

Estudio de la combustión de carbones beneficiados provenientes de intercalaciones de las minas de la Jagua de Ibirico-Cesar mediante análisis termogravimétrico

Marley Vanegas Chamorro*, Richelieu Barranco Meléndez**, G. Castellanos, C. Navarro***

**Maestría en Ingeniería Química. Docente Grupo de Investigación del Carbón, GIC. Universidad del Atlántico. marleyvanegas@yahoo.com*

*** Profesor Investigador Grupo de Investigación de Combustibles y Energía. Universidad de Nottingham, Inglaterra*

**** Auxiliares de Investigación, Grupo de Investigación del Carbón, GIC. Universidad del Atlántico*

RESUMEN

El estudio de la combustión de carbón mezclado con material inerte proveniente de intercalaciones de la Jagua de Ibirico-Cesar se realizó en un analizador termogravimétrico bajo condiciones isotérmicas y no-isotérmicas. Se evaluaron los efectos de la reducción de tamaño de partícula y de la separación gravimétrica sobre la composición petrográfica, las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento durante la combustión. Se encontró que los procesos de reducción de tamaño y tamizado produjeron fraccionamiento de los macerales y separación de la materia inorgánica. En general, las fracciones de menor tamaño presentaron los mayores contenidos de cenizas, mientras que las fracciones de mayor tamaño reportaron los mayores contenidos de volátiles y carbono fijo. Con relación a la separación gravimétrica, en general, a menor densidad menor contenido de ceniza y mayor contenido de volátiles y carbono fijo. En cuanto al efecto de estas variables sobre el proceso de combustión, se encontró que, en general, el incremento del tamaño de partícula produce un incremento en la energía de activación y en las temperaturas pico y final de quemado. Por otro lado, la velocidad de pérdida de peso se incrementó al disminuir la densidad de las muestras.

Palabras clave: combustión, análisis termogravimétrico, separación gravimétrica, reactividad, energía de activación.

ABSTRACT

The combustion study of coal mixed with matter inert from Jagua de Ibirico (Cesar) was carried out in a thermogravimetric analyzer under conditions isothermic and no-isothermic. It evaluated the effects of reduction size and the gravimetric separation on the petrography composition, the properties physic-chemicals and the behavior during the combustion. It fended that the reduction size and sieving process produced a breaking of the macerales, separation of the organic and inorganic matter. In general, the fraction of minor size report the major content of ash, while that the fractions the major size report the major content of volatile matter and fixed carbon. About the gravimetric separation, in general, to minor density minor content of ash and major content of volatile matter and fixed carbon. About this variables effects on the combustion process it fended that, in general, the increment of particle size produce an increment in the activation energy and the peack temperature and burnout temperature, while that the gravimetric separation produced velocities of lost weight that are major to minor density.

Palabras claves: combustion, thermogravimetric analysis, gravimetric separation, reactivity, activation energy.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de materia mineral en el carbón térmico es responsable de inconvenientes, tanto a nivel operacional como ambiental en los procesos de transformación del carbón [6,9,10]. La combustión del carbón ha sido, por muchos años, una de las principales fuentes de generación de energía. El carbón es, sin embargo, un material sólido heterogéneo y muy complejo que varía ampliamente en sus propiedades químicas y físicas de manera que su comportamiento durante la combustión puede cambiar significativamente. Por tanto, la correcta selección y análisis del carbón para asegurar una excelente eficiencia en la operación de las plantas térmicas es crucial. En aquellas plantas donde se emplean carbones de diferentes fuentes, este proceso puede llegar a ser muy complejo.

Análogo a los minerales presentes en el carbón se encuentran los macerales, que son los componentes orgánicos. A través de ellos se puede analizar el comportamiento del carbón en cuanto a reactividad se refiere, razón por la cual el estudio de este tema es fundamental cuando hablamos de procesos de transformación.

El presente proyecto tuvo como objeto principal estudiar mediante una técnica alternativa y de alta confiabilidad como lo es el análisis termogravimétrico, la combustión de carbones beneficiados. Las técnicas de beneficio empleadas incluyen: reducción de tamaño de partícula, tamizado y separación gravimétrica. Cabe destacar que estas muestras provienen de las intercalaciones entre mantos de carbón y por lo tanto su contenido de materia mineral y/o inertes es muy elevado.

2. MARCO TEÓRICO

El carbón es una roca orgánica sedimentaria de estructura compleja. Al clasificar el carbón a través de su rango se ignora ampliamente su compleja naturaleza. La petrografía es una técnica alternativa de clasificación que tiene en cuenta la composición del carbón como material rocoso. Esta clasificación se basa en observaciones visuales de la luz transmitida a través de delgadas secciones de carbón.

La clasificación petrográfica moderna está relacionada con la separación del carbón en sus componentes microscópico de acuerdo con su color y consistencia. A estos constituyentes fundamentales del carbón se les conoce como macerales. Existen tres tipos de macerales: Vitrinita, Liptinita e Inertinita. La Vitrinita es el principal constituyente del carbón (60-90% en peso) y se originó a partir del tejido leñoso de materia vegetal. La Liptinita es la fracción rica en hidrógeno en la estructura del carbón, se formó a partir de las algas y de diferentes partes de las plantas (esporas, las cutículas y las resinas). La Inertinita es de forma granular compuesta

por vegetal altamente deteriorado y por material carbonoso oxidado, el cual posteriormente fue fosilizado [3,4]. El contenido de carbono (%C en peso) en los macerales se incrementa en el orden: Liptinita, Vitrinita, Inertinita. Mientras la relación H/C disminuye en el mismo orden. Sin embargo, tales diferencias son menos notables para carbones de alto rango. Uno de los principales factores inherentes a la naturaleza de cada carbón que afectan los procesos de transformación del carbón son los macerales y es una de las variables importantes que se manejaron en este proyecto.

La combustión del carbón es un proceso complejo influenciado por variables tales como el tipo de carbón, el tamaño de partícula, velocidad de calentamiento, temperatura de reacción, entre otros. No obstante, se cree que el proceso de combustión consta de una etapa inicial que implica la pirólisis, la combustión de volátiles y una etapa posterior que involucra la gasificación del residuo sólido carbonoso o *char*.

Las reacciones de pirólisis implican la descomposición térmica del material a elevadas temperaturas, durante la cual la estructura macromolecular del carbón se fractura generando radicales libres que al estabilizarse forman especies hidrocarbonadas de bajo peso molecular, que posteriormente son liberados de la partícula de carbón como materia volátil [3,7,8,14].

La combustión de volátiles se considera que aporta entre el 70-80% del calor total liberado durante el proceso de transformación. Ésta comprende reacciones homogéneas gas/gas y heterogéneas líquido/gas; se cree que ésta ocurre en una película alrededor de la partícula de carbón, siendo muy poca la oxidación del residuo sólido carbonoso o *char*[7].

Posterior a la pirólisis y a la combustión de volátiles, continúa el proceso más lento de la combustión del carbón; la oxidación del *char*. Se cree que la velocidad de oxidación está controlada por limitaciones de cinética química o de transferencia de masa o combinación de ambas, dependiendo de la temperatura bajo la cual ocurre la reacción, del tamaño de partícula y la porosidad de la partícula. A pesar de la extensa investigación en torno a la oxidación del *char*, la reacción *char*-oxígeno no es del todo comprendida debido a la compleja naturaleza de la superficie de reacción y a la interrelación de factores que afectan la combustión.[3,7].

3. METODOLOGÍA

3.1 Preparación de las muestras y caracterización

Dos muestras de carbón bituminoso de La Jagua de Ibirico-Cesar, Herminia manto 45 (H) e Intercalación mantos 35-40 (I), se seleccionaron para este estudio debido a su alto contenido de materia mineral. En la Ta-

bla 1 se observan las caracterizaciones para cada uno de los carbones en estudio.

Tabla 1. Caracterización de las muestras seleccionadas para estudio [12]

Muestras	Análisis próximo de las muestras				Azufre % p/p	PC BTU/mol
	% H*	%MV	%CF	%C _Z		
I	2,4	25,2	28,2	37,6	1,2	8354,2
H	2,3	22,1	26,3	43,6	1,2	7142,2

(%H*: contenido de humedad, %MV: contenido de volátiles, %CF: contenido de carbono fijo, %C_Z: contenido de ceniza, %p/p: porcentaje en peso, PC: poder calorífico).

Las muestras se sometieron a procesos de trituración y tamizado para obtener tamaños de partícula de 71-177µm y 177-300µm.

El proceso de separación gravimétrica mediante el estándar británico BS 7067, se llevó a cabo usando como medio de separación soluciones de cloruro de zinc con gravedades específicas de 1.5, 1.6 y 1.8, obteniéndose para cada fracción de tamaño de partícula los flotados (F1.5, F1.6 y F1.8) y hundidos (H1.8).

Posterior a los procesos de beneficio, se realizaron las caracterizaciones para determinar humedad, volátiles, ceniza y carbono fijo a través de un analizador termogravimétrico TGA, composición petrográfica y reflectancia de la vitrinita de acuerdo con el estándar británico BS 6127-3,5.

3.2 Análisis y combustión en el TGA

Para realizar los dos procesos mencionados a continuación se utilizó un analizador termogravimétrico PerkinElmer Pyris 1.

- *Proceso isotérmico*

Para este análisis se obtuvo el perfil de combustión del porcentaje de pérdida de peso contra tiempo utilizando un analizador termogravimétrico (TGA). Se determinaron los contenidos de humedad, volátiles, carbono fijo y ceniza a través del análisis termogravimétrico isotérmico a 600 y 800°C, usando una muestra de 10±0.5 mg de cada carbón, los resultados se presentan en las Tablas 2a y 2b. Inicialmente se calentó la muestra en atmósfera inerte de nitrógeno hasta la temperatura deseada. Al alcanzar esta temperatura, se cambió a atmósfera de aire. Ambas etapas se realizaron con una velocidad de calentamiento de 50°Cmin⁻¹ y un flujo gas de 30cm³min⁻¹.

Tabla 2a. Análisis próximo a 600°C

DP(µm)	%H*	%V	%CF	%CZ
I71-177	2.60	20.90	35.7	40.80
I177-300	2.73	23.00	37.0	37.24
H71-177	2.71	19.80	34.3	43.16
H177-300	2.77	22.30	41.5	33.44

Tabla 2b. Análisis próximo a 800°C

DP(µm)	%H*	%V	%CF	%CZ
I71-177	2.62	24.60	33.3	39.45
I177-300	2.70	26.50	33.4	37.41
H71-177	3.13	24.00	30.7	42.09
H177-300	2.89	26.50	39.8	30.80

Para el análisis del efecto del tamaño de partícula y de la separación gravimétrica sobre las características de combustión de los carbones estudiados, se realizaron gráficas y tabulaciones registradas a través de una hoja de cálculo. El objetivo de esto fue establecer las tendencias que siguen: los grupos macerales, volátiles, ceniza, carbono fijo, temperaturas características de los perfiles de combustión, máxima velocidad de pérdida de peso y parámetros cinéticos y de reactividad, como consecuencia del efecto de estas variables.

Para este proceso se determinaron los parámetros cinéticos (constante de velocidad k, orden de reacción n, y energía de activación E_a). Para ello se asumió que la cinética de reacción se rige por la ecuación [1,5,9]:

$$-\frac{dm}{dt} = km^n \quad (1)$$

Donde:

k = Constante de velocidad y es igual a: $k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$
 m = pérdida de peso proceso isotérmico
 n = Orden de reacción
 E_a = Energía de activación

Se determinó el orden de reacción iterando n entre 0 y 3 para conseguir el mejor comportamiento lineal con pendiente (n-1)k. Se halló k, para luego determinar E_a mediante la ecuación:

$$E\alpha = \frac{\ln(k_{@800^\circ\text{C}}/k_{@600^\circ\text{C}})(T_{1073k}T_{873k})R}{T_{1073k} - T_{873k}} \quad (2)$$

Para resolver esta ecuación se asumió que k₀ y E_a no varían ampliamente en el rango de temperaturas empleado.

• *Proceso no-isotérmico*

Los perfiles de combustión DTG se obtuvieron a 800°C, calentando la muestra desde temperatura ambiente hasta 300°C con una velocidad de calentamiento de 50°Cmin⁻¹ y un flujo de aire de 30cm³min⁻¹. Luego se disminuyó la velocidad de calentamiento a 10°Cmin⁻¹ hasta alcanzar los 800°C. A través de los perfiles de combustión DTG mostrados en la Figura 1, se obtuvieron las temperaturas características tales como: TI_{FC} la temperatura a la cual inicia el consumo de carbono fijo de la muestra, Temperatura Pico, TP, donde ocurre la máxima velocidad de pérdida de peso y temperatura final de quemado, TB, donde la velocidad de pérdida de peso es menor de 1%. La Tabla 3 presenta los valores de las temperaturas características de las diferentes fracciones de carbón beneficiadas de ambas muestras y su respectiva velocidad de pérdida de peso.

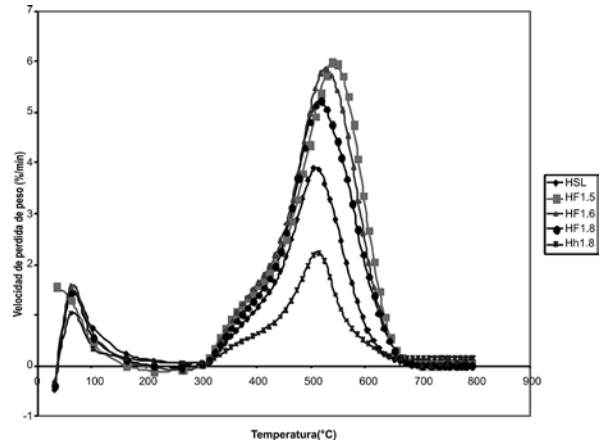


Figura 1c. Intercalación tamaño de partícula 71-177µm

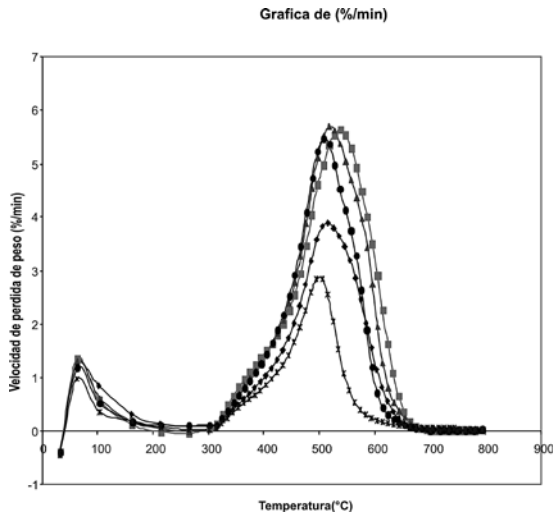


Figura 1. Perfiles de combustión no-isotérmica de los carbones I y H

Figura 1a. Intercalación tamaño de partícula 71-177µm

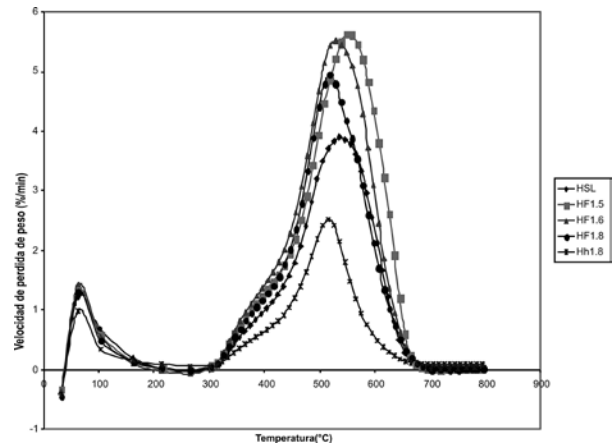


Figura 1d. Herminia tamaño de partícula 177-300µm

Para hallar la energía de activación de Arrhenius se asumió que el orden global de la reacción es n=1. Por consiguiente la ecuación cinética de la variación de la velocidad de pérdida de peso (dw/dt) con respecto al tiempo se expresaría de la siguiente manera:

$$-\frac{dw}{dt} = kw \quad (3)$$

Tabla 3. Temperaturas características

Dp (µm)		(dW/dt)max (%/min)	TI _{FC} (°C)	TP (°C)	TB (°C)
71-177	IF1.5	5.91	438.4	525.7	639.2
	IF1.6	5.96	438.4	518.2	629.8
	IF1.8	6.05	426.6	506.8	612.8
	Ih1.8	2.48	389.7	497.2	529.3
177-300	IF1.5	5.64	433.3	540.0	650.3
	IF1.6	5.70	433.3	520.4	629.5
	IF1.8	5.48	421.6	509.6	616.0
	Ih1.8	2.88	432.3	500.9	560.6
71-177	HF1.5	6.00	435.7	541.3	649.0
	HF1.6	5.85	435.9	527.4	652.3
	HF1.8	5.23	423.2	515.0	645.3
	Hh1.8	2.23	443.8	511.5	600.9

Figura 1b. Intercalación tamaño de partícula 177-300µm

177-300	HF1.5	5.65	441.7	553.5	664.8
	HF1.6	5.52	425.2	527.2	658.0
	HF1.8	4.95	429.2	518.2	650.4
	HH1.8	2.52	438.6	516.6	595.4

donde:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

w = pérdida de peso proa. no- isotérmico
k = Constante de velocidad
n = Orden de reacción
E_a = Energía de activación

Que al combinarla con la ecuación de Arrhenius y transformándola se convierte en:

$$\ln \left(-\frac{1}{w} \frac{dw}{dt} \right) = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (4)$$

De acuerdo con esta ecuación, se realizó una gráfica de tal manera que se obtuvo una línea recta con pendiente $-E_a/R$ a partir de la cual se pudo calcular E_a. Pero al realizar la gráfica finalmente se obtuvieron dos zonas, cada una con su energía de activación E_{a1} y E_{a2} para las Zona 1 y Zona 2 respectivamente.

Para hallar la energía de activación global E_g se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_a_g = x_1 E_{a1} + x_2 E_{a2} \quad (5)$$

donde x₁ y x₂ son las fracciones másicas de combustible quemado en ambas zonas.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros de reactividad obtenidos durante el proceso isotérmico para cada uno de los carbones para los tamaños de partícula de 71-177 μm y 177-300 μm.

Tabla 4. Parámetros de reactividad obtenidos en el proceso isotérmico para muestras sin lavar

Dp (μm)	Orden (n)		k(min ⁻¹)		Ea KJ/mol
	600°C	800°C	600°C	800°C	
71-177	0.81	0.13	0.38	0.68	22.78
177-300	0.77	0.00	0.43	0.79	23.82
71-177	0.83	0.05	0.32	0.72	31.42
177-300	0.79	0.03	0.32	0.74	36.81

(Dp: tamaño de partícula, n: orden de reacción, k: constante de velocidad, E_a: energía de activación).

4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como resultado del proceso de reducción de tamaño,

pudo observarse una separación de la materia mineral de estos carbones, pues las fracciones de menor tamaño de partícula presentaron altos contenidos de ceniza, mientras que en las de mayor tamaño lo hicieron en volátiles y carbono fijo. Tal comportamiento obedece a que la diferencia en la rigidez de las estructuras permite que éstas se separen por fracturas durante el proceso de trituración. Es de anotar que las tendencias antes mencionadas fueron más evidentes en las fracciones del carbón H que reportó una diferencia del 17% en las cenizas, entre las fracciones de menor y mayor tamaño, mientras que en el carbón I ésta solo fue del 5%. Con relación a los volátiles y carbono fijo, H siempre reportó los contenidos más altos (Figura 1). Todo lo anterior probablemente obedece a la distribución de la materia mineral en estos carbones y a la naturaleza de las mismas (epigenética o singenética). Similares tendencias han sido reportadas por otros investigadores [2].

Después del proceso de separación gravimétrica, pudo observarse que a menor densidad se registran los menores contenidos de ceniza junto a los más altos contenidos de carbono fijo y volátiles, mientras que a mayor densidad la tendencia es inversamente proporcional.

El comportamiento de la parte orgánica se observó de la siguiente manera: el maceral vitrinita se concentró en las partículas de menor tamaño, posiblemente debido a la fragilidad que presenta, pues durante el proceso de trituración y tamizado ésta se fractura en partículas pequeñas que se concentran en los finos. Mientras que los macerales liptinita e inertinita se concentraron en las partículas de mayor tamaño, esto posiblemente obedece a la rigidez y resistencia a la fracturación [11]. En la Tabla 5 se presentan los resultados del efecto de la trituración y tamizado en el análisis de los macerales y reflectancia al azar de la vitrinita.

Tabla 5. Análisis de macerales y reflectancia de la vitrinita del carbón nativo

Dp(μm)	Vit.	Lipt.	In.	R _{OM}	Rmin	Rmax
I71-177	87.2	1.8	11.0	0.53	0.41	0.68
I177-300	88.0	2.0	10.0	0.55	0.42	0.67
H71-177	80.4	1.2	18.4	0.54	0.45	0.63
H177-300	77.4	2.4	20.2	0.58	0.47	0.68

(D_p: Tamaños de partículas; R_{OM}: Reflectancia media; Rmin: Reflectancia mínima; Rmax: reflectancia máxima).

Al realizar la separación gravimétrica se encontró que los macerales vitrinita y liptinita se concentraron en las partículas de carbón de menor densidad (F1.5), pues son los macerales más livianos y posiblemente las inclusiones de materia mineral son menores que la

del maceral inertinita, el cual se concentró a mayores densidades (F1.8 y H1.8).

En cuanto a la reflectancia de la vitrinita se encontró que no varía ni en el proceso de reducción de tamaño ni en el de separación gravimétrica, lo cual se debe que ambos carbones pertenecen a la misma mina.

Como resultado del proceso de reducción de tamaño pudo observarse una separación de la materia mineral de estos carbones, pues las fracciones de menor tamaño de partícula presentaron altos contenidos de ceniza, mientras que en las de mayor tamaño lo hicieron en volátiles y carbono fijo. Tal comportamiento obedece a que la diferencia en la rigidez de las estructuras que permiten que estas se separen por fracturas durante el proceso de trituración. Es de anotar que las tendencias antes mencionadas fueron más evidentes en las fracciones del carbón H que reportó una diferencia del 17% en las cenizas, entre las fracciones de menor y mayor tamaño, mientras que en el carbón I ésta solo fue del 5%. Con relación a los volátiles y carbono fijo, H siempre reportó los contenidos más altos como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de contenidos de humedad, volátiles, carbono fijo y ceniza para I y H.

DP (µm)		%H*	%V	%CF	%CZ
71-177	F1.5	2.42	37.20	53.80	6.62
	F1.6	2.55	35.50	52.30	9.67
	F1.8	2.63	32.20	49.10	16.05
	h1.8	2.48	16.40	20.70	60.43
177-300	F1.5	2.40	37.90	54.60	5.08
	F1.6	2.53	35.10	52.40	9.99
	F1.8	2.29	31.10	45.30	21.30
	h1.8	1.81	16.60	19.20	62.41
71-177	F1.5	2.73	35.70	57.50	4.14
	F1.6	3.02	33.60	57.50	5.91
	F1.8	2.88	29.00	51.90	16.31
	h1.8	2.70	14.20	17.70	65.42
177-300	F1.5	2.68	37.00	57.40	2.85
	F1.6	2.83	33.10	57.30	6.75
	F1.8	2.64	28.20	48.10	21.10
	h1.8	2.16	16.70	20.00	61.17

Todo lo anterior probablemente obedece a la distribución de la materia mineral en estos carbones y a la naturaleza de las mismas (epigenética o singenética).

Después del proceso de separación gravimétrica, se observó que a menor densidad se registran los menores contenidos de ceniza junto a los más altos contenidos de carbono fijo y volátiles, mientras que a mayor densidad la tendencia es inversamente proporcional.

Con relación a los procesos de combustión isotérmica, se observó que el orden de la reacción disminuye al incrementarse la temperatura. Esto probablemente obedece a que a mayor temperatura, la velocidad de

reacción no depende de la concentración del combustible, sino de la difusión del oxígeno a través del mismo. Se establece además que la energía de activación se incrementa al aumentar el tamaño de partícula.

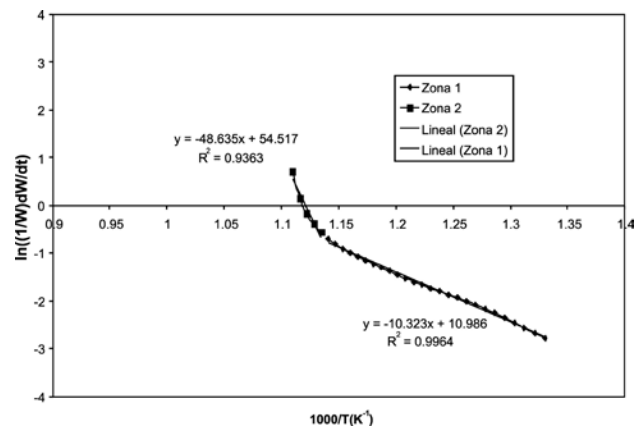
Al someter el carbón al proceso de lavado, se observó que la energía de activación, disminuyó a menor densidad, como consecuencia del menor contenido de ceniza, lo que disminuye la difusión del oxígeno en el material carbonoso. Ello está relacionado con el mayor contenido de inertinita y con la reactividad intrínseca del material carbonoso. La excepción a este comportamiento fueron los hundidos, quienes presentaron la menor energía de activación, ya que es probable que altos contenidos de materia mineral provoquen efectos catalíticos que agilizan la reacción.

Para el proceso de combustión no-isotérmica donde se presentaron dos zonas, una a baja temperatura, probablemente relacionada con la combustión de volátiles y otra de alta temperatura, asociada a la combustión del char. Se tiene que ambas zonas reportan su respectiva energía de activación, la cual disminuye a menor densidad. En cuanto a la máxima velocidad de pérdida de peso, se encontró que ésta se incrementa al disminuir la densidad, como consecuencia de los altos contenidos de carbono fijo y la reactividad intrínseca de éste.

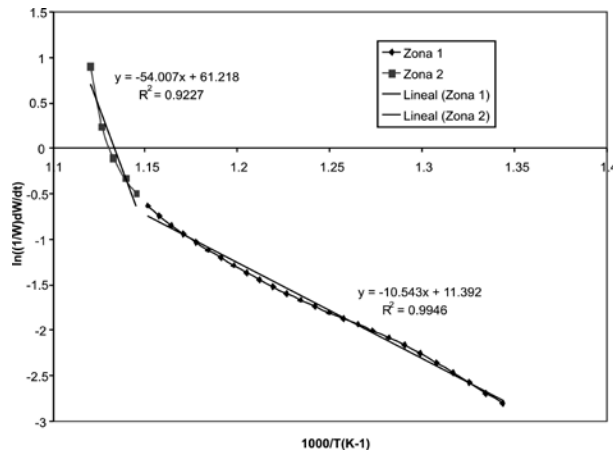
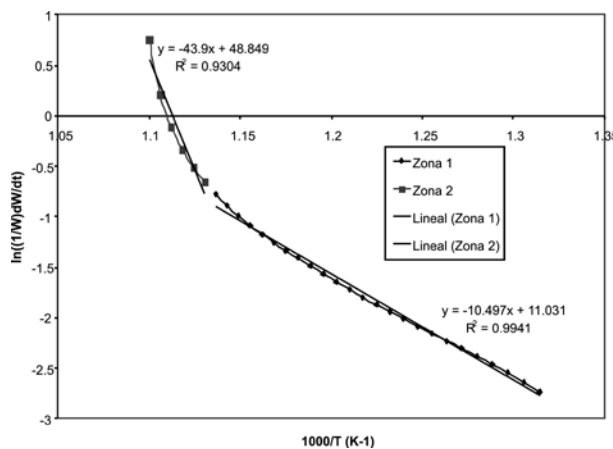
La Zona 1, estuvo comprendida entre la temperatura inicial de carbono fijo (T_{FC}) y una temperatura intermedia (T_{INT}), mientras que la Zona 2, se inició desde la temperatura intermedia hasta la temperatura final de quemado (TB) como se muestra en la Figura 2. Para ambos carbones en sus diferentes fracciones, la zona que presentó la menor energía de activación fue la Zona 1. Esto indica que en esta zona (Zona 1), donde se presentaron reacciones a bajas temperaturas, corresponde a la zona donde las transformaciones del carbón involucran la devolatilización, y la ignición de volátiles en la superficie.

Figura 2. Energía de Activación del proceso no-isotérmico. Muestras de carbones sin lavar.

a) Intercalación (71-177) µm



b) Herminia (71-177) µm

c) Intercalación (177-300) μm d) Herminia (177-300) μm 

Por otro lado, la segunda Zona (Zona 2), donde la energía de activación resultó ser más elevada, corresponde a la zona asociada a la combustión del carbonizado. En esta zona, debido a las altas temperaturas, la reacción química fue rápida lo que conllevó que la concentración del gas reactante en los límites de la interfase gas/sólido se aproximara a cero. Bajo estas condiciones, la transferencia de masa fue la etapa que controló el proceso.

5. CONCLUSIONES

- Los procesos de reducción de tamaño y separación gravimétrica produjeron reducción del contenido de ceniza y por otra parte, concentración de carbono fijo y volátiles, a mayor tamaño de partícula y menor densidad, respectivamente.
- A menor densidad se reportaron las velocidades de pérdida de peso más elevadas, junto a las temperaturas pico y final de quemado más altas.
- En los procesos isotérmicos se redujo el orden de reacción a medida que se incrementó la temperatura y se observó una única zona con su respectiva energía de activación.

- El proceso de combustión no-isotérmico registró dos zonas de combustión, cada una con su propia energía de activación, que disminuyeron a menor densidad a la vez que se vieron afectadas por la catálisis.
- Los procesos de beneficio mejoraron las propiedades de combustión en ambos carbones pero se observó la diferencia de que H resulta más reactivo que I.

6. AGRADECIMIENTOS

Muchos agradecimientos al doctor Richelieu Barranco Meléndez, a la Universidad de Nottingham, la Universidad del Atlántico y a la empresa Carbones de La Jagua por la gran colaboración que nos prestaron para la realización de este proyecto.

7. REFERENCIAS

- [1] ALONSO M.J.G., BORREGO A.G., ALVAREZ D., KALKREUTH W., MENENDEZ R. *Fuel* Vol. 80 (2001). 1857-1870p.
- [2] BARRANCO, R. University of Nottingham 2002. Nottingham 2002.
- [3] BEND, S. L. *Characterisation and Combustion*. The University of Nottingham. Inglaterra (1989).
- [4] CARPENTER, A. M. SKORUPSKA, N. M. IEA Coal Research. London 1993. 20-83p.
- [5] FOLGUERAS, M. B., DÍAZ, R. M., XIBERTA, J., PRIETO, I. *Fuel* (2003) 1-6p.
- [6] KNELLER W.A. *Thermochimica Acta* Vol. 108 (1986). 357-388p.
- [7] LAURENDEAU, N. M. *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 4 (1978). 221-270p.
- [8] PAINTER P.C., COLEMAN M.M., JENKINS R.G., WHANG P., WALKER P. *Fuel*, 57(1978), 337-344
- [9] SÁNCHEZ J., VALDERRAMA G. CARVAJAL A., IV Congreso Nacional y II Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón. Paipa-Boyacá (1998).
- [10] SEEBAUER, V., PETEK, J. and STAUDINGER G. *Fuel* Vol. 76 (1997). 1277-1282p.
- [11] STACHE, MACKOWSKY M Th, TEICHMÜLLER M and others (eds). *Stach's textbook of coal petrology*. Berlin 1982. FRG Gebruder Borntraeger, 535p.

[12] TORREGROZA S., RANGEL R. Remoción de materia mineral e inertes en carbones de La Jagua de Ibirico-Cesar. Proyecto de grado, Ingeniería Química, Universidad del Atlántico, 2004, Barranquilla.

[13] VAREY, J. E., HINDMARSH, C. J., THOMAS, K M. Fuel Vol. 75 (1995). 164-176p.

[14] WALKER P.L. Jr. PUSINKO F.Jr. and AUSTIN L.G. Academic Press Vol III (1959). 123-221.