

# BENEFICIO DE LOS CARBONES GUACHINTE (CAUCA) Y GOLONDRINAS (VALLE DEL CAUCA) USANDO UN CIRCUITO CICLÓNICO EN DOS ETAPAS DE SEPARACIÓN

## BENEFICIATION OF GUACHINTE (CAUCA) AND GOLONDRINAS (VALLE DEL CAUCA) COALS USING A CYCLONE TEST RIG WITH TWO SEPARATION STAGES

ANDRÉS F. ROJAS

*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, afrojasgo@unal.edu.co*

JUAN M. BARRAZA

*Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, jubarraz@univalle.edu.co*

Recibido para revisar Enero 22 de 2007, aceptado Marzo 26 de 2008, versión final Junio 18 de 2008

**RESUMEN:** Dos carbones del Sur-Occidente Colombiano, minas Guachinte (Cauca) y Golondrinas (Valle del Cauca), se beneficiaron usando un circuito ciclónico en medio denso en dos etapas de separación en serie. Se obtuvo una fracción concentrada en materia orgánica (fracción beneficiada) por cada etapa de separación. Los rendimientos de las fracciones beneficiadas obtenidas en una primera etapa de separación estuvieron en el rango de 28 a 58%. Al utilizar una segunda etapa de separación, el rendimiento máximo obtenido de las fracciones beneficiadas fue de 71% en el carbón Guachinte. La concentración de ceniza de las fracciones beneficiadas fue entre 6.84 y 24.68%, las cuales son menores que las fracciones alimento 23.39 y 43.29%. También, existió reducción en el contenido de azufre total en las fracciones beneficiadas del carbón Guachinte comparativamente con las fracciones alimento. Sin embargo, en las fracciones beneficiadas del carbón Golondrinas ocurrió un comportamiento contrario.

**PALABRAS CLAVE:** Carbones beneficiados, ciclón en medio denso, remoción de cenizas, remoción de azufre.

**ABSTRACT:** Two Colombian coals from South-West, Guachinte (Cauca) and Golondrinas (Valle del Cauca), were beneficiated using a dense medium cyclone with two separation stages in series. It was obtained a concentrated fraction in organic matter (beneficiated fraction) for each separation stage. Yield of beneficiated fractions obtained in the first separation stage were in the range 28 to 58%. Using the second separation stage, the maximum yield obtained for Guachinte coal was 71%. Ash content of beneficiated coal fractions was between 6.84 and 24.68%, which was lower than feed fractions 23.39 y 43.29%. A reduction in sulphur content was also found in beneficiated fractions of Guachinte coal in comparison to feed fractions, however, a contrary behavior was obtained for Golondrinas coal.

**KEYWORDS:** Beneficiated coals, medium cyclone coal, ash removal, sulphur removal.

### 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen grandes reservas de carbón que en algunos casos se caracterizan por su alta calidad en cuanto a su bajo contenido de cenizas y azufre. Esos carbones cumplen con las

especificaciones de composición requeridas por el consumidor, de tal manera que no se requiere efectuar un proceso de beneficio, en cuyo caso sólo necesita adecuarse en tamaño. Esto se logra triturando y tamizando el carbón de acuerdo a las

especificaciones exigidas. En otros casos, Algunas reservas se caracterizan por su alto contenido de ceniza y/o azufre total, lo cual las hace poco rentable para su explotación. Una posible alternativa para mejorar la calidad de estos carbones es a través de un proceso de beneficio (o lavado) para reducir el contenido de cenizas y de azufre total. Un proceso de beneficio es la etapa de producción de carbón en la cual el carbón bruto, tal como sale de la mina, se procesa a un rango de productos de carbón limpio y de calidad uniforme, adecuados para el mercado comercial [1]. Los procesos de beneficio de carbón se realizan con el propósito de mejorar su homogeneidad, reducir los costos de transporte, mejorar la eficiencia en su utilización, producir menos cenizas y reducir las emisiones de óxidos de azufre [1].

Existen algunos métodos físicos y químicos que se usan para el beneficio del carbón. Entre los métodos químicos se tiene el lavado con ácidos usualmente fuertes para su desmineralización; y entre los procesos físicos están la separación gravimétrica, fluidización, separación en medio denso [2-4], flotación [5-8] y separación electrostática [9]. El mejoramiento físico de los carbones por separación en medio denso a través de un circuito ciclónico es uno de los métodos más comúnmente usados para separar materiales de densidades cercanas y de partículas medias en el rango de 250 a 1000 micras. Sin embargo, este método no es apropiado para separar materiales con densidades específicas muy altas (mayores a 1.8, medio muy denso) o muy bajas (menores a 1.3, medio inestable), y con partículas muy finas (menores a 100 micras) [3].

Se han desarrollado ciclones provistos de tres flujos o corrientes de salida para realizar una mejor separación y clasificación por tamaño, en lugar de dos flujos de salida como los ciclones convencionales [10,11]. De igual manera se han diseñado y probado hidrociclones con múltiples entradas con el propósito de estudiar el efecto del número de entradas y del área de sección transversa de estas entradas en el rendimiento de clasificación de las partículas [12]. También se ha estudiado la clasificación de carbón ultrafino empleando circuitos de ciclónicos multietapas, empleando diferentes arreglos de dos y tres ciclones [13], y se han diseñado ciclones

dinámicos con el fin de aumentar la eficiencia de separación cuando se trabajan con tamaños de partícula menores a 10 micras [14].

El objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento másico de las fracciones beneficiadas, la remoción de cenizas y de azufre de dos carbones del sur-occidente Colombiano empleando un ciclón de fondo cónico con dos etapas de separación, tamaños de partícula entre 250 y 1000 micras y con densidades específicas de separación de 1.3 y 1.4.

## **2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

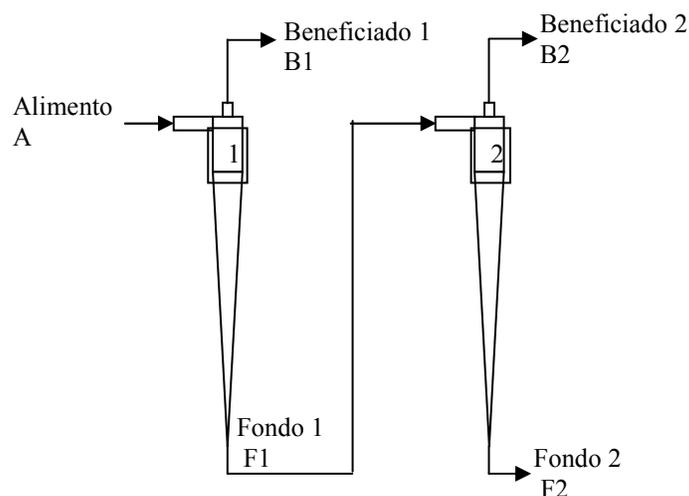
### **2.1 Selección, caracterización y adecuación de los carbones originales**

Para este trabajo se seleccionaron dos carbones del Sur-Occidente Colombiano, de las minas Guachinte (Cauca) y Golondrinas (Valle del Cauca). Las muestras de carbón se redujeron de tamaño y se clasificaron en tres fracciones respecto a su tamaño de partícula, empleando tamices estándar de la serie Taylor. Los tamaños de partícula para clasificar las fracciones de carbón fueron: pasante 1000 $\mu\text{m}$  y retenido 600 $\mu\text{m}$  (-1000+600 $\mu\text{m}$ ), pasante 600 $\mu\text{m}$  y retenido 425 $\mu\text{m}$  (-600+425 $\mu\text{m}$ ), y pasante 425 $\mu\text{m}$  y retenido 250 $\mu\text{m}$  (-425+250 $\mu\text{m}$ ). Los carbones originales, las fracciones alimentos clasificados por tamaños y las fracciones beneficiadas, se caracterizaron respecto a su análisis próximo, empleando un Analizador Termogravimétrico LECO TGA 601, a su contenido de azufre total, utilizando un Sulfurómetro LECO SC 32, y a su poder calorífico, a través de una Bomba Calorimétrica LECO AC 350.

### **2.2 Obtención de las fracciones mejoradas de carbón**

Las fracciones de diferentes tamaños de partícula de los dos carbones se procesaron en un circuito ciclónico implementado por Caicedo [3]. Para este propósito, inicialmente se adicionó 1kg de carbón junto con 20L de medio denso (mezcla agua y nitrato de calcio) al tanque de alimentación. La mezcla carbón-medio se agitó hasta tener una suspensión uniforme (pulpa).

Posteriormente, por medio de una bomba la pulpa se alimentó al ciclón usando una presión de entrada de 1.2 bar para obtener en una primera etapa de separación, una fracción de fondo rica en materia mineral (Fondo 1) y una fracción de tope concentrada en materia orgánica (beneficiado 1) [15]. Para efectuar la separación en dos etapas, el fondo de la primera separación se retornó al tanque de alimentación y se hizo pasar nuevamente por el ciclón. De esta manera se obtuvo una segunda fracción concentrada en materia orgánica (concentrado 2) que salió por el tope y una fracción de fondo concentrada en materia mineral (Fondo 2). Un esquema del proceso se muestra en la figura 1. En este trabajo se empleó el mismo ciclón cónico para llevar a cabo las dos etapas de separación.



**Figura 1.** Sistema ciclónico con dos etapas de separación  
**Figure 1.** Cyclone system with two separation stages

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de los carbones originales y fracciones alimento

En la Tabla 1 se presenta la caracterización, respecto al contenido de cenizas, materia volátil, carbono fijo, azufre total, y al poder calorífico, de las muestras de carbón original y de las fracciones de diferentes tamaños de partícula alimentadas al circuito ciclónico. En esta tabla se observa que las fracciones de tamaño  $-600+425$  y  $-425+250\mu\text{m}$  presentan menores porcentajes de ceniza que los carbones originales y presentan

En la figura 1 se muestra que se obtienen tres productos, una fracción de fondo 2 y dos fracciones beneficiadas 1 y 2 sobre las cuales se determina el rendimiento del proceso y los porcentajes de remoción de ceniza y de azufre total. Como medio denso de separación se utilizó Nitrato de Calcio,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , disuelto en agua para obtener densidades específicas de 1.3 y 1.4. Detalles del circuito ciclónico y de su forma de operación se reportan en el trabajo de Caicedo [3] y Rojas [15].

La cantidad total de fracciones beneficiadas obtenidas en el circuito ciclónico, de acuerdo con el diseño experimental al usar dos etapas de separación, tres tamaños de partícula, dos densidades específicas y dos carbones fueron 24.

mayores porcentajes de materia volátil y carbono fijo. Un análisis más detallado de los resultados mostrados en la tabla 1 se encuentra en otro trabajo del mismo autor [15].

#### 3.2 Rendimiento másico de fracciones de carbón

El rendimiento másico de cada fracción de carbón en cada una de las dos etapas de separación se determinó por medio de la siguiente relación:

$$\text{Rendimiento 1a. etapa, \% p/p} = \frac{B1}{A} (100) \quad (1)$$

$$\text{Rendimiento 2a. etapa, \% p/p} = \frac{B2}{A} (100) \quad (2)$$

Donde B1 y B2 representan las masas de carbón beneficiados en la primera y segunda etapa de separación, A es la masa total alimentada en la primera etapa de separación y F1 la masa del fondo 1 alimentado a la segunda etapa de separación. Los resultados del rendimiento másico de las fracciones beneficiadas en función del tamaño de partícula, para ambos carbones, variando las etapas de separación y las densidades específicas de separación se muestran en las Figuras 2 y 3.

En general, para las dos densidades de separación, los tres tamaños de partícula y las dos etapas de separación, las fracciones de carbón beneficiadas de la mina Guachinte presentan mayor rendimiento comparativamente con las fracciones obtenidas del carbón Golondrinas. Esto podría deberse a que las fracciones alimento del carbón Golondrinas

presentan mayores concentraciones de cenizas comparativamente con las fracciones alimento del carbón Guachinte. Tal como se muestra en la tabla 1, los contenidos de ceniza de las fracciones de partícula -600+425 y -425+250 micras presentan mayor valor en el carbón Golondrinas que en el carbón Guachinte. Esta diferencia hace que mayor cantidad de ceniza del carbón Golondrinas salga por los fondos del ciclón en comparación con el carbón Guachinte. Esto explica porque este último carbón presente mayor rendimiento en los flotados.

El tamaño de partícula tiene un importante efecto sobre los rendimientos de los carbones beneficiados, ya que se observa una tendencia a aumentar a medida que se disminuye el tamaño de partícula. Lo anterior se debe a que el flujo anular interno del ciclón arrastra con mayor facilidad las partículas más finas de carbón. Luego se puede considerar que el circuito de separación en medio denso empleado trabaja en forma adecuada cuando se utilizan tamaños de partículas relativamente finas (-425+250 $\mu\text{m}$ ),

**Tabla 1.** Análisis próximo de los carbones originales y fracciones alimento

**Table 1.** Proximate analysis of raw coal and feed coal fractions

Muestra	Ceniza (% bs)	Materia Volatil. (% bs)	Carbón Fijo (% bs)	Azufre Total (% bs)	Poder Calorífico BTU/lb
<b>Guachinte</b>					
Original	41.84	29.43	28.73	2.27	7967.08
-1000+600	43.29	29.65	27.06	2.90	7716.22
-600+425	33.69	33.65	32.66	2.32	9377.08
-425+250	23.69	38.74	37.57	2.23	11159.04
<b>Golondrinas</b>					
Original	41.09	33.55	25.36	0.54	8096.84
-1000+600	42.88	33.41	23.71	0.52	7787.15
-600+425	38.18	34.65	27.17	0.67	8600.28
-425+250	39.36	34.19	26.45	0.56	8396.14

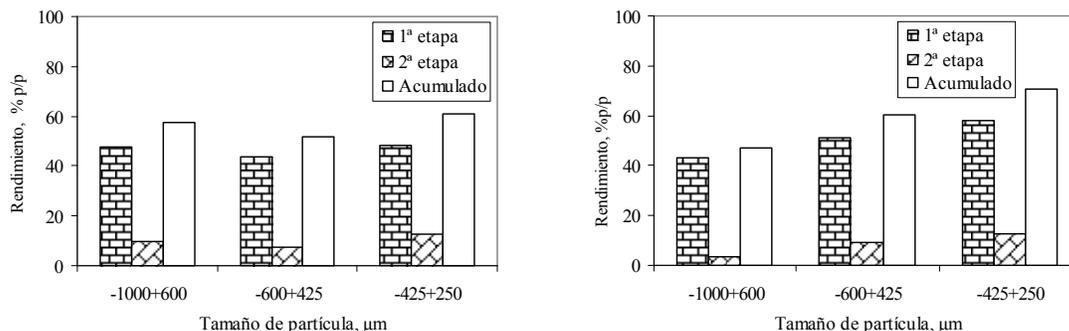
% bs: Porcentaje en base seca

La densidad de separación también tuvo un efecto importante en el proceso de separación ciclónico, tal como se muestra en las figuras 2 y 3. Se observa que, para los tamaños de partícula -600+425 y -425+250 $\mu\text{m}$ , el rendimiento de las muestras beneficiadas fue mayor utilizando una densidad específica de separación de 1.4 en comparación con 1.3. Al tamaño de partícula de -425+250  $\mu\text{m}$  y a densidad específica de 1.4 los

rendimientos globales fueron del 72% para Guachinte y 50% para Golondrinas, mientras que a la densidad de 1.3, los rendimientos fueron del 51% para el carbón Guachinte y 41% para el carbón Golondrinas. Esto es consecuencia de que a mayor densidad de separación, probablemente salga mayor contenido de cenizas por la parte superior del hidrociclón, de tal manera que el peso se incrementa. Esto se

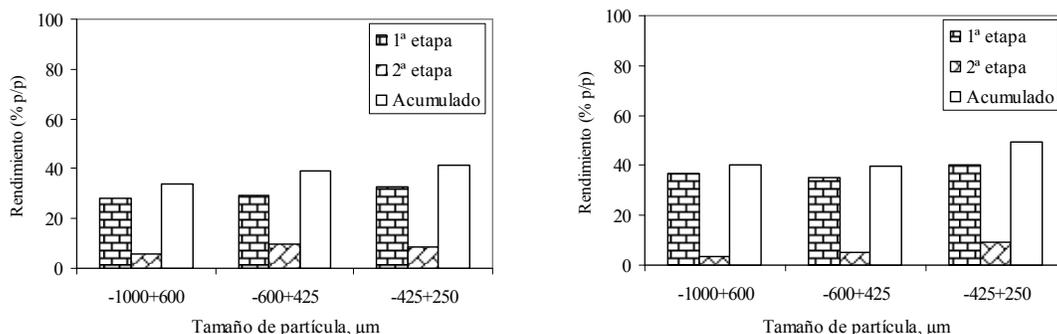
corroborar más adelante cuando se analice el contenido de cenizas de las fracciones beneficiadas obtenidas a la densidad específica de 1.4. Utilizando una segunda etapa de separación, se observó que el rendimiento global (suma de los rendimientos de las dos etapas) de

las fracciones beneficiadas es mayor usando el carbón de la mina Guachinte. El más alto rendimiento global encontrado en el carbón Guachinte fue del orden del 71% p/p usando una densidad de separación específica de 1.4 con el tamaño de partícula más fino (-425+250 $\mu$ m).



a. Densidad específica 1.3 b. Densidad específica 1.4

**Figura 2.** Rendimiento másico para el carbón Guachinte  
**Figure 2.** Mass yield for Guachinte Coal



a. Densidad específica 1.3 b. Densidad específica 1.4

**Figura 3.** Rendimiento másico para el carbón Golondrinas  
**Figure 3.** Mass yield for Golondrinas Coal

### 3.3 Contenido y Remoción de Cenizas

Los resultados del contenido de cenizas de las fracciones beneficiadas en función del tamaño de partícula, para ambas minas, usando dos etapas de separación y dos densidades específicas de separación se muestran en las figuras 4 y 5. En estas figuras se muestran también los contenidos de ceniza de las muestras alimento para propósitos comparativos. En general, para todas las pruebas, la concentración de ceniza en las corrientes beneficiadas está entre 6.84 y 24.68%.

Para todas las condiciones de operación, estos contenidos de ceniza son menores comparados con los contenidos de las fracciones alimentadas (entre 23.39 a 43.29%).

Por otro lado, usando una sola etapa de separación y comparando el contenido de cenizas de ambos carbones se encontró que la mina Guachinte presentó el menor contenido de ceniza (6.84%) a una densidad de separación específica de 1.3 con tamaño de partícula de -600+425  $\mu$ m (figura 4.a). Al analizar el efecto de la densidad de separación, se observa que,

para ambos carbones, las muestras beneficiadas presentan menor contenido de cenizas al procesarlas a una densidad específica de separación de 1.3.

Al utilizar una segunda etapa de separación se encontró que las fracciones beneficiadas presentaron contenidos de cenizas en el rango de 8 a 25%. Estos resultados son en su mayoría valores intermedios entre los contenidos de cenizas de las fracciones alimentadas y los de las fracciones beneficiadas de la primera etapa. Lo anterior sugiere que se podría incrementar el rendimiento másico del proceso global mezclando las fracciones beneficiadas de las dos etapas, con detrimento en la calidad del flotado de la primera etapa desde el punto de vista de un aumento del contenido de ceniza y del azufre total.

Los resultados presentados en las figuras 4 y 5 también muestran que en el caso de la mina Guachinte existió un comportamiento extraño en el beneficio de la fracción de tamaño de partícula -100+600  $\mu\text{m}$  usando la densidad de separación de 1.3, donde el contenido de ceniza de la corriente beneficiada en la etapa 2 es menor que la obtenida en la primera etapa. Tal como se observó para el resto de condiciones de operación este comportamiento fue contrario al esperado, lo cual podría relacionarse con que en el carbón Guachinte se podría presentar menor liberación de materia mineral comparativamente con el carbón Golondrinas.

Al analizar el efecto del tamaño de partícula se observa que para el carbón Guachinte existe la tendencia de que los mayores contenidos de ceniza se presentan en las fracciones de tamaño de partícula -1000+600  $\mu\text{m}$  (ver figuras 4.a y b). Sin embargo, en la figura 5.a, para el carbón Golondrinas, se observa una tendencia de incrementarse el contenido de ceniza a menores tamaños de partícula. Estos resultados confirman la tendencia de que tanto a bajos como a altos tamaños de partícula, se pueden obtener altos contenidos de cenizas [4].

A partir de los resultados de rendimiento de las fracciones beneficiadas, contenidos de ceniza del alimento y de las fracciones beneficiadas, se obtiene el porcentaje de remoción de cenizas para cada etapa de separación, a través de la siguiente ecuación:

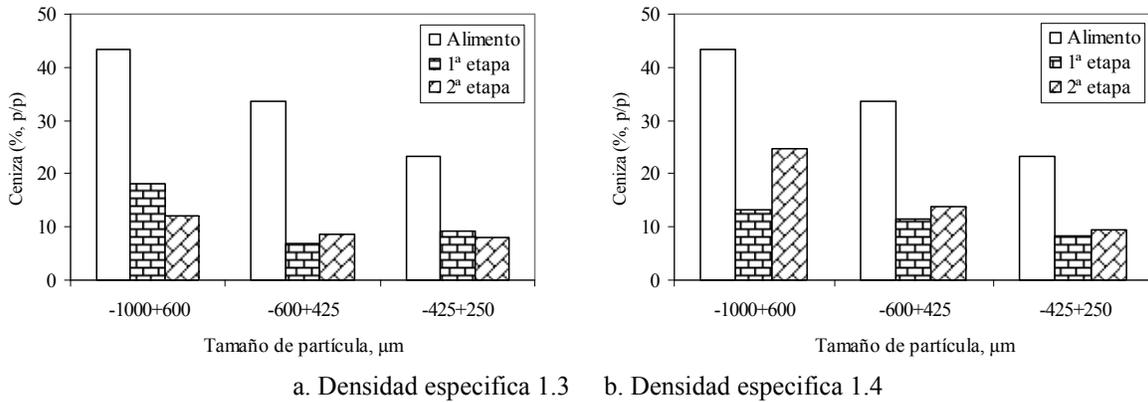
$$R. \text{ cenizas, 1a etapa, \% p/p} = \left[ 1 - \frac{(Y1) (C1)}{(CA)} \right] (100) \quad (3)$$

$$R. \text{ cenizas, 2a etapa, \% p/p} = \left[ 1 - \frac{(Y2) (C2)}{(CA)} \right] (100) \quad (4)$$

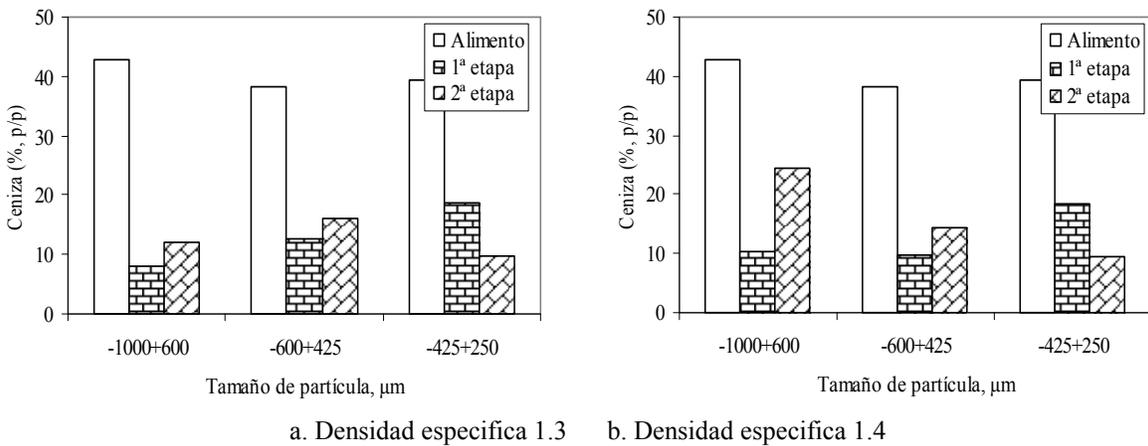
Donde Y1 y Y2 representan las fracciones másicas de la corriente beneficiada 1 y 2, C1 y C2 los porcentajes de ceniza de las corrientes beneficiadas 1 y 2 y CA es el porcentaje de ceniza de la corriente alimentada al hidrociclón.

Los resultados del porcentaje de remoción de cenizas de las fracciones beneficiadas en función del tamaño de partícula, para ambas minas, para las dos etapas de separación y las dos densidades específicas de separación se presentan en las figuras 6 y 7. Los resultados muestran que, en general, se obtuvieron mayores valores de remoción de cenizas en el carbón de la mina Golondrinas a la densidad de separación de 1.3 y tamaño de partícula -1000+600  $\mu\text{m}$  comparado con el carbón de la mina Guachinte. Esto se podría relacionar con el menor contenido de ceniza y el bajo rendimiento de flotados que se obtuvo en la fracción -1000+600  $\mu\text{m}$  de la mina Golondrinas a la densidad de separación 1.3. En general, se obtuvieron valores de remoción de cenizas mayores a 74% en los dos carbones. Esto explica la importancia del proceso de beneficio, ya que se retiran altos porcentajes de inertes a través de la corriente de fondo del hidrociclón y se concentra la fracción beneficiada en materia orgánica.

Por otro lado, se encontró en el carbón Golondrinas que trabajando con ambas densidades de separación, existe mayor porcentaje de remoción de cenizas usando el tamaño de partícula de -1000+600  $\mu\text{m}$ , en comparación con los otros dos tamaños. Igual comportamiento ocurrió en el carbón Guachinte a la densidad de separación de 1.4. Sin embargo, en el carbón Guachinte este comportamiento no se presenta. Estos resultados son consecuencia de los contenidos de cenizas de las fracciones obtenidas y de los sus rendimientos, los cuales varían en cada condición de operación, tal como se observa en las Figuras 2 a 5.



**Figura 4.** Contenido de ceniza de las fracciones alimento y beneficiadas del carbón Guachinte  
**Figure 4.** Ash content of feed and beneficiates fractions for Guachinte coal



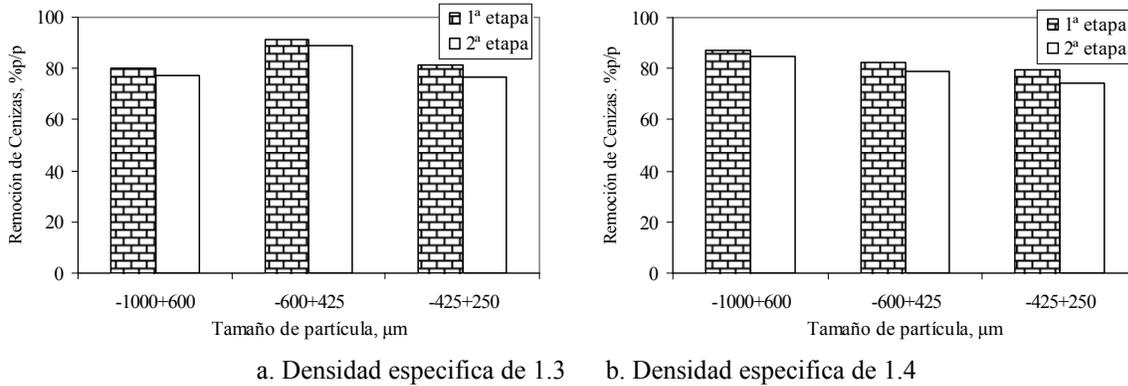
**Figura 5.** Contenido de ceniza de las fracciones alimento y beneficiadas del carbón de la mina Golondrinas  
**Figure 5.** Ash content of feed and beneficiates fractions for Golondrinas coal

### 3.4 Contenido y Remoción de Azufre Total

Los resultados del contenido de azufre total de las fracciones beneficiadas y fracciones alimento en función del tamaño de partícula, para ambos carbones, usando dos etapas de separación y dos densidades específicas de separación se presentan en la tabla 2.

Al analizar los resultados de la tabla 2, se observa una notable reducción en el contenido de azufre total en las fracciones beneficiadas del carbón Guachinte en las dos etapas de separación comparativamente con las fracciones

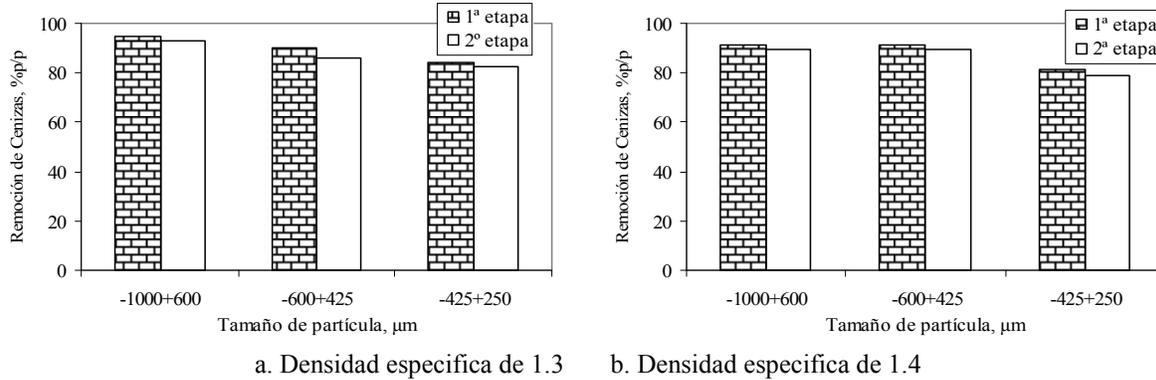
alimentadas, para los tres tamaños de partícula y las dos densidades específicas de separación. Caso contrario ocurre en las fracciones beneficiadas del carbón Golondrinas que sufren un incremento en el porcentaje de azufre total. Del anterior comportamiento podría concluirse que el carbón Guachinte tiene altos contenidos de azufre pirítico o azufre unido a la materia mineral de origen epigenético; mientras que el carbón Golondrinas podría tener altos contenidos de azufre orgánico o azufre de origen singenético [16].



a. Densidad específica de 1.3      b. Densidad específica de 1.4

**Figura 6.** Remoción de cenizas en el carbón Guachinte

**Figure 6.** Ash removal of the Guachinte coal



a. Densidad específica de 1.3      b. Densidad específica de 1.4

**Figura 7.** Remoción de cenizas en el carbón Golondrinas

**Figure 7.** Ash removal of Golondrinas coal

También se observa en la Tabla 2 que existe la tendencia en el carbón de la mina Guachinte de tener menores contenidos de azufre en las fracciones beneficiadas de la primera etapa para casi todos los tamaños de partícula y las dos densidades de separación. Al utilizar una segunda etapa de separación se encontró que las fracciones de carbón obtenidas presentaron contenidos de azufre en el rango de 1.14 a 1.61%. Estos resultados en su mayoría son valores intermedios entre los contenidos de azufre de las fracciones alimentadas (rango 2.26 a 2.94%) y los de las fracciones beneficiadas de la primera etapa (rango 0.99 a 1.73%). Lo anterior sugiere que es posible tener un mejor rendimiento másico en las fracciones beneficiadas con un contenido medio de azufre total, al procesar el carbón empleando dos etapas de separación. Esto indica que el azufre trata de

concentrarse en las fracciones ricas en materia mineral, lo cual es característico de su contenido de azufre pirítico. Para la mina Guachinte se encontró que si se desea obtener un carbón con un contenido promedio de azufre empleando dos etapas de separación, el hidrociclón debe trabajar con una densidad específica del medio de separación de 1.3 y con un carbón de un tamaño de partícula de  $-1000+600\mu\text{m}$ .

La densidad de separación tuvo un importante efecto en la concentración de azufre. Para la mayoría de fracciones obtenidas en las dos etapas de separación presentaron mayor contenido de azufre a la densidad de separación 1.4 que los obtenidos a 1.3. Esto es consecuencia de que a la densidad de separación 1.4, existe mayor facilidad de separarse el azufre por tener idéntica o mayor densidad. La pirita tiene densidades específicas mayores a 1.5.

**Tabla 2.** Contenido de azufre total de las fracciones alimento y beneficiadas  
**Table 2.** Feed and beneficiated coal fraction of total sulphur content

Mina Tamaño de Partícula	Densidad = 1.3			Densidad = 1.4		
	Fracción Alimento	1ª etapa	2ª etapa	Fracción Alimento	1ª etapa	2ª etapa
<b>Guachinte</b>						
-1000+600 $\mu\text{m}$	2.94	0.99	1.15	2.94	1.16	1.61
-600+425 $\mu\text{m}$	2.35	1.08	1.14	2.35	1.40	1.30
-425+250 $\mu\text{m}$	2.26	1.73	1.22	2.26	1.07	1.17
<b>Golondrinas</b>						
-1000+600 $\mu\text{m}$	0.53	0.76	0.82	0.53	0.80	0.75
-600+425 $\mu\text{m}$	0.68	0.71	0.75	0.68	1.47	0.84
-425+250 $\mu\text{m}$	0.57	0.65	0.77	0.57	0.74	0.77

Aunque no hubo reducción en el contenido de azufre en las fracciones beneficiados de la mina Golondrinas, el proceso de beneficio se puede utilizar con el fin de reducir el contenido de cenizas. Estas fracciones beneficiadas del carbón de la mina Golondrinas presentan bajos contenidos de azufre (menores al 1%), de tal manera que se pueden comercializar, ya que cumplen con las especificaciones exigidas por las autoridades ambientales.

Los resultados encontrados anteriormente de rendimiento y contenido de azufre tanto de las fracciones beneficiadas como de las fracciones alimento se pueden relacionar para determinar el porcentaje de remoción de azufre total, a partir de la siguiente ecuación:

$$R. \text{azufre, 1a. etapa \% p/p} = \left[ 1 - \frac{(Y1) (S1)}{(SA)} \right] (100) \quad (5)$$

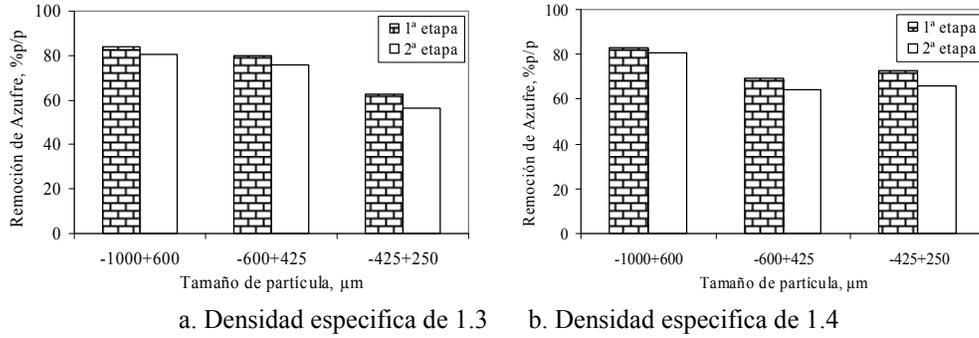
$$R. \text{azufre, 2a. etapa \% p/p} = \left[ 1 - \frac{(Y2) (S2)}{(SA)} \right] (100) \quad (6)$$

Donde Y1 y Y2 significan a fracción másica de las corrientes beneficiadas obtenida en las etapas 1 y 2, S1 y S2 el porcentaje de azufre de la corriente beneficiada de las etapas 1 y 2, y SA el porcentaje de azufre de la corriente alimentada al hidrociclón. Los resultados del porcentaje de remoción de azufre de las fracciones beneficiadas en función del tamaño de partícula,

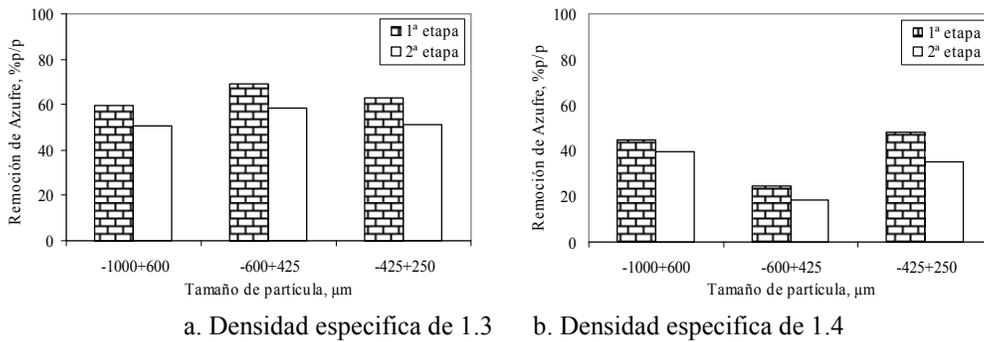
para los dos carbones, las dos etapas de separación y las dos densidades específicas de separación se muestran en las figuras 8 y 9. Los resultados muestran que existe mayor remoción de azufre total usando el carbón de la mina Guachinte en comparación con el carbón de la mina Golondrinas. Lo anterior se debe a que el carbón original de la mina Guachinte tiene mayor contenido de azufre total, y posiblemente la mayor parte de este azufre es de tipo epigenético, de tal manera que la remoción depende principalmente del origen del azufre [16].

Al analizar el efecto del tamaño de partícula, se observa que existe la tendencia de obtener mayores porcentajes de remoción de azufre usando el mayor tamaño de partícula. Por lo tanto, si se desea obtener un buen carbón beneficiado, proveniente de la mina Guachinte, con altos porcentajes de remoción de azufre se recomienda trabajar con dos etapas de separación y una densidad específica de 1.3 y un tamaño de partícula de -1000+600  $\mu\text{m}$ .

En general, se observó que la remoción de azufre para todas las condiciones de operación fue mayor al 18%, lo cual indica que a pesar de que en el carbón Golondrinas no se presentó reducción en el contenido de azufre en la corriente beneficiada si se aprecia una considerable remoción; de esto se infiere que hay una gran cantidad de azufre removido que no se procesa en los sistemas de combustión, por lo que se reduce la contaminación atmosférica.



**Figura 8.** Remoción de azufre en el carbón de la mina Guachinte  
**Figure 8.** Sulphur removes percentage in the Guachinte coal



**Figura 9.** Remoción de azufre en el carbón de la mina Golondrinas  
**Figure 9.** Sulphur removes percentage in the Golondrinas coal

### 3.5 Poder Calorífico

Los resultados del poder calorífico de las fracciones beneficiadas y fracciones alimento en función del tamaño de partícula, para ambas minas, variando las etapas de separación y las densidades específicas de separación se muestran en la tabla 3. Los valores de poder calorífico están dados en BTU/lb.

Se observa que el poder calorífico de las fracciones alimento del carbón Guachinte aumenta a medida que el tamaño de partícula decrece a tamaños más finos; en cambio para las fracciones alimento del carbón Golondrinas permanece casi constante, aproximadamente 8000 BTU/Lb. Esta tendencia se presenta debido a que en el carbón Guachinte un hay alto contenido de cenizas en el tamaño  $-1000+600 \mu\text{m}$ ; mientras que en el carbón Golondrinas la distribución de materia mineral en los diferentes tamaños de partícula es casi uniforme, indicando que no se presenta preconcentración de materia mineral en el proceso de molienda.

En esta tabla también se aprecia que hubo un considerable aumento en el poder calorífico tanto para la primera como para la segunda etapa de beneficio respecto al carbón alimento. Esto se debe principalmente a que los porcentajes de cenizas de esas fracciones beneficiadas son menores que los contenidos del carbón alimento. Para una sola etapa de separación el carbón Guachinte presentó el mejor aumento del poder calorífico promedio para todos los tamaños de partícula a una densidad de 1.4. En el carbón Golondrinas se observa que empleando una etapa de separación el poder calorífico disminuye al disminuir el tamaño de partícula, para ambas densidades. Caso contrario sucede cuando se emplea una segunda etapa de separación; esto se debe a que los contenidos de ceniza son mayores en las fracciones beneficiadas procedentes de la segunda etapa. De lo anterior se confirma que las cenizas tienen un efecto negativo en el poder calorífico de un carbón [17].

**Tabla 3.** Poder calorífico de las fracciones alimento y beneficiadas  
**Table 3.** Feed and beneficiated fraction heating value

Mina	Densidad = 1.3			Densidad = 1.4		
	Fracción Alimento	1ª etapa	2ª etapa	Fracción Alimento	1ª etapa	2ª etapa
<b>Guachinte</b>						
-1000+600 $\mu\text{m}$	7716.22	12063.87	13138.24	7716.22	12937.55	10935.87
-600+425 $\mu\text{m}$	9377.08	14022.3	13729.92	9377.08	13231.66	12811.25
-425+250 $\mu\text{m}$	11159.04	13615.73	13799.12	11159.04	13766.25	13588.05
<b>Golondrinas</b>						
-1000+600 $\mu\text{m}$	7787.15	13812.96	13122.67	7787.15	13435.81	10960.09
-600+425 $\mu\text{m}$	8600.28	12994.64	12442.75	8600.28	13513.66	12731.67
-425+250 $\mu\text{m}$	8396.14	11953.14	13520.58	8396.14	12043.11	13553.45

En las fracciones beneficiadas de los dos carbones se observa que el poder calorífico aumentó en la segunda etapa de separación respecto de la primera, al procesarse a una densidad específica de 1.3. Esto se debe a que hay una gran remoción en el contenido de ceniza tanto para la primera etapa como para la segunda; y se confirma el hecho de que el equipo de separación hidrociclónico trabaja bien con tamaños de partícula pequeños (-425+250  $\mu\text{m}$ ) [3]. Cuando se realiza la separación a una densidad de 1.4 el poder calorífico, para las fracciones beneficiadas de los dos carbones, disminuye en las fracciones de la segunda etapa debido a que su contenido de cenizas aumenta respecto al contenido de cenizas de las fracciones beneficiadas de la primera etapa.

#### 4. CONCLUSIONES

Es posible utilizar dos etapas de separación en serie para incrementar el rendimiento y calidad del carbón, obteniéndose fracciones beneficiadas de carbón de calidad media tanto para el contenido de ceniza como para el contenido de azufre total.

En general para todas las densidades específicas de separación, tamaño de partícula y tipo de carbón, los rendimientos de las fracciones beneficiadas obtenidas en una primera etapa de separación estuvieron en el rango de 28 a 58%. Sin embargo, al utilizar una segunda etapa de separación, el rendimiento global de las fracciones beneficiadas se incrementa considerablemente, obteniéndose rendimientos globales del orden de 71% en el carbón Guachinte al usar una densidad de 1.4 y un tamaño de partícula de -425+250 $\mu\text{m}$ .

Existe la tendencia de aumentar el rendimiento del proceso de separación con la disminución del tamaño de partícula, con el aumento en la densidad específica del medio de separación.

En general para los dos carbones, la concentración de ceniza de las fracciones beneficiadas están entre 6.84 y 24.68%, las cuales son menores comparativamente con las concentraciones de las fracciones alimento que están entre 23.39 y 43.29%. Los menores contenidos de ceniza en las fracciones beneficiadas se presentan a una densidad específica de 1.3.

Para los tres tamaños de partícula, las dos densidades específicas y las dos etapas de separación, existe reducción en el contenido de azufre total en las fracciones beneficiadas del carbón Guachinte comparativamente con las fracciones alimento; sin embargo, en las fracciones beneficiadas del carbón Golondrinas ocurrió un comportamiento contrario.

La remoción de azufre para todas las condiciones de operación y tipo de carbón fue mayor al 18%, lo cual indica que si estos carbones beneficiados se utilizan en combustión habría reducción en la cantidad de azufre no procesado, por lo tanto reduciendo las emisiones al ambiente de  $\text{SO}_x$ .

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a COLCIENCIAS y a la Universidad del Valle por el patrocinio al proyecto.

**REFERENCIAS**

- [1] WORLD Coal Institute. Carbón, Energía para el Progreso. Abril de 1998. pp. 11.
- [2] BARRAZA, J.; CAICEDO, M.; BOTACHE, C. Colombian Coal Beneficiation using Hydrocyclone Separation. Proceedings 17th. Annual International Pittsburgh Coal Conference. Pittsburg. 2000. pp. 1–10.
- [3] CAICEDO, MR. Beneficio de carbones de la región Sur-Occidental Colombiana: remoción de cenizas y azufre mediante separación hidrociclónica. Tesis de Maestría. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Cali. Colombia. 2000.
- [4] ROJAS, A. Reactividad en la combustión de carbones beneficiados. Tesis de Maestría. Escuela de Ingeniería Química. Universidad del Valle, 2001.
- [5] PIÑERES J. Separación de grupos macerales en fracciones beneficiadas de carbón obtenidas por flotación burbujeante, M.Sc. Thesis. Universidad del Valle – Colombia, 2003.
- [6] BARRAZA J.; PIÑERES J. A pilot-scale flotation column to produce beneficiated coal fractions having high concentration of vitrinite maceral. *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 1879-1883.
- [7] FECKO PETER; IVA PECTOSA; PAVLA OVCARI; VLADIMIR CABLIK; BARBARA TORA. Influence of petrographical composition on coal flotability. *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 1901-1904.
- [8] HONAKER R.; MONHANTY M.; CRELLING J. Coal maceral separation using column flotation. *Mineral Engineering*. Vol. 9. 1996. pp. 449-464.
- [9] LEONARD J.; HARDINGE B. COAL Preparation, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, inc. 1991.
- [10] OBENG DP; MORRELL S. The JK three-product cyclone—performance and potential applications. *Internacional Journal of Mineral Processing*. Vol. 69. 2003. pp. 129– 142.
- [11] OBENG DP; MORRELL TS, NAPIER-MUNN T.J. Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone. *Internacional Journal of Mineral Processing*. Vol.76. 2005. pp. 181– 192.
- [12] YOSHIDA H; YOSHIKAWA S; FUKUI K; YAMAMOTO T. Effect of multi-inlet flow on particle classification performance of hydro-cyclones. *Powder Technology*. Vol. 184. 2008. pp. 352–360.
- [13] HONAKER RQ; BOATEN F; LUTTRELL GH. Ultrafine coal classification using 150 mm gMax cyclone circuits. *Minerals Engineering*. Vol. 20. 2007. pp. 1218–1226.
- [14] JIAO J; ZHENG Y; WANG J; SUN G. Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone with a rotary impeller. *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 47. 2008. pp. 1861–1866.
- [15] ROJAS, ANDRÉS F.; BARRAZA, JUAN M. Particionado de elementos en dos carbones del sur-occidente colombiano. *DYNA, Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, Vol. 74. No. 152. 2007. pp. 187-196.
- [16] LÓPEZ-BUENDÍA AM; WHATELEY MKG; BASTIDA J; URQUIOLA MM. Origins of mineral matter in peat marsh and peat bog deposits, Spain. *International Journal of Coal Geology*. Vol. 71. 2007. pp. 246–262.
- [17] CLOKE M.; BARRAZA J.; MILES N. PILOT-scale studies using a hydrocyclone and froth flotation for the production of beneficiated coal fractions for improved coal liquefaction. *Fuel*. Vol. 76. No. 13. 1997. pp. 1217-1223.