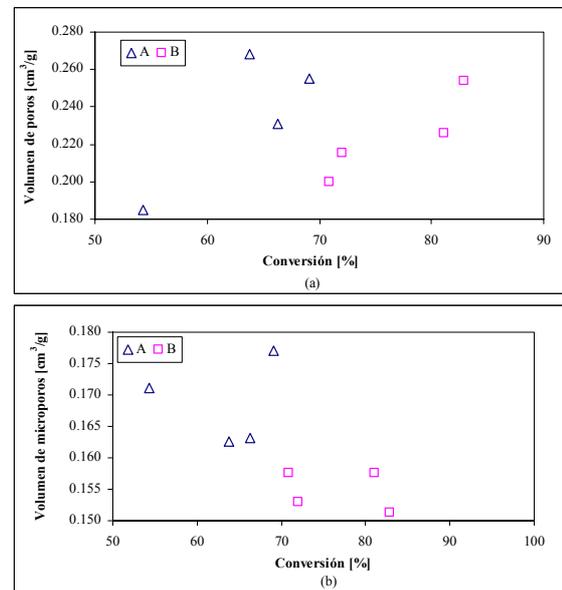
**Figura 4.** Efecto de la relación vapor/carbón sobre el área superficial.

**Figure 4.** Effect of steam/carbon on surface area

El cambio en el valor de las áreas superficiales DR de los dos reactores es levemente diferente y se observa una disminución de ésta con el aumento de la conversión, lo cual es similar a lo estudiado por Bo Feng (2003) [12]. Debido a que valores de áreas superficiales BET varía dentro del mismo rango para los dos reactores y que los valores de áreas superficiales DR para el reactor A son mayores que para el reactor B, se puede afirmar que los carbones activados en el reactor A poseen características más microporosas que los del reactor B.

### 3.2 DESARROLLO DE LA POROSIDAD

Al realizar un proceso de reestructuración porosa, el volumen de la porosidad es un parámetro de valoración del aumento de poros y microporos [10]. En la Figura 5 se presenta la relación que existe entre el volumen de poros y microporos respecto al grado de conversión.



**Figura 5.** Relación del volumen de poros y microporos respecto a la conversión.

**Figure 5.** Relation of pore and micropore volumes and conversion

En la Figura 5a, se observa que tanto en el reactor A como en el reactor B al aumentar el grado de conversión aumenta el volumen de

poros, similar a lo encontrado por Martín-Gullón (1996), aunque para obtener carbones activados con volúmenes de poros similares se necesita un menor grado de conversión en el reactor A que en el reactor B. Los valores de los volúmenes de poros obtenidos en los dos reactores varían entre [0.225 – 0.250 cc/g], valores similares a los encontrados por García-García (2003) [4].

En la Figura 5b, al aumentar la conversión se observa una tendencia general de disminución de volumen de microporos, esto se debe a que al aumentar el tiempo de contacto entre el agente activante y el sólido los microporos se van convirtiendo en macroporos [14]. El volumen de microporos en el reactor A es mayor que en el reactor B y varían entre los rangos [0,16 – 0,18 cm<sup>3</sup>/g] y [0,15 – 0,16 cm<sup>3</sup>/g], respectivamente, valores que comprueban la microporosidad de los carbones obtenidos en el reactor A.

A partir de la Figura 5a y 5b también se puede observar que después del 65 % de conversión no se favorece el incremento de la porosidad y después del 70 % no se favorece el incremento de la microporosidad. Además, estos resultados concuerdan con lo planteado por Pis (1998), quien en su investigación plantea que los carbones activados son más microporosos cuando el grado de conversión es menor a 50 % y más macroporosos cuando la conversión es mayor a 80 % [13].

El proceso de activación fue llevado a cabo en una sola etapa, metodología que concuerda con lo concluido por Martín-Gullón (1996). Las características de los carbones activados obtenidos se encuentran en un nivel menor (área superficial) de los encontrados comercialmente y los reportados por la literatura. Se debe tener en cuenta que los resultados encontrados son producto de la utilización de la tecnología autotérmica, en la cual parte del carbón se quema para el calentamiento y sostenimiento de la temperatura de proceso, otra parte se gasifica y la otra parte se activa.

Como futuras investigaciones se sugiere que para incrementar el valor de las áreas superficiales se realice un proceso de producción de carbón activado en dos etapas:

1) Alimentación de carbón que permitirá el

calentamiento del sistema y 2) Alimentación del carbón que se pretende activar en un nivel superior.

#### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto permitió activar carbón mineral, en reactores de 10 y 22 cm de diámetro interno, utilizando la tecnología de lecho fluidizado por proceso autotérmico. De los resultados experimentales y análisis realizados se concluyó:

- El valor promedio de Índice de Yodo, de los carbones activados obtenidos por rebose, es 460 mg I<sub>2</sub>/g carbón y el valor de las áreas superficiales BET es de 460 m<sup>2</sup>/g, valores que son considerados bajos respecto a las condiciones con las cuales se utiliza este material en la industria de alimentos y en el sector ambiental, lo cual indica que los carbones activados a estas condiciones experimentales no pueden ser competitivos comercialmente.
- Las temperaturas de reacción promedio alcanzadas estuvieron entre los 800-850 °C y se observó que el reactor de 10 cm de diámetro (reactor A) necesita una mayor relación aire/carbón que el reactor de 22 cm (reactor B) para alcanzar dichas temperaturas, debido a una mayor porcentaje de pérdidas de calor en el reactor A respecto al reactor B. La mayor parte del carbón se consumió en el proceso de combustión necesario para la generación de energía requerida para sostener la temperatura del sistema.
- A partir de la confrontación de los valores de áreas superficiales y grado de conversión se concluyó que en el reactor de lecho fluidizado autotérmico de 22 cm de diámetro se promueve la gasificación y la activación no es satisfactoria. En el reactor de lecho fluidizado autotérmico de 10 cm no se logró activación ni gasificación satisfactorias; por tal motivo se deben replantear las condiciones de operación en ambos reactores para la utilización de la tecnología autotérmica en el proceso de activación o gasificación de carbón.

*Lista de símbolos*

R <sub>vc</sub>	Relación vapor/carbón
R <sub>ac</sub>	Relación aire/carbón
R <sub>va/vmf</sub>	Relación velocidad aire/velocidad mínima de fluidización
F <sub>entrada</sub>	Flujo de carbón alimentado
F <sub>salida</sub>	Flujo de carbón activado obtenido por rebose o ciclón.
CF	Carbono fijo del carbón alimentado.
CZ	Cenizas de la muestra obtenida por rebose o ciclón
R	Rendimiento
X	Conversión
BET	Brauner-Emmet-Teller
DR	Dubinin-Raduskevich
S <sub>BET</sub>	Área superficial porosa obtenida por el método BET
S <sub>DR</sub>	Área superficial microporosa obtenida por el método DR
V <sub>BET</sub>	Volumen total de poros obtenido por el método BET
V <sub>DR</sub>	Volumen de microporos promedio obtenido por el método DR
D <sub>BET</sub>	Diámetro de total poros obtenidos por el método BET
D <sub>DR</sub>	Diámetro de microporos promedio obtenidos por el método DR
IY	Índice de Yodo

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por su apoyo financiero y a los ingenieros Jorge M. Mendoza, Carlos A. Alzate, Wilmar Morales, Carlos Londoño y demás investigadores del proyecto “*Factibilidad de producción de carbón activado por proceso autotérmico con carbones colombianos*” por su trabajo y dedicación.

**REFERENCIAS**

- [1] MARTÍN-GULLÓN, I. M. ASENSIO, R. FONT, A. MARCILLA, Steam-Activated carbons from a bituminous coal in a continuous multistage fluidized bed pilot plant. *Carbon*, 34, 1515-1520, 1996.
- [2] SATYA SAI, P.M., J. AHMED, K. KRISHNAIAH, Production of Activated Carbon from Coconut Shell Char in a Fluidized Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 3625-3630, 1997.
- [3] LINARES-SOLANO, A., MARTÍN-GULLÓN, I, SALINAS-MARTÍNEZ, C and SERRANO-TALAVERA, B. Activated carbons from bituminous coal: effect of mineral matter content. *Fuel*, 79, 6, 635-643, 2000.
- [4] GARCÍA-GARCÍA, A. GREGÓRIO, A. FRANCO, C. PINTO, F. BOAVIDA, D. GULYURTLE, I. Portugal, Unconverted chars obtained during biomass gasification on a pilot-scale gasifier as a source of activated carbon production. *Bioresource Technology*, 88, 27-32, 2003.
- [5] J. PÉREZ y et al. Factibilidad de producción de carbón activado por proceso autotérmico con carbones colombianos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, COLCIENCIAS., 2003.
- [6] F. CHEJNE et al. Obtención de carbón activado a partir de carbones colombianos, Fase I. Medellín: Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín y Bogotá, Universidad Pontificia Bolivariana, MINERCOL e INGEOMINAS, 2001.
- [7] F. CHEJNE et al. Obtención de carbón activado a partir de carbones colombianos, Fase II. Medellín: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín y Bogotá, Universidad Pontificia Bolivariana, MINERCOL e INGEOMINAS, 2001.
- [8] PATRICK, J.W. Porosity in Carbons, Halsted Press, New York, 1995.
- [9] QUANTACHROME CORPORATION. Nova Manual. High speed gas sorption analyzer. Version 6.05: 1999.
- [10] R. CHAND. Activated carbon. Ed. Marcel Dekker, Inc.
- [11] Comments on “Production of Activated carbon from coconut shell char in a fluidized bed reactor”. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, 1166-1168, 1999.

- [12] BO FENG, SURESH, K. BATHIA, Variation of the pore structure of coal chars during gasification. *Carbon* 41 507-523, 2003.
- [13] PIS, J. J., M. MAHAMUD, J. A. PAJARES, J. B. PARRA and R. C. BANSAL. Preparation of active carbons from coal. Part III: Activation of char. *Fuel processing technology*, 57, 149-161, 1998.
- [14] A. STRUGAŁA, Changes of porosity during carbonization of bituminous coals: effects due to pores with radii less than 2500 nm. *Fuel* 81, 1119 – 1130, 2002.
- [15] OCAMPO, A., E. ARENAS, F. CHEJNE, J. ESPINEL, C. LONDOÑO, J. AGUIRRE, J.D. PEREZ. An experimental study on gasification of Colombian coal in fluidised bed. *Fuel* 82, 161–164, 2003.
- [16] Carbón Activado: Estructura, Preparación y Aplicaciones. Francisco Rodríguez Reinoso. Available: <http://www.prof.uniandes.edu.co/~infquimi/revista01/id72.htm> [citado 1 de junio de 2005]