

# **ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL CARBÓN DE LA EMPRESA CARBONES DE SABALETA S.A. CON EL FIN DE SATISFACER LA DEMANDA INDUSTRIAL**

**TATIANA TAMAYO MARULANDA<sup>1</sup>, MARÍA ESPERANZA LÓPEZ GÓMEZ<sup>2</sup>,  
CECILIA SERNA GIRALDO<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ingeniera de Materiales, Universidad de Antioquia.

<sup>2</sup> Docente del Departamento de Ingeniería de Materiales, Grupos GIPIMME y GIMACYR,  
Universidad de Antioquia

<sup>3</sup> Geóloga, Empresa SERGEO

Contacto: melopez@udea.edu.co  
Calle 67 Número 53 – 108 oficina 18-138, +57-4-2198540  
Medellín, Colombia

## **RESUMEN**

Este trabajo está encaminado a formular los aspectos necesarios para diagnosticar el comportamiento de las calderas con respecto al carbón, el consumo actual y su futuro en la empresa Carbones de Sabaletas S.A respecto a sus empresas consumidoras en cuanto a la calidad, manejo y utilización del carbón suministrado. Se efectuó un seguimiento al carbón desde la salida de la mina hasta la llegada a cada una de las empresas consumidoras ubicadas en el Departamento de Antioquia para medir las variaciones de las propiedades del carbón. Se obtuvieron resultados favorables para la Empresa Carbones Sabaletas, ya que el carbón no sufre cambios muy significativos en el transporte; asegurando desde la salida de la mina una buena calidad del producto entregado.

**PALABRAS CLAVES:** *Carbón, Calderas, Sistemas de Combustión, Análisis del Carbón, Transporte del carbón*

## **ABSTRACT**

This work is aimed to formulate the aspects needed to make a diagnosis on caldrón's behavior regarding coal, its current consumption and its future in the Carbones de Sabaletas S.A. about its consumer companies on the subject of quality, management and use of the supplied coal. The coal was monitored from the loading at the mine to the arrival to every consumer company located in Antioquia's Department to measure coal properties variation. Favorable results for Carbones de Sabaletas S.A were obtained because coal does not go through important changes during transport, guaranteeing a good product quality.

**KEY WORDS:** *Coal, boilers, combustion system, coal analysis, coal transport*

## **1. INTRODUCCIÓN**

En Latinoamérica, Colombia es uno de los países con los mayores recursos y reservas de carbón bituminoso de excelentes calidades, por su poder calorífico, sus bajos contenidos de humedad, cenizas y azufre, que lo hace competitivo frente a otros mercados. Es tanto que la producción de carbón en el país ha tenido un crecimiento promedio anual del 8% en los últimos diez años [1].

El municipio de Titiribí, ubicado en la región Suroeste del Departamento de Antioquia, tiene como principal actividad económica la minería, y es allí donde se ubica La empresa Carbones de Sabaletas S.A proveedora de carbón a empresas, en su mayoría antioqueñas, del sector textilero. Estas empresas emplean el carbón tipo térmico en sus calderas, las cuales tienen unos requerimientos en propiedades adecuadas y de una buena calidad para su consumo.

El tamaño de las partículas es la característica que distingue los diferentes procesos de combustión de carbón y determinan en gran medida el fenómeno que controla la combustión y es el aspecto principal que se controla en el mercado; adicional a éste, otro problema que afecta el proceso de combustión es la humedad. Debido a estos dos aspectos mencionados se han presentado devoluciones del mineral.

En este artículo se presentan los resultados de los estudios acerca de la calidad del carbón de la empresa Carbones de Sabaleta S.A desde el proceso de extracción hasta la entrega con el propósito de satisfacer la demanda industrial. El estudio está basado principalmente en los problemas presentados en la empresa Carbones de Sabaletas S.A. para la entrega a sus consumidores de un carbón con calidad para los diferentes usos de este producto, teniendo en cuenta que el principal uso de este carbón es en sistemas de combustión, principalmente calderas.

### **1.1. EL CARBÓN**

El carbón es el combustible fósil más utilizado en la generación de vapor, por su amplia disponibilidad y bajo costo. Provee más de un cuarto de las necesidades energéticas del mundo, y sus reservas exceden a las disponibles para el gas y el petróleo.

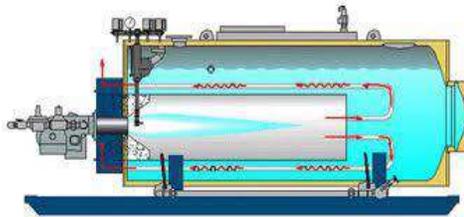
La clasificación más común es la establecida por la American Society of Testing Materials (ASTM), la cual se basa en el contenido de carbono fijo y el poder calorífico, calculado para una base libre de material mineral, los rangos del carbón van desde lignitos, que contienen 30% de carbono fijo, pasando luego a sub-bituminosos, posteriormente bituminosos y finalmente antracitas, que contiene alrededor de 92%.

Generalmente se utilizan dos tipos de análisis para el carbón: el análisis próximo y el análisis último. Para el manejo, interpretación y utilización de los carbones es necesario relacionar el análisis de un carbón a un estado o base determinada, libre de sustancias incombustibles [2]. Con estos análisis se evalúan las características físicas y químicas de los carbones.

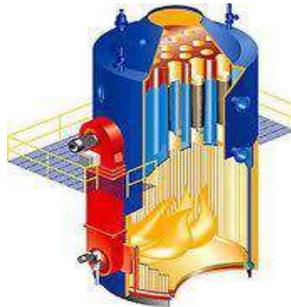
## 1.2. CALDERAS

Las calderas son equipos que se utilizan para generar vapor a partir de una fuente de calor. Toda caldera se compone de cinco partes principales: el hogar, el quemador, las zonas de circulación de los gases, las zonas de fluido térmico (agua) y la chimenea. Existen dos clasificaciones para las calderas: las calderas pirotubulares y las calderas acuotubulares.

En las primeras el gas caliente de la combustión circula a través del interior de los tubos sumergidos en el agua y en las acuotubulares el agua y el vapor circulan por el interior de los tubos, trasladándose por el exterior los gases calientes de la combustión. Las calderas pirotubulares (Figura 1) soportan presiones menores que las calderas acuotubulares (Figura 2) [3].



**Figura 1.** Caldera Pirotubular [4].



**Figura 2.** Caldera Acuotubular [5].

## 1.3. COMBUSTIÓN DE CARBONES

La combustión es el cambio químico de ciertos elementos de un combustible con el oxígeno del aire, controlada de tal manera que se genera energía térmica útil. Las principales propiedades de los carbones que se deben tener en cuenta para la combustión son el tamaño de las partículas, el porcentaje de azufre, y las cenizas [2]. El tamaño de las partículas es la característica que distingue los diferentes procesos de combustión de carbón. El azufre se debe conocer porque puede formar compuestos corrosivos en calderas tales como costras y escorias; forma gases venenosos que contaminan el ambiente. Las cenizas diluyen la fracción combustible del carbón; forman depósitos en las paredes de los hornos y normalmente cuando están en gran cantidad se deben extraer del carbón.

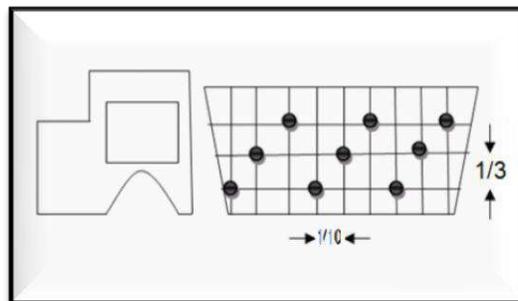
## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1. VISITAS A LAS EMPRESAS CONSUMIDORAS

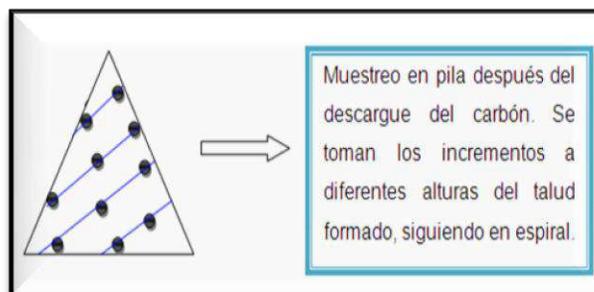
Las visitas fueron realizadas a las diferentes empresas consumidoras de la empresa Carbones de Sabaletas S.A. Para extraer la información se diseñó un formulario con el que se buscaba observar las necesidades de cada una de las empresas y sus procedimientos para la evaluación de la calidad del carbón.

### 2.2. MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Se realizaron dos seguimientos por empresa, en cada uno se tomaron muestras a la salida de la mina y en la empresa a la cual llegaba el carbón, siguiendo la norma ASTM 2234. A la salida de la mina se realizó en la volqueta durante el cargue del carbón para el control de calidad (Figura 3); se hizo un seguimiento en el transporte de la volqueta hasta llegar a la empresa consumidora donde fueron tomadas las muestras después del descargue del carbón, realizando el muestreo en pila (Figura 4).



**Figura 3.** Esquema del muestreo realizado con los incrementos mostrados en diferentes puntos de la volqueta.



**Figura 4.** Muestreo realizado con los incrementos mostrados en diferentes puntos de la pila realizada en el descargue de la volqueta.

En la etapa de muestreo se obtuvieron un total de 11 muestras: dos seguimientos para la EMPRESA 1 y en la EMPRESA 2 con un total de cuatro muestras cada una; en la EMPRESA 3 se realizó solamente un muestreo para un total de dos muestras, y para EMPRESA 4 se hizo un muestreo, realizado solamente a la salida de la mina, debido a que se encontró que era tipo ripio.

Las muestras fueron cuarteadas, una parte se llevó al laboratorio de Mineralurgia de la Universidad de Antioquia para sus respectivos análisis, fueron empacadas muy bien evitando pérdida de humedad superficial y se marcaron. Después de tener todas las muestras colectadas, fueron transportadas con especial cuidado, fuera de la mina al Laboratorio de Mineralurgia de la Universidad de Antioquia; una parte de la muestra fue dejada como muestra testigo.

### **2.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Las muestras fueron pesadas para el análisis granulométrico, posteriormente se realizó un tamizaje por vía seca. Los números de los tamices utilizados fueron: 2, 1 ½, 1, ¾, ½, ¼, 4, 6, 8, 10, 14, 16, 20, 35, 40, 50, 60, 80, 100, 140, 200 y fondo. Para esta prueba se siguió la norma ASTM D 4749/99 [9].

### **2.4. ANÁLISIS DE HUMEDAD SUPERFICIAL (ASTM D 3173)**

Una vez fueron llevadas las muestras al laboratorio, inicialmente se pesaron y luego fueron expuestas a temperatura ambiente por 24 horas, pasado este tiempo se pesaron nuevamente tal como lo indica la norma ASTM D 3173.

### **2.5. ANÁLISIS PRÓXIMOS**

Se partió de una muestra de 5 kg, obtenida de un cuarteo. La muestra se maceró en un mortero, nuevamente se cuarteó, para ser llevada a una molienda en un molino centrífugo de bolas s-1000 RETSCH, posteriormente se hizo pasar por una malla 60. Todos los análisis que incluyen el análisis próximo -se aclara que no se presentan los resultados de materia volátil-, se realizaron por duplicado.

#### **2.5.1. Análisis Humedad Residual (ASTM D3173)**

Se tomó un gramo de muestra para este análisis y fue vertido en una capsula de porcelana, seguidamente se llevó al horno Lindberg previamente precalentado a una temperatura de  $107 \pm$

3°C durante una hora, después de transcurrido este tiempo se pesó y se procedió a calcular la humedad residual con la Ecuación 1.

$$\%HUMEDAD\ RESIDUAL = \frac{(a-b)}{a} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde: **a** Son los gramos usados y **b** los gramos de muestra después del calentamiento.

### **2.5.2. Análisis Humedad Total (ASTM D 3302)**

Esta humedad se obtuvo del resultado de la suma de la humedad superficial y la humedad residual.

### **2.5.3. Análisis Cenizas (ASTM D3174)**

Se pesó un gramo de las muestras preparadas previamente, en una capsula de porcelana vacía, y fue llevada al horno a temperatura ambiente, realizando rampas de calentamiento, en la primera rampa se aumentó la temperatura hasta 500 °C por un tiempo de 1 hora, pasado este tiempo se aumentó desde la temperatura de 500 °C hasta 750 °C por una hora, en esta temperatura se sostuvo la muestra durante por dos horas y se pesó. Finalmente con estos resultados y con la Ecuación 2, se calculó el porcentaje de ceniza.

$$\%CENIZAS = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde: **a** es el peso de la cápsula con el residuo, **b** es el peso de la cápsula vacía y **c** el peso de la muestra utilizado.

### **2.5.4. Poder Calorífico (Norma D5865)**

Los análisis de poder calorífico fueron realizados en el Centro del Carbón la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Este análisis se realizó a las muestras de la EMPRESA 1, EMPRESA 2, EMPRESA 3 y EMPRESA 4.

## **2.6. ANÁLISIS ÚLTIMO**

Las muestras se analizaron por triplicado en un equipo de análisis elemental marca LECO modelo TruSpec Micro. Este análisis fue realizado en el grupo de investigación QUIREMA de la Universidad de Antioquia. Al igual que en el poder calorífico, sólo se le realizó a 4 muestras.

## 2.7. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE LAS CENIZAS DE EMPRESA 2

Este análisis se realizó al residuo del análisis de porcentaje de cenizas obtenido en el laboratorio, a las cenizas y la escoria obtenidas en la EMPRESA 2. Se realizó en la Universidad de Antioquia en el Laboratorio de Fundición del Departamento de Ingeniería de Materiales, con el equipo ARL OPTIM`X WDXRF Spectrometer.

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

### 3.1. Empresas consumidoras del carbón de la Empresa Carbones de Sabaletas S.A.

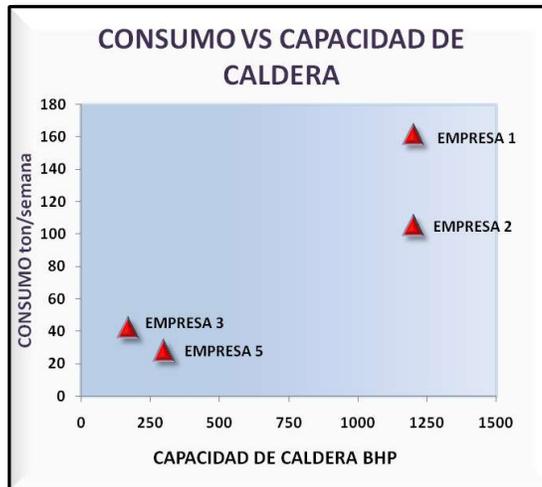
Carbones de Sabaletas S.A suministra carbón a las empresas que se mencionan a continuación (no se coloca el nombre para conservar la reserva de información), de acuerdo a la disponibilidad en producción y a las especificaciones técnicas de los consumidores, según características granulométricas (ver Tabla 1).

Empresa	Consumo de carbón (ton/semana)	Granulometría de carbón
EMPRESA 1	200	Almendra
EMPRESA 2	15	Almendra
EMPRESA 3	36	Granulado
EMPRESA 4	1500-2000	Ripio
EMPRESA 5	15	Almendra

**Tabla 1.** Datos del consumo de las empresas consumidoras del carbón de Carbones de Sabaletas. Ripio: Menor de 3/8", Almendra: Entre 3/8" y 1", Granulado: Entre 1" y 2".

### 3.2. Tendencias de consumo en cuanto a tamaño en plantas de las empresas consumidoras

La calidad del carbón y forma de alimentación juegan un papel muy importante en el consumo y el buen funcionamiento de la caldera, es de notar que el tamaño y la producción en cada empresa son un factor determinante en el consumo del carbón. Entre más capacidad tiene la caldera mayor es el consumo, pero puede ser controlada con la alimentación (Figura 5).



**Figura 5.** Consumo en ton/ día Vs capacidad de la caldera en BHP de las empresas consumidoras de Carbones de Sabaletas S.A.

Es de apreciar que en la Empresa 3 se tiene la caldera de menor tamaño y de un tipo de caldera diferente a las otras empresas consumidoras y con una eficiencia menor ya que el carbón que ingresa a la caldera no es en su totalidad consumido y tiene una producción de escorias como se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6.** Fotografía tomada a la escoria producida en la EMPRESA 3.

### **3.3. Comportamiento de las calderas respecto al carbón de la Empresa Carbones de Sabaletas S.A.**

El proceso de clasificación por tamaños, no es llevado a cabo en ninguna empresa consumidora de Carbones de Sabaletas S.A, lo único que se le realiza al carbón en estas empresas es una revisión visual de éste; aunque en la EMPRESA 1, EMPRESA 2 y EMPRESA 3 realizan análisis próximos periódicamente al carbón de Carbones de Sabaletas S.A; evalúan las características físicas y químicas del carbón y con ello pueden prevenir problemas en el manejo y tratamiento, reducir daños en los equipos y determinar los tipos de carbón que se adapten mejor a la necesidad; aunque se evidencia que es realizado sin un muestreo adecuado.

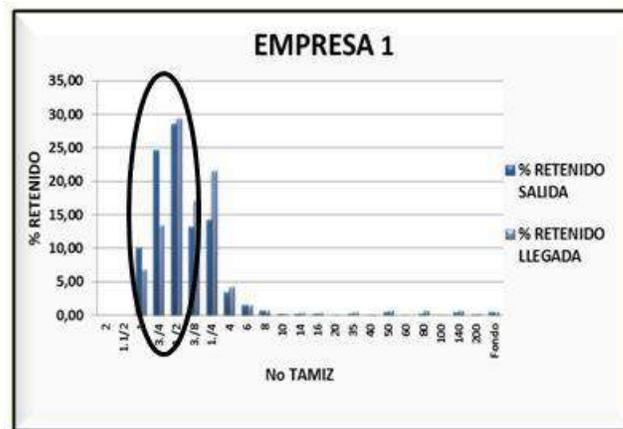
En algunos casos el carbón es transportado por un tornillo, también hay empresas en las que la alimentación es manual o automáticamente, pero controlada por el calderista de lo que puede depender de una buena experiencia para el buen funcionamiento de la caldera en especial en la EMPRESA 3 por falta de aireación y de eliminación de cenizas durante el proceso. El problema en todas las calderas, según las encuestas realizadas en las empresas consumidoras, es la calidad del carbón y la cantidad de rocas estériles.

### 3.4. ANÁLISIS DE LABORATORIO

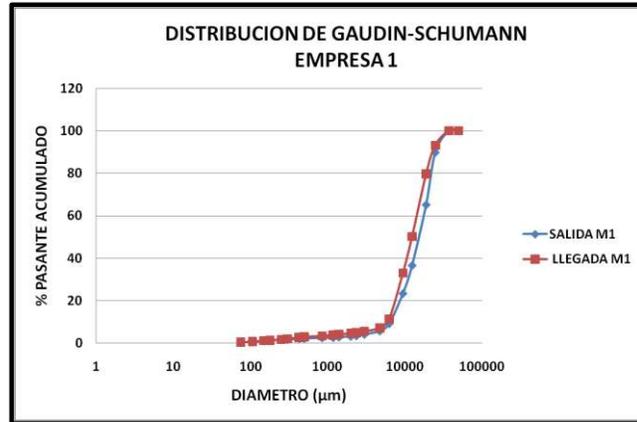
#### 3.4.1. Análisis granulométrico

##### 3.4.1.1. Empresa 1

En la Figura 7, se puede notar una disminución en el tamaño de grano de la muestra que es enviada de la empresa Carbones de Sabaletas S.A. a EMPRESA 1. Este cambio es atribuido al transporte, aunque no es tan significativa como se esperaba y sigue manteniendo un porcentaje alto de carbón con los requerimientos de la empresa. Todo esto se puede comprobar en cada figura, en lo que tiene que ver con el análisis hecho a la salida de la mina y a la llegada de la empresa, pues se encontró un  $D_{80}$  para la muestra 1 Figura 8 de 22638,05  $\mu\text{m}$  y 19153,53  $\mu\text{m}$  para la salida M1 y llegada M1 respectivamente. De lo anterior se deduce que en los seguimientos, el  $D_{80}$  está entre el mismo intervalo de mallas es decir entre la malla 1" y la 3/4".



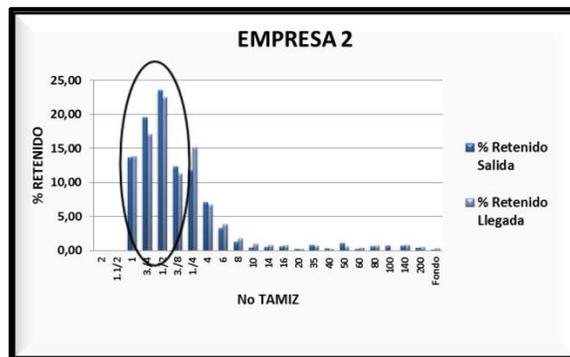
**Figura 7.** Resultado granulométrico de la EMPRESA 1 de la muestra 1 del % Retenido Vs. el Número de Tamiz.



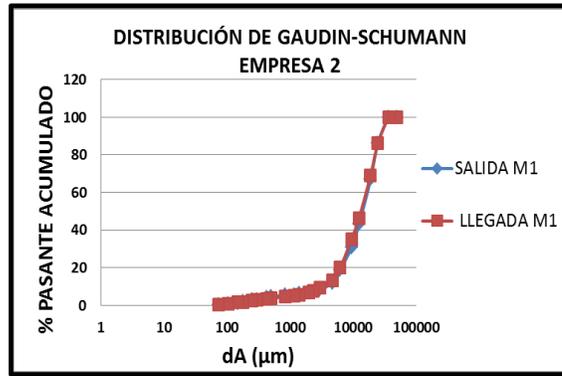
**Figura 8.** Distribución granulométrica de Gaudin-Schumann de la EMPRESA 1 de la Muestra 1 del % Acumulado Vs. tamaño de partícula.

### 3.4.1.2. Empresa 2

En la Figura 9, que corresponde al muestreo realizado para la EMPRESA 2, se observan cambios leves en la granulometría y el mayor porcentaje de material en el intervalo requerido está retenido en la malla 1/2. También se encontró un  $D_{80}$  de 23060 y 22835  $\mu\text{m}$  para la salida M1 y llegada M1 respectivamente, deduciendo que en las dos muestras el 80% de las partículas de carbón es inferior a estos tamaños ubicados entre la malla 1" y 3/4" (ver Figura 10).



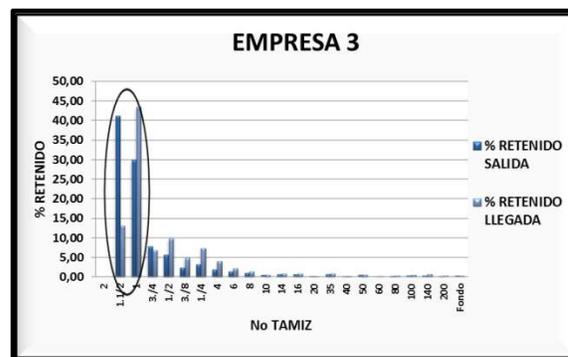
**Figura 9.** Resultado granulométrico de la EMPRESA 2 de la muestra 1 del % Retenido Vs. el Número de Tamiz.



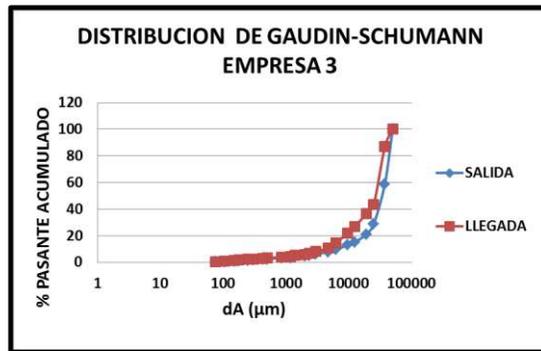
**Figura 10.** Distribución granulométrica de Gaudin-Schumann de la EMPRESA 2 de la muestra 1 del % Acumulado Vs. tamaño de partícula.

### 3.4.1.3. Empresa 3

Las Figuras 11 y 12 presentan análisis realizados para la EMPRESA 3 los cuales muestran una reducción alta del retenido en la malla 1 ½” a la malla 1”. El cambio observado no es muy importante debido a que este tamaño sigue estando en el tamaño pedido por la empresa. En la Figura 12 se encontró un  $D_{80}$  de 35751,06 y 29521,58  $\mu\text{m}$  para la salida y llegada respectivamente indicando que el 80% del carbón se encontraba por debajo de estos tamaños y que están entre la malla 1 ½” y 1”.



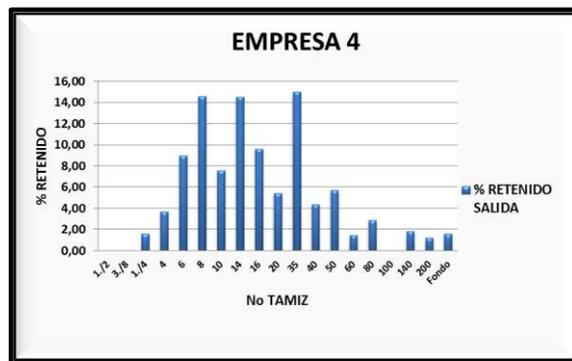
**Figura 11.** Resultado granulométrico de la EMPRESA 3 de la muestra 1 del % Retenido Vs. el Número de Tamiz.



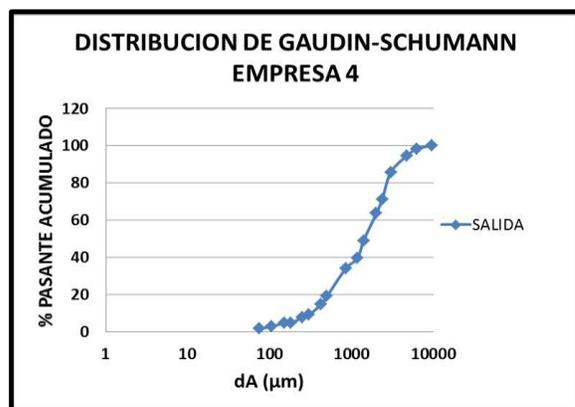
**Figura 12.** Distribución granulométrica de Gaudin-Schumann de la EMPRESA 3 de la muestra 1 del % Acumulado Vs. tamaño de partícula.

### 3.4.1.4. Empresa 4

Los resultados arrojados del análisis realizados al carbón para la EMPRESA 4 muestran una adecuado despacho desde la empresa ya que ellos requieren de ripio sin importar tamaño alguno, mostrando un  $D_{80}$  de 3822,51  $\mu\text{m}$  por debajo de la malla 4 (Figura 13 y 14).



**Figura 13.** Resultado granulométrico de la EMPRESA 4 de la muestra 1 del % Retenido Vs. el Número de Tamiz.



**Figura 14.** Distribución granulométrica de Gaudin-Schumann de la EMPRESA 4 de la muestra 1 del % Acumulado Vs. tamaño de partícula.

En general, el cambio en la granulometría debido al transporte del material desde la mina a las empresas consumidoras, no fue tan significativo como se esperaba según la respuesta a la encuesta en las empresas consumidoras. Se recomienda a la empresa Carbones de Sabaletas S.A. despachar un tamaño de carbón apropiado, preferiblemente con una granulometría levemente mayor en el D80, por si se presentan reducciones por el transporte no se afecte y así obtener el tamaño que es requerido por cada empresa.

### 3.4.2. Humedad superficial

En la Tabla 2 se encuentran los resultados obtenidos del análisis de este tipo de humedad, se encontró una variación muy leve en el seguimiento.

Identificación de la muestras de carbón	% HS-M	% HS-E
EMPRESA 1 M1	2,01	1,49
EMPRESA 1 M2	1,60	1,50
EMPRESA 2 M1	1,60	1,64
EMPRESA 2 M2	1,30	1,63
EMPRESA 3 M1	0,68	0,85

**Tabla 2.** Resultados del análisis de humedad, siendo: HS humedad superficial, M en la salida de la mina y E en la empresa consumidora.

El porcentaje de humedad superficial no depende del medio de transporte, esta humedad es más afectada por el clima ya que se encontró que los días que estaban más lluviosos, fueron los que dieron un mayor porcentaje de humedad superficial.

### 3.4.3. Análisis Próximo

#### 3.4.3.1. Humedad Residual

Al igual que en la humedad superficial no es apreciable la diferencia entre los resultados de la humedad tomada al carbón de la salida de la mina y al de la llegada de la empresa consumidora (Tabla 3).

<b>Identificación de la muestras de carbón</b>	<b>%HR-M</b>	<b>% HR-E</b>
EMPRESA 1 M1	7,93	8,85
EMPRESA 1 M2	8,84	8,60
EMPRESA 2 M1	7,68	6,82
EMPRESA 2 M2	7,59	7,43
EMPRESA 3 M1	7,50	6,62

**Tabla 3.** Resultados del análisis de humedad, siendo: HR humedad residual, M en la salida de la mina y E en la empresa consumidora.

#### 3.4.3.2. Humedad Total

Como la variación en la humedad Superficial y Residual son tan pocas por ende la variación en la Humedad Total de las muestras tomadas en la mina y en la empresa consumidora es poca, Tabla 4.

<b>Identificación de la muestras de carbón</b>	<b>%HT-M</b>	<b>%HT-E</b>
EMPRESA 1 M1	9,40	10,34
EMPRESA 1 M2	10,44	10,1
EMPRESA 2 M1	9,28	8,46
EMPRESA 2 M2	8,89	9,06
EMPRESA 3 M1	8,18	7,47

**Tabla 4.** Resultados del análisis de humedad, siendo: HT Humedad Total, M en la salida de la mina y E en la empresa consumidora.

### 3.4.3.3. Cenizas

Los resultados del porcentaje de ceniza son relativamente altos (Tabla 5), pero se mantiene en un rango aceptable para los carbones para la zona de Titiribí, según diferentes estudios, desde 5,30 % - 15,1% [10], se exceptúa el obtenido para el carbón ripio de la EMPRESA 4; por lo que no se considera que varió tanto en la salida como en la llegada; demostrándose que el transporte no tiene una influencia directa; un valor alto en cenizas estará relacionado con el método de explotación minera.

<b>Identificación de la muestras de carbón</b>	<b>% cenizas M</b>	<b>% Cenizas E</b>
EMPRESA1 M1	16,26	13,98
EMPRESA1 M2	12,51	14,03
EMPRESA2 M1	8,08	12,64
EMPRESA2 M2	11,43	9,89
EMPRESA3	9,16	9,23
EMPRESA4	21,04	

**Tabla 5.** Resultado del análisis de cenizas (% en peso). M en la salida de la mina y E en la empresa consumidora.

### 3.4.3.4. Poder calorífico

Los resultados obtenidos del poder calorífico muestran que están dentro del rango del poder calorífico que se considera para la zona de Titiribí estando entre 9957 y 13009 BTU/LB, exceptuando la muestra del ripio de EMPRESA 4, el que se puede ver afectado por el alto porcentaje de cenizas como muestran los resultados en la Tabla 6 [11 y 12].

<b>Identificación de la muestras de carbón</b>	<b>P.C(BTU/LB)</b>
EMPRESA 1	9526,5
EMPRESA 2	10256,8
EMPRESA 3	10218,9
EMPRESA 4	7830,2

**Tabla 6.** Resultado del poder calorífico (P.C).

### 3.4.4. Análisis Último

El % en peso de carbono presenta valores contemplados dentro del rango obtenido en los análisis realizados para la Zona de Titiribí que está entre 38,30% y 53,02 % en peso de carbono [10].

En el resultado del análisis elemental (Tabla 7), se muestra un bajo contenido de azufre que permite una buena evaluación del carbón utilizado, en este caso para la combustión, permitiendo una mejora en la eficiencia de la caldera. Pero se tiene que considerar que el azufre es una de las impurezas más preocupantes y problemáticas en la combustión por la formación de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, compuestos corrosivos para la caldera, y que acelera significativamente la oxidación del carbón apilado, reduciendo la posibilidad de almacenar carbón durante tiempos largos.

Es bueno considerar la carencia de nitrógeno, ya que no se presentarán emisiones de NO<sub>x</sub> en el proceso de gasificación.

MUESTRA	RESULTADOS				
	Porcentaje en peso				
	N	C	H	S	O
EMPRESA 4	0	45	4,7	0,6	49,6
EMPRESA 1	0	57,8	5,3	0,6	36,2
EMPRESA 2	0	53,9	5,2	0,6	40,14
EMPRESA 3	0	58	5,4	0,6	35,84

**Tabla 7.** Resultado del análisis último (% por peso).

Esta prueba arroja valores de los porcentajes totales de Carbono e Hidrógeno en el carbón, incluyendo el carbono en los carbonatos y los de hidrógeno en la humedad libre y en el agua de hidratación de los silicatos.

### 3.4.5. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de las cenizas de la Empresa 2.

En la Tabla 8, se encuentra los resultados de los análisis de fluorescencia, los cuales muestran que para la escoria de la EMPRESA 2 se presenta un porcentaje en peso mayor de óxido de sílice y óxido de alúmina, seguido del obtenido en las cenizas del laboratorio y con un menor porcentaje las cenizas de la EMPRESA 2.

El óxido de calcio, el óxido de hierro, el óxido de magnesio, óxido de bario, óxido de vanadio, óxido de zinc, óxido de estroncio y óxido de manganeso se presentan con un contenido más alto en las cenizas de la empresa, seguido con una cantidad menor por las cenizas del laboratorio y por la escoria de la empresa.

Las cenizas obtenidas en la empresa tienen un porcentaje mayor de óxido de titanio, óxido de sodio, óxido de níquel, y óxido de plomo, que los encontrados para las otras dos muestras tenidas en cuenta en el análisis de fluorescencia. Las cenizas obtenidas en el laboratorio y en la empresa presentan más óxido de azufre que el contenido en las escorias.

Compuesto	Porcentaje en peso		
	Muestra insitu de ceniza de la caldera en la empresa	Cenizas del laboratorio de la muestra tomada en la pila de descargue	Escoria de la empresa
SiO <sub>2</sub>	32,14	38,65	50,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,21	32,47	36,45
CaO	12,22	5,99	2,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,94	8,07	5,11
SO <sub>3</sub>	8,72	9,05	0,603
K <sub>2</sub> O	1,37	1,18	1,41
MgO	2,6	2,33	0,991
TiO <sub>2</sub>	1,42	1,15	1,39
Na <sub>2</sub> O	0,91	0,32	-
BaO	0,60	0,33	0,17
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,16	0,12
NiO	0,15	0,04	0,05
ZnO	0,13	0,04	-
CuO	0,09	0,06	0,14
SrO	0,07	0,02	0,02
MnO	0,027	0,026	0,02
PbO	0,01	0,004	-

**Tabla 8.** Resultados del análisis químico realizado a las muestras de la Empresa 2.

Se debe tener en cuenta que la presencia de Si, Fe ó Al, en altas concentraciones con Mn en concentración baja y que según la literatura estos elementos pueden ser causantes de la formación de óxidos ácidos en combinación con los componentes alcalinos de las formas sintéticas de los depósitos de las cenizas [12].

#### **4. CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos mediante análisis próximo; humedad residual, % de cenizas, carbono fijo y poder calorífico, no varían significativamente durante el transporte desde la mina hasta la empresa consumidora del carbón de la empresa Carbones de Sabaletas; éstos se mantienen estables. En lo que si se tiene que poner mayor cuidado en la granulometría, que es la que podría variar, debido a la degradación en tamaño del carbón considerado como material frágil; aunque para este estudio, se encontró que no fue tan significativo el cambio.

Los análisis últimos ofrecen unos porcentajes bajos de azufre, hidrógeno y nula de nitrógeno, lo que indica que el proceso de combustión en las calderas no emitirá compuestos nocivos de estos elementos al medio ambiente.

Las empresas consumidoras del carbón de Carbones de Sabaletas S.A tienden a mantenerse en el mercado en cuanto al volumen y requerimiento granulométrico, bajo unas exigencias de mejor calidad en el carbón con respecto a la uniformidad granulométrica, y mejores prácticas en el cumplimiento del suministro de carbón, lo cual permitiría una mayor credibilidad de las empresas que dependen de Carbones de Sabaletas.

La interacción Empresa-Consumidores es de gran importancia mantenerla, porque a las empresas consumidoras les gusta ver a sus proveedores comprometidos con ellas, observando cuáles son las dificultades que tienen en el uso del producto suministrado.

#### **5. RECOMENDACIONES**

Carbones de Sabaletas deberá gestionar un mayor acompañamiento a la EMPRESA 3, debido a que son los únicos que consumen una granulometría diferente, tiene un problema de escorias que no han sido registrados en otras calderas y la posible presencia de inquemados, lo que demuestra una ineficiencia en la caldera.

Tanto el estado como el diseño de la caldera pueden ser los causantes del rendimiento de la esta misma por lo que recomienda que en los futuros proyectos, se enfoque a un análisis general de la operación de las empresas consumidoras, llevar un control del carbón que llega de Carbones de Sabaletas para plantear estrategias que puedan conducir a mayor eficiencia y que este análisis permita direccionar el Planteamiento Minero que debe diseñar Carbones de Sabaletas.

Al igual que muchas industrias del mundo se debe buscar una vía alternativa para el uso de las cenizas ya que es un problema muy grande ambientalmente, y en los resultados obtenidos las cenizas no contienen elementos dañinos ni pesados lo que facilita su utilización en diversos procesos industriales.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al Comité de Desarrollo de la Investigación (CODI) por la Financiación del Trabajo de Grado (PR10-2-01), mediante el Fondo de Apoyo para Trabajos de Grado.

A la empresa Carbones Sabaletas S.A y a las empresas consumidoras de su carbón.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Londoño, A. J. “Mundo Eléctrico Colombiano. El carbón: un combustible con futuro”. Vol. 16, No. 47, p. 46, Abr.-Jun. 2002.

[2] “Calderas a Carbón ECOCARBON”, Gerencia para el desarrollo de la industria del carbón, División Promoción de Mercados. Medellín-Colombia, p. 136, 1998.

[3] “Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones”. ECOCARBÓN Cuadernillo No. 1. Gerencia de planificación de carbón, división análisis de reservas. Santafé de Bogotá D.C, p. 140, 1995.

[4] <http://www.juandutari.htmlplanet.com/photo.html>. Año de consulta 2011.

[5] <http://www.nauticexpo.es/tab/caldera-acuotubular.html>. Año de consulta 2011.

[6] Mastrángelo, S. Boletín Energético N° 10, Conceptos de generación termoeléctrica: combustibles utilizados e impactos ambientales, Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA). Primera parte.

[7] Zapata, C. E. “Guía metodológica para la caracterización y evaluación de la calidad de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos”. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín Facultad de Minas. p. 126, 2006.

[8] Omil, I. B. “Gestión de cenizas como fertilizantes y enmendantes de plantaciones jóvenes”. Tesis de doutoramento, escuela politécnica Superior, Santiago de Compostela, Galicia (España), 2007.

[9] Speight, J. G., Handbook of Coal Analysis, wiley- interscience, John Wiley & Sons, INC., New Jersey, 2005.

[10] Carrascal, V. C., Trabajo de grado: Estudio de la calidad de carbón en las diferentes etapas del proceso de la Empresa Carbones Sabaletas S.A, Medellín, Colombia, Universidad de Antioquia, 87 p. 2010.

[11] [http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis\\_proximos.htm#Azufre](http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm#Azufre). Año de consulta: 2010.

[12] <http://www.catamutun.com/produc/carbon/pro.html>. Año de consulta: 2010.