

# Colicuefacción térmica y catalítica de un carbón colombiano con un residuo de polietileno de baja densidad

## Thermal and catalytic coliquefaction of a Colombian coal with a low density polyethylene

Juan Barraza<sup>1</sup>, José Moreno<sup>2</sup>, Fiderman Machuca Martínez<sup>3</sup> y Alberto Bolaños<sup>4</sup>

### RESUMEN

La colicuefacción térmica y catalítica de carbones con residuos orgánicos busca incrementar la eficiencia del proceso y disminuir sus costos ya que la presencia del residuo orgánico puede suplir el hidrógeno requerido de la reacción. En este trabajo se realizaron colicuefacciones térmicas y catalíticas de un carbón de la mina La Yolanda con un residuo de polietileno de baja densidad (RPBD) en presencia de un solvente donante de hidrógeno (tetralina) y de dos catalizadores —cloruro de rutenio y níquel-molibdeno— soportado en alúmina. Se usó un reactor *batch* a las temperaturas de 380, 400 y 420 °C. Los resultados mostraron conversiones mayores a 90% para la colicuefacción térmica carbón/RPBD sin tetralina, mientras que en su presencia presentaron decrecimiento de la conversión con la temperatura. Los rendimientos de aceites y preasfaltenos obtenidos a 400 y 420 °C fueron mayores en presencia de tetralina, comparada con los obtenidos en su ausencia. Ambos catalizadores mejoraron la conversión y la selectividad hacia aceites. Sin embargo, los resultados de selectividad no fueron mayores a los obtenidos cuando solamente se utilizó carbón y RPBD a 380 °C.

**Palabras clave:** carbón, residuo de polietileno de baja densidad, colicuefacción, térmica, catalítica.

### ABSTRACT

Thermal and catalytic co-liquefaction of coal with organic waste is aimed at increasing the process' efficiency and decreasing its cost as the presence of organic waste can supply the hydrogen required for the reaction. Thermal and catalytic coliquefaction of coal from La Yolanda colliery with low density polyethylene waste (LDPE) was carried out using hydrogen-donor solvent (tetraline) and two catalysts (ruthenium chloride and nickel-molybdenum on aluminium). A batch reactor was used at 380°C, 400°C and 420°C. Results revealed greater than 90% conversion for thermal coliquefaction of coal/LDPE without tetraline, whereas results showed that conversion decreased with temperature when using tetraline. Oil and preasphaltene yields, obtained at 400°C and 420°C, were higher using tetraline than those without it. Both catalysts improved conversion and oil selectivity. However, selectivity results were no higher than those obtained when only coal was used and LDPE was 380°C.

**Keywords:** coal, low density polyethylene waste, coliquefaction, thermal, catalytic.

**Recibido:** noviembre 24 de 2008

**Aceptado:** diciembre 29 de 2009

### Introducción

La disposición de residuos plásticos representa un gran problema ambiental a nivel mundial dado su carácter de residuo no biodegradable. La colicuefacción de residuos orgánicos con carbón mineral y con otras fuentes orgánicas tales como breas y fondos de la refinación del petróleo es una alternativa energético-ambiental que busca dar valor agregado, al obtenerse hidrocarburos líquidos y gaseosos (Joo, 1995; Luo, 1996a; Nahid, 2009; Ali, 2005). La colicuefacción de residuos orgánicos con carbón representa una reacción de hidrogenación donde ocurre la colicuefacción simultánea de ambos materiales en el rango de temperaturas de 380-420 °C (Davison, 1997).

En el proceso de colicuefacción ambos materiales se benefician, dado que algunos residuos orgánicos presentan alto contenido de hidrógeno y buenas propiedades solventes para licuar el carbón. El proceso de colicuefacción de carbón con residuos de polietileno es un complejo, y depende de variables tales como el tipo de carbón usado, la presencia o no de catalizador, el tipo de catalizador homogéneo o heterogéneo, la forma como se agrega el hidrógeno, las condiciones de presión, temperatura y tiempo de residencia a las cuales se somete el proceso, así como el tipo de residuo polimérico utilizado.

Varios trabajos (Anderson, 1995a; Huffman, 1995; Luo, 1996a; Taghie, 1994; Palmer 1997, Joo 1995) han investigado el proceso

<sup>1</sup> Ingeniero químico. M.Sc., en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Ph.D., University of Nottingham, Inglaterra. Profesor, Universidad del Valle, Colombia. [juan.barraza@univalle.edu.co](mailto:juan.barraza@univalle.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Estudiante M.Sc. en Ingeniería Química, Universidad del Valle, Colombia. [joosleoncio@latinmail.com](mailto:joosleoncio@latinmail.com)

<sup>3</sup> Ingeniero químico, M.Sc. y Ph.D., en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Profesor, Universidad del Valle, Colombia. [fiderman@univalle.edu.co](mailto:fiderman@univalle.edu.co)

<sup>4</sup> Ph.D., Universidad de Sao Paulo, Brasil. Pos-doctorado, Universidad Federal de Minas, Gerais-Belo Horizonte, Brasil. Profesor titular, Universidad del Valle, Colombia. [albolan@univalle.edu.co](mailto:albolan@univalle.edu.co)

de colicuefacción directa con carbones de diferentes rangos usando residuos de polietileno (PE) de media y alta densidad, polipropileno (PPE), polietilentereftalato (PET) y mezclas de residuos plásticos, en presencia y ausencia de catalizadores. Feng (1996) evaluó el efecto del tipo de catalizador, temperatura, gas, presión, tiempo de reacción y tipo de solvente sobre el porcentaje de aceites y rendimiento a líquidos. Las colicuefacciones se realizaron usando mezclas 50-50 de PE y PPE con carbón *Black Thunder*. Altos rendimientos hacia líquidos se obtuvieron usando tetralina como solvente donante de hidrógeno y una mezcla de tetralina y aceite lubricante empleado. Utilizando las mismas condiciones, los rendimientos de una mezcla de PPE-carbón fueron mayores comparados con los de la mezcla PE-carbón.

La presencia de hidrógeno es de suma importancia en la conversión de las colicuefacciones carbón-residuo plástico. Anderson (1995a) procesó un carbón bituminoso con residuos plásticos de PE, PP y PET en presencia de tetralina como solvente donante de hidrógeno e hidrógeno gaseoso. Los resultados encontrados muestran que los rendimientos obtenidos de productos líquidos estuvieron en el rango de 80 a 90%.

En las reacciones de colicuefacción de carbón con polímeros el tipo de residuo juega un papel importante en la conversión hacia productos líquidos. Wang (2004), usando polímeros individuales, mostró que el PPE de alta densidad fue más difícil de convertir hacia productos líquidos, comparado con los residuos plásticos. Experimentos de colicuefacción desarrollados sobre mezclas carbón-plásticos (usualmente mezclas 1:1) empleando un carbón lignítico con cenizas volantes de concentrados calcinados de molibdeno como catalizador, revelaron que los rendimientos hacia aceites estaban en el rango de 60 al 78%, mientras que la conversión total hacia productos líquidos alcanzó valores de alrededor del 95%. El hidrógeno total consumido se redujo en el rango de 7,7 al 17,9%, lo cual significa la existencia de un efecto sinérgico en la colicuefacción, es decir, la presencia del plástico actuó como un donante de hidrógeno, contribuyendo a que existiese menor consumo de hidrógeno total.

Por otro lado, la presencia, ausencia y tipo de catalizador son variables importantes que influyen sobre la eficiencia del proceso. Wang (2002a) estudió el mecanismo de reacción de algunos catalizadores de hierro en la colicuefacción de carbón con residuos plásticos, hallando que el sulfato ferroso mostró alta actividad antes y después del tratamiento de oxidación y que un sitio activo del catalizador de hierro fue un sulfato, formado durante la licuefacción del carbón.

Wang (2002b) también analizó la transferencia de hidrógeno en la colicuefacción de carbón con algunos plásticos ricos en hidrógeno para estudiar su mecanismo durante el proceso. Luo (1996b) se valió de catalizadores de ruptura catalítica y zeolita tipo HZSM5, encontrando que altas conversiones se alcanzaron usando plásticos individuales en comparación con mezclas de plásticos. Sin embargo, mayor producción de aceites y menor rendimiento de gas se obtuvo mediante mezclas de plásticos. Con un tiempo de reacción de 120 min ambos catalizadores proporcionaron altas conversiones. Ding (1996) estudió el efecto de varios catalizadores de hidrogenación-hidrorruptura en la colicuefacción de carbón con un polietileno de alta densidad. Los catalizadores utilizados fueron de hidrogenación de sílica-alúmina conteniendo Pt, Ni, Pd y Fe, así como esos mismos catalizadores sin metales. Los catalizadores con metales mostraron mayor actividad catalítica en la producción de aceites que los libres de metales.

En el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad del Valle se realizó un trabajo (Caicedo, 2002) con un catalizador no reportado en la literatura, a base de rutenio (Ru) para evaluar el efecto de la relación carbón/RPBD/tetralina sobre la conversión a producto líquido y distribución de productos (aceites, asfaltenos y preasfaltenos). Los resultados mostraron que la conversión y distribución de productos mejoraron cuando se usó un catalizador a base de Ru. Además, que la conversión y la fracción de aceites se incrementaron cuando se utilizó tetralina como solvente donante de hidrógeno. Un segundo trabajo (Machuca, 2007) efectuado por el mismo grupo de investigación, base del presente estudio, analizó los mismos efectos valiéndose sólo de colicuefacciones térmicas en las mismas condiciones de operación.

Por otro lado, los residuos plásticos de diversas densidades también se han colicueado con residuos de petróleo para la obtención de extractos líquidos.

Estudios de colicuefacción de carbones colombianos con residuos plásticos de baja densidad no se han llevado a cabo. Tampoco se han reportado en la literatura trabajos que presenten colicuefacciones térmicas (en ausencia de catalizador) y catalíticas de carbones con residuos plásticos usando carbones colombianos. El objetivo de este trabajo fue el de evaluar el efecto de la temperatura de reacción (colicuefacción térmica) y de dos tipos de catalizadores de hidrogenación (colicuefacción catalítica) sobre la conversión a líquidos, distribución de productos en el líquido y selectividad hacia aceites en un proceso de colicuefacción de carbón y un RPBD.

## Metodología

### Materiales

Un carbón sub-bituminoso tipo A de la mina La Yolanda, ubicada en el corregimiento La Buitrera (Cali, Colombia) se usó en este estudio. El RPBD se obtuvo de una compañía recicladora de plásticos de Cali. Los análisis próximos del carbón y del RPBD se presentan en la tabla 1, la cual muestra que el carbón exhibe un alto contenido de carbono fijo y ceniza y un menor contenido de materia volátil, en comparación con el RPBD. En las colicuefacciones con catalizador se empleó un catalizador sólido de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y una solución de cloruro de rutenio (RuCl<sub>2</sub>). Ambos catalizadores se prepararon en el Laboratorio del Departamento de Química de la Universidad del Valle. La concentración de catalizador sólido fue de 0,35% p/p para Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 0,15% p/p para RuCl<sub>2</sub>, basado sobre el peso del carbón.

### Procedimiento experimental

Se usó un reactor de acero inoxidable de 100 ml para las reacciones de colicuefacción carbón/RPBD. La presión generada por los gases se controló en 20 bar. La alimentación al reactor se hizo de la siguiente manera: 1) carbón y RPBD en las colicuefacciones térmicas sin presencia de tetralina en proporción molar 1/5; 2) carbón, RPBD y tetralina en las colicuefacciones térmicas mezclados en proporción molar 1/5/3; y 3) carbón, RPBD y catalizador en las corridas catalíticas.

El reactor se calentó a la temperatura deseada y la reacción se llevó a cabo durante 30 minutos. Al final de la reacción el reactor se enfrió bruscamente con agua. Los productos gaseosos se liberaron y los sólidos y líquidos se solubilizaron en tetrahidrofurano (THF) durante 24 horas. El material insoluble en THF (TI) se separó por filtración. La conversión se calculó de acuerdo con la cantidad de material insoluble en THF. Los insolubles en THF representan el

carbón que no reaccionó o carbón no convertido durante la colicuefacción además de la materia mineral del carbón y del RPBD.

Tabla 1. Análisis próximo de carbón y RPBD, porcentaje de base seca

	Carbón	RPBD
Ceniza, %	15.52	0.49
Materia Volátil, %	22.43	98.3
Carbono Fijo, %	60.80	0.70
Humedad Residual, %	1.47	0.02
Azufre Total, %	0.50	0.01
Poder Calorífico (Btu/lb)	12,815	6,200

El THF solubilizado con el carbón líquido se procesó en un evaporador rotatorio para recuperar el THF. Luego se pesó la cantidad de carbón líquido obtenido, el cual posteriormente se solubilizó con hexano durante 24 horas. La mezcla resultante se separó por filtración en dos fracciones: insolubles en hexano (HI) y solubles en hexano (HS). En la fracción insoluble HI se encuentran los asfaltenos y preasfaltenos, mientras que en la fracción soluble se hallan los aceites. Los errores experimentales basados en experimentos repetidos fueron de  $\pm 1\%$  para la conversión y  $\pm 0,5\%$  para la distribución de productos.

La conversión ( $X$ , base seca libre de ceniza, bscl), rendimiento a aceites ( $A$ ), asfaltenos y preasfaltenos ( $AP$ ), residuo ( $R$ ), gases ( $G$ ) y selectividad hacia aceites ( $S$ ), se calcularon por las siguientes expresiones:

$$\%X_{bscl} = \left[ 1 - \frac{TI - C_{carbón} - CR_{PBD}}{A_{carbón} + AR_{PBD}} \right] * 100 \quad (1)$$

$$\%A = \frac{MA}{A_{carbón} + AR_{PBD} + AT_{etralina}} * 100 \quad (2)$$

$$\%AP = \frac{M_{líquidos} - MA}{A_{carbón} + AR_{PBD} + AT_{etralina}} * 100 \quad (3)$$

$$\%R = \frac{TI - C_{carbón} - CR_{PBD}}{A_{carbón} + AR_{PBD} + AT_{etralina}} * 100 \quad (4)$$

$$\%G = 100 - A - AP - R \quad (5)$$

$$\%S = \frac{A}{X} * 100 \quad (6)$$

donde,  $A_{carbón}$ ,  $AR_{PBD}$  y  $AT_{etralina}$  representan la cantidad alimentada de carbón, RPBD y tetralina, en base seca libre de cenizas (bscl).  $C_{carbón}$  y  $CR_{PBD}$  significan la ceniza del carbón y del RPBD, respectivamente, mientras que  $MA$  y  $M_{líquidos}$  la masa de aceites y líquidos obtenidos. El rendimiento de los productos gaseosos se obtuvo por diferencia y la selectividad por medio de la relación aceite/conversión,  $A/X$ .

## Resultados y discusión

### Colicuefacción térmica de la mezcla carbón y RPBD

Las colicuefacciones térmicas de la mezcla carbón/RPBD se llevaron a cabo a tres temperaturas de reacción sin presencia de catalizador ni tetralina. Esto se realizó dado que las corridas preliminares mostraron altas conversiones hacia productos líquidos y se deseaba observar el efecto de la ausencia de tetralina, lo cual incrementa el costo del proceso de colicuefacción y traslapa el efecto de la adición del hidrógeno procedente del RPBD.

Los resultados de las colicuefacciones individuales del carbón y RPBD se presentan en la figura 1. Se puede observar que para todas las temperaturas la mezcla carbón/RPBD produce conversio-

nes mayores a 90%, estando en concordancia con los resultados obtenidos por Anderson (1995b). Sin embargo, en el trabajo de Luo (1996b), las conversiones obtenidas de la colicuefacción térmica carbón/RPBD no fueron mayores al 47%, pero se encontró que la presencia del RPBD tiene un efecto positivo como solvente en la licuefacción.

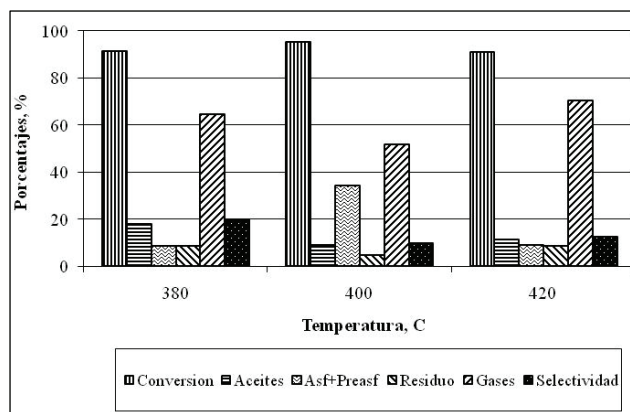
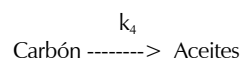
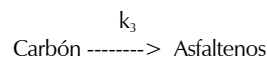


Figura 1. Colicuefacción térmica carbón/RPBD, razón másica 1/5

Por otro lado, los productos líquidos de la colicuefacción individual carbón/RPBD se caracterizan por presentar en promedio fracciones de aceite menores al 20%, de asfaltenos menores al 10% y rendimientos de gases mayores al 50%. Las bajas proporciones de fracciones de aceites, asfaltenos y preasfaltenos probablemente se deba a sufrir ruptura adicional hacia compuestos de menor peso molecular como son los gases. Weller et al. (1950) propusieron un mecanismo de conversión de carbón a aceites que se representa como:



Liebenberg y Potgieter (1973) reportaron un modelo más complicado, como el siguiente:



A pesar de que los dos modelos anteriores no presentan un mecanismo de formación hacia la producción de gases, se podría establecer de los resultados obtenidos en este trabajo que los aceites, los preasfaltenos, el carbón y el RPBD producen radicales libres ligeros, los cuales se estabilizan con hidrógeno para la obtención de gases.

Por otro lado, la temperatura juega un gran papel en la producción de aceites y gases y en la selectividad hacia aceites. Este último parámetro alcanzó un valor máximo de 20% a la temperatura más baja usada, de 380 °C, y tiende a disminuir con el incremento de la temperatura. Dicho efecto está relacionado con la disminución de la proporción de aceites a medida que se incrementa la temperatura. Se observa en la Figura 1 que el contenido de aceite disminuyó desde 20% a la temperatura de 380 °C a 10% a la temperatura de 420 °C. Respecto de los gases, se observa que tienden a incrementarse a partir de 400 °C, a pesar de que a 380 °C la producción de gases es similar a la obtenida a 420 °C. Un resultado interesante es la gran formación de la fracción de asfaltenos y

preasfaltenos (34%) a la temperatura de 400 °C. Esos resultados concuerdan con los mecanismos reportados (Weller, 1950; Lienberg, 1973) en donde los asfaltenos son compuestos intermedios obtenidos a temperaturas moderadas, los cuales se transforman en aceites y gases a mayor temperatura.

### Colicuefacción térmica carbón/RPBD/tetralina

La figura 2 muestra el efecto de la temperatura sobre la colicuefacción de la mezcla carbón/RPBD/tetralina en términos de conversión hacia productos líquidos y distribución de productos. Los experimentos se realizaron con el objetivo de observar el efecto de la presencia del solvente donante de hidrógeno (tetralina), sin presencia de catalizador, usando una razón másica carbón/RPBD/tetralina 1/5/3. Los resultados indican que para estas condiciones de operación la conversión a extractos líquidos es también función de la temperatura de reacción. Existe tendencia a decrecer la conversión con la temperatura de reacción desde 96% a 380 °C hasta 71% a la temperatura de 420 °C.

Comparando los resultados de conversión obtenidos en las licuefacciones carbón/RPBD sin tetralina (Figura 1) con los obtenidos en su presencia (Figura 2) se aprecia que, a excepción de la temperatura de 380 °C, las conversiones de las colicuefacciones sin tetralina fueron mayores que las obtenidas en presencia de ésta. Resultados similares se hallaron en los trabajos de Luo (1996a, 1996b). Desde el punto de vista económico, este resultado es importante, ya que la tetralina es un compuesto químico costoso para usar a escala industrial.

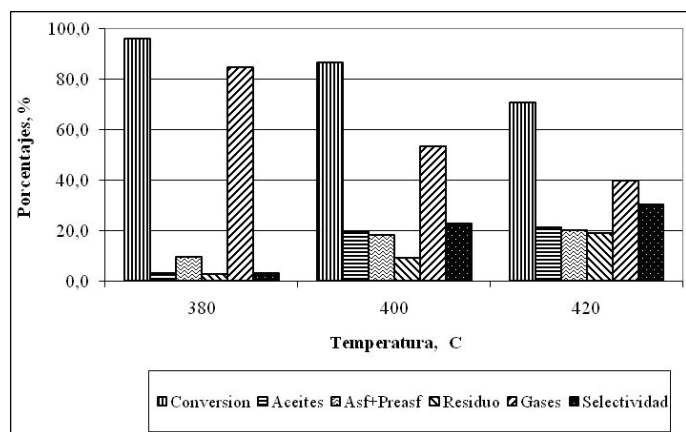


Figura 2. Colicuefacción térmica carbón/RPBD/tetralina

En términos de distribución de productos, se determinó que los rendimientos de aceites y preasfaltenos obtenidos a 400 y 420 °C fueron mayores en las corridas en presencia de tetralina comparados con los obtenidos en las licuefacciones en su ausencia, sugiriendo que el hidrógeno liberado de la tetralina estabiliza los radicales libres provenientes del carbón, produciendo mayor proporción de fracciones de aceites, preasfaltenos y residuos. Estudios de trazabilidad del hidrógeno producido por la tetralina podrán confirmar esas suposiciones.

La distribución de productos también mostró que depende de la temperatura de reacción. Los mayores rendimientos de aceites y preasfaltenos se obtuvieron a 420 °C en comparación con los obtenidos a 380 y 400 °C, lo cual insinúa que a la temperatura de 420 °C se produce mayor cantidad de radicales libres tanto del carbón como del RPBD y por lo tanto existe mayor posibilidad de estabilizar compuestos presentes en las fracciones de aceites y preasfaltenos. La mayor producción de gases (78%) se obtuvo a 380

°C y esta fracción gaseosa tiene la tendencia a decrecer con la temperatura. Un comportamiento contrario lo presenta la selectividad hacia aceites, que se incrementa con la temperatura.

### Colicuefacción catalítica carbón/RPBD

Las figuras 3 y 4 revelan el efecto de la temperatura en la colicuefacción carbón/RPBD sin tetralina en presencia del catalizador sólido Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de la solución de RuCl<sub>2</sub>, respectivamente. El catalizador sólido de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se usa en reacciones de hidrorruptura, principalmente en la industria del petróleo, debido a su selectividad hacia la hidrogenación del sustrato, mientras que respecto de la solución de RuCl<sub>2</sub> no se ha reportado en la literatura el haber sido usado como catalizador en el proceso de colicuefacción de carbones colombianos con residuos orgánicos.

Como se observa en la figura 3, para todas las temperaturas, el catalizador de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> generó conversiones superiores al 92%. Lo anterior indica que la presencia de ese catalizador produce sinergia en la hidrogenación del carbón para la formación de productos líquidos. Un trabajo realizado por Joo (1995) logró similares resultados del catalizador de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> usando una mezcla de RPBD, Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y un residuo de petróleo. Análogos resultados fueron hallados por Luo (1996b) usando un catalizador de ruptura catalítica pretratado, RPBD y un carbón de Illinois No. 6.

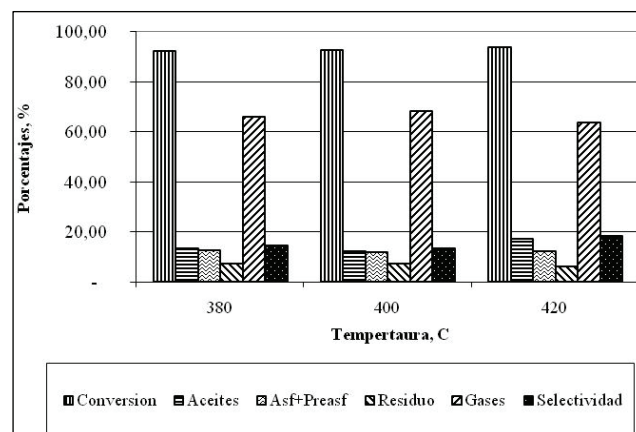


Figura 3. Colicuefacción carbón/RPBD en presencia de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Cuando se usó el catalizador de RuCl<sub>2</sub> para las tres temperaturas, los valores de conversión fueron muy cercanos a los obtenidos con el catalizador sólido. En las figuras 3 y 4 se observa también que la conversión no depende del rango de temperatura de reacción usado. Esto implica que la colicuefacción carbón/RPBD en presencia de cualquiera de los dos catalizadores usados a la menor temperatura de 380 °C se vuelve importante para la economía del proceso. Analizando la distribución de productos en las figuras 3 y 4 se observa que usando ambos catalizadores y cualquier temperatura de reacción los valores de aceites, asfaltenos, preasfaltenos y gases son muy cercanos. Lo anterior apunta a que cumplen la función de catalizadores de hidrogenación en los procesos de colicuefacción de residuos orgánicos con carbón.

La figura 5 compara los resultados de conversiones obtenidas usando las colicuefacciones térmicas y catalíticas a las tres temperaturas de reacción implementadas. Se evidencia que a las temperaturas de 400 y 420 °C las conversiones obtenidas usando los dos catalizadores fueron superiores a las logradas en las corridas térmicas empleando tetralina. Sin embargo, los resultados de conversión por colicuefacciones catalíticas y térmicas carbón/RPBD (sin presencia de tetralina) son similares. Esos resultados están de

acuerdo con los encontrados en el trabajo de Luo (1996b), quien utilizó una mezcla de carbón/RPBD y un catalizador de naftenato de molibdeno (6% MO, MoNaph). Esta deducción también es importante desde el punto de vista económico, ya que los catalizadores de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y la solución de RuCl<sub>2</sub> son costosos, además de volver más complejo el proceso.

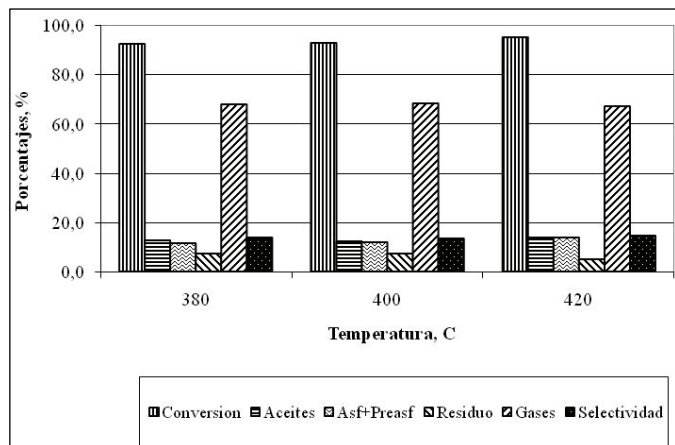


Figura 4. Colicuefacción carbón/RPBD en presencia de RuCl<sub>2</sub>

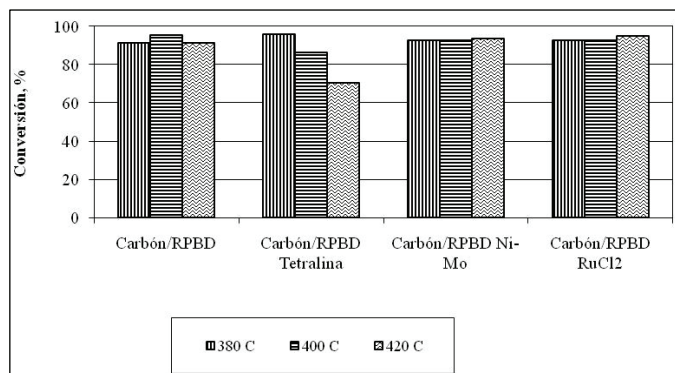


Figura 5. Conversiones de las colicuefacciones térmicas y catalíticas

Respecto de que en los procesos de colicuefacción de carbón con residuos orgánicos se busca obtener altas selectividades hacia la fracción de aceites, la figura 6 presenta los resultados de este parámetro para las colicuefacciones térmicas y catalíticas.

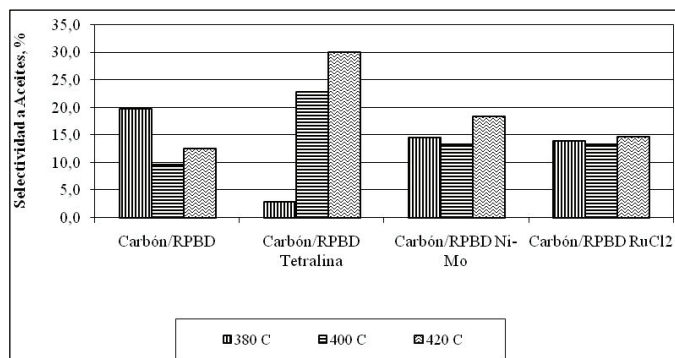


Figura 6. Selectividad para aceites en las colicuefacciones térmicas y catalíticas

Los resultados revelan que las selectividades obtenidas en las licuefacciones catalíticas son muy cercanas. Esto, debido a que los valores de conversiones en aceites y rendimientos son muy parecidos. Sin embargo, usando el catalizador de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a la tempera-

tura de 420 °C se obtuvo el mayor valor. Al comparar los resultados de las colicuefacciones térmicas y catalíticas se ve que el mayor valor de selectividad (30%) se halló al usar la colicuefacción térmica en presencia de tetralina a 420 °C. Este resultado está de acuerdo con lo esperado, dado que algunos compuestos derivados de la transformación de la tetralina, por ejemplo compuestos nafténicos, pasan a formar parte de la alta concentración de aceite (20%) obtenida usando tetralina. No obstante, usando colicuefacción térmica sin tetralina ni catalizador, solamente carbón y RPBD, a la temperatura de 380 °C se produjo alta selectividad para aceites (20%). Este resultado es muy importante desde el punto de vista económico del proceso, pues no se requiere el uso de tetralina ni de catalizador.

## Conclusiones

Este trabajo buscó dar valor agregado a un residuo orgánico de polietileno de baja densidad y a un carbón de la región del Valle del Cauca (Colombia) produciendo extractos líquidos de carbón y gases a través de un proceso de licuefacción directa. Para lo anterior, a un reactor de 100 ml se alimentó: (1) carbón y RPBD en las colicuefacciones térmicas sin presencia de tetralina en proporción másica 1/5; (2) carbón, RPBD y tetralina en las colicuefacciones térmicas mezclados en proporción másica 1/5/3 y (3) carbón, RPBD y catalizador en las corridas catalíticas.

Los resultados encontrados mostraron que en el proceso de colicuefacción de carbón/RPBD sin tetralina se obtuvo el mayor rendimiento (95.3%) a productos líquidos a 400 °C. Para todas las temperaturas se lograron conversiones a líquidos mayores al 90%. La presencia del RPBD posiblemente ayuda a estabilizar los radicales libres de carbón previniendo reacciones retrogresivas. Esto significa que el residuo de polietileno pareciera tener un papel de solvente donante de hidrógeno.

La licuefacción térmica de la mezcla carbón/RPBD/tetralina mostró que la conversión y la distribución de productos dependen de las temperaturas usadas. La mayor proporción de aceite se obtuvo a 420 °C.

La presencia del catalizador de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de RuCl<sub>2</sub> produjo conversiones similares a las obtenidas en las licuefacciones térmicas. Sin embargo, la mejor selectividad para aceites (20%) se encontró a la temperatura de 380 °C usando la colicuefacción térmica sin tetralina y sin catalizador.

Futuras investigaciones deben enfocarse hacia un estudio cinético de la colicuefacción directa de mezclas carbón-polietileno de baja densidad, con el fin de obtener parámetros cinéticos necesarios en el diseño de un reactor a escala industrial.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por el soporte económico para realizar este trabajo mediante el proyecto de investigación "Reutilización de aceites lubricantes, llantas y polímeros a través del proceso de colicuefacción con carbón mineral", Código 11-06-12472.

## Bibliografía

Ali, M. F., Siddiqui, M. N., Thermal and catalytic decomposition behavior of PVC mixed plastic waste with petroleum residue., Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 74, 2005, pp. 282-289.

- Anderson, L., *Coal Science and Technology* 24., Vol. II, 1997, Elsevier, New York, 1995a, pp. 1545-1547.
- Anderson, L., Tuntawiroon, W., *Coal Science and Technology* 24., Vol. II, 1995b. Elsevier, New York. pp. 1515-1517.
- Caicedo R., *Proceso de licuefacción y colicuefacción de carbón con residuos plásticos.*, tesis de Grado, Universidad del Valle, Departamento de Química, 2002, pp. 1-70.
- Davison, R., *Coprocessing waste with coal.*, Perspectives, Ed. IEA Coal Research, Report IEAPER/36, London, 1997.
- Ding, W., Tuntawiroon, J., Liang, L., Anderson, L., *Depolymerization of waste plastics with coal over metal-loaded silica-alumina catalysts.*, *Fuel Processing Technology*, Vol. 49, 1996, pp. 49-63.
- Feng Z., Zhao J., Rockwell J., Bailey D., Huffman, G., *Direct liquefaction of waste plastics and coliquefaction of coal-plastic mixtures.*, *Fuel Processing Technology*, Vol. 49, 1996, pp. 17-30.
- Huffman, G., Feng, Z., Huggins, F., Mahajan, V., *Direct liquefaction of waste plastics and coliquefaction of waste plastics with coal.*, *Coal Science and Technology* 24, Vol. II, 1995, Elsevier, New York, pp. 1519-1522.
- Joo H, Curtis, C., *Coprocessing of waste plastics with coal and petroleum residue*, *ACS Fuel, Chem. Div. Prepr.*, Vol. 40, 1995, pp. 643-647.
- Lienberg, B., Potgieter, H., *The uncatalyzed hydrogenation coal.*, *Fuel*, 52, 1973, pp.130-133.
- Luo, M., Curtis, C., *Effect of reaction parameters and catalyst type on waste plastics liquefaction and coprocessing with coal.*, *Fuel Processing Technology*, Vol. 49, 1996a, pp.177-196.
- Luo, M., Curtis, C., *Thermal and catalytic coprocessing of Illinois No 6., coal with model and commingled waste plastics*, *Fuel Processing Technology* , Vol. 49, 1996b, pp. 91- 117
- Machuca, F., Barraza, J., Bolaños, A., *Producción de hidrocarburos líquidos y gaseosos mediante la colicuefacción térmica del carbón mineral con residuos de polietileno de baja densidad.*, *El Hombre y la Máquina*, No. 28, 2007, pp. 54-59
- Nahid, M, Hamid, H., *Catalytic coprocessing of waste plastics and petroleum residue into liquid fuel oils.*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 86, 2009, pp 141-147.
- Palmer, S., Hippo, E., Tandon, D., Blankenship, M., *Liquefaction of coal/waste plastic mixtures.*, *Coal Science and Technology* 24, Vol II, 1997, pp 1523-1526
- Taghiei, M., Feng, Z., Huggins, F., Huffman, G., *Coliquefaction of waste plastics with coal.*, *Energy & Fuels*, Vol. 8, 1994. pp. 1228-1232.
- Wang, L., *Studies on hydrogen transfer in co-liquefaction of coal with waste plastics using <sup>3</sup>H tracer techniques. II., Hydrogen transfer from hydrogen-rich plastic*, *Fuel and Energy Abstracts*, Vol. 43, 2002b, pp. 245-245
- Wang, L., Chen, P., *Mechanism study of iron-based catalysts in co-liquefaction of coal with waste plastics.*, *Fuel* , Vol. 8, 2002a, pp 811-815.
- Wang, L., Chen, P., *Development of first-stage co-liquefaction of Chinese coal with waste plastics.*, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 43, 2004, pp. 145-148.
- Weller, S., Clark, E., Pelipetz, M., *Mechanism of coal hydrogenation.*, *Ind. Eng. Chem*, Vol. 42, 1950, pp. 34-336.