

## **TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA DE NEUMÁTICOS USADOS EN UNA SOLA ETAPA EN ATMÓSFERA DE CO<sub>2</sub> PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO Y COMPARACIÓN CON EL OBTENIDO EN DOS ETAPAS**

**Luisa Fernanda Cardona, Mariluz Betancur<sup>†</sup>, Juan Daniel Martínez**

*Grupo de Investigaciones Ambientales, Universidad Pontificia Bolivariana,  
Circular 1 # 70-01, Bloque 11, piso 2, Medellín, Colombia.*

Recibido 14 Noviembre 2014; aceptado 30 Julio 2015  
Disponible en línea: 27 Octubre 2015

Resumen: Este trabajo muestra la producción de Carbón Activado (CA) por medio de la degradación termoquímica sin tratamiento previo de desvolatilización (una etapa) de neumáticos usados en un reactor de lecho fijo empleando como agente de activación CO<sub>2</sub>. El CA obtenido fue caracterizado a partir de los análisis elemental e inmediato, área superficial BET, porosimetría de mercurio, microscopia electrónica de barrido (SEM) y el método de Boehm para la determinación de grupos funcionales superficiales. Asimismo, se investigó la capacidad de adsorción del CA a través de una prueba de adsorción de níquel. Bajo las condiciones de transformación termoquímica implementadas (900° de temperatura, 100 mL/min de CO<sub>2</sub> y 180 min de tiempo de reacción), la conversión del neumático en CA fue del 78%, presentando un área superficial BET de 418 m<sup>2</sup>/g y una estructura de tipo mesoporosa. Con respecto a los resultados de adsorción, se obtuvo una remoción del 50% de ion metálico de níquel en solución acuosa, a temperatura de 28°C, pH de 6, tiempo de contacto 24 horas y velocidad de agitación de 150 rpm. Finalmente se realizó una comparación con los resultados obtenidos en un proceso de dos etapas (pirólisis y activación), encontrándose que en ambos carbones la porosidad y el área superficial son similares. Lo anterior permite afirmar sobre la potencialidad del proceso de activación sin etapa previa de desvolatilización dada las menores etapas involucradas en la producción para obtener un CA con propiedades atractivas para ser usado en procesos de adsorción.

*Palabras Clave:* Adsorción, degradación termoquímica, carbón activado, neumáticos usados, porosidad.

## **THERMOCHEMICAL TRANSFORMATION OF WASTE TIRES IN ONE STEP BY USING CO<sub>2</sub> FOR THE PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON AND THE COMPARISON WITH THAT OBTAINED IN TWO STEPS**

Abstract: This work shows the production of activated carbon (AC) from waste tires by thermochemical degradation without previous treatment of devolatilization (one stage) in a fixed bed reactor using CO<sub>2</sub> as activation agent. The adsorptive capacity of the carbon was investigated through nickel adsorption and different characterization techniques such as elemental and immediate analyses, BET surface area, mercury porosimetry, scanning electron microscopy (SEM) and the Boehm method in order to identify the superficial functional groups. The conversion of the waste tire on activated carbon was 78% for a reaction temperature of 900°C, a volumetric flow rate of CO<sub>2</sub> of 100 mL/min and a reaction time of 180 minutes. Under these conditions the resulting AC showed a BET area surface of 418 m<sup>2</sup>/g and a pore structure predominately mesoporous. Regarding to adsorption results it was found a removal of 50% of the nickel metal ion in aqueous solution. The adsorption conditions were 28°C, pH 6, soaking time of 24 hours and a stirring rate of 150 rpm. Finally, a comparison with the results obtained in a two stages process (pyrolysis and activation) showed that in both ACs the porosity and the surface area are similar. This fact suggest about the activation process in one stage given the less stages involved in AC production with attractive properties to be used in adsorption processes.

*Keywords:* Adsorption, thermochemical degradation, activated carbon, used tires, porosity.

---

<sup>†</sup>Autor al que se le dirige la correspondencia:  
Tel. (+57 4) 448 83 88 ext. 14029.  
E-mail: [mariluz.betancur@upb.edu.co](mailto:mariluz.betancur@upb.edu.co) (Mariluz Betancur).

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los residuos que más caracterizan no sólo a las sociedades desarrolladas modernas, sino también de los países emergentes, son los neumáticos usados. Aunque es cierto que en principio estos residuos no generan ningún peligro inmediato, la producción en grandes cantidades sin ningún tipo de gestión adecuada y eficaz consideran una grave problemática desde la perspectiva de disposición de residuos ([Sánchez, 2012](#)).

En la actualidad, la población mundial ha superado la barrera de los 7 mil millones de habitantes, repartidos en aproximadamente 200 países. Estos países no sólo se enfrentan a la proliferación de desechos provenientes de neumáticos usados (por el aumento en el uso del automóvil) sino también de diferentes residuos sólidos urbanos. El automóvil se ha convertido en un medio indispensable de transporte para muchos hogares en todo el mundo y como resultado, cerca de 1400 millones de neumáticos nuevos se venden cada año en el mundo, generando en promedio alrededor de 1000 millones de neumáticos usados, que en unidades en peso, se traduce aproximadamente en 17 millones de toneladas ([Martínez et al., 2013](#)).

En 2010, la UE generó en torno de 4.5 millones de toneladas de neumáticos, representando el 26.5% de la producción mundial. De esta cantidad, se considera que en el mismo periodo, en torno a 3.2 millones de toneladas de neumáticos usados fueron descartados ([Martínez et al., 2013](#)). Por su parte, Estados Unidos descarta alrededor de 4.6 millones de toneladas anuales ([Hooshmand et al., 2014](#)). En términos generales es posible afirmar que en promedio, en los países desarrollados se genera un neumático anual por persona ([Martínez et al., 2013](#)).

En Colombia, se estima una generación anual promedio de 110.000 ton ([Arias, 2015](#)) en la que una parte importante son quemados a cielo abierto con el fin de extraer el entramado metálico o, incinerados en hornos industriales para aprovechar su contenido energético ([Marín, 2012](#)). Aunque recientemente ha habido una gestión importante para ser utilizados como combustible en plantas cementeras, se estima que la mayoría de los neumáticos generados en el país son almacenadas en depósitos clandestinos y espacios públicos con graves consecuencias en

términos ambientales, económicos y sanitarios ([Costa, 2010](#)). En este sentido, la disposición de neumáticos usados en lugares no autorizados sin el debido control ambiental, promueve el crecimiento de plagas e insectos, además de un alto riesgo de incendio, que de ocurrir consideraría serias dificultades para extinguir, además del alto impacto ambiental debido a las emisiones no controladas de compuestos potencialmente perjudiciales a la salud y el ambiente en la atmósfera, el suelo y las aguas subterráneas ([Martínez et al., 2013](#)).

La incorrecta gestión de los neumáticos usados que lleva a este tipo de contaminación ambiental, se ha convertido en un serio desafío tecnológico, económico y ecológico debido a que el neumático es diseñado para soportar condiciones mecánicas y de temperatura extremas, que lo convierten en un material altamente resistente a la biodegradación, la descomposición fotoquímica y la acción de agentes químicos entre otros. Una de las alternativas para resolver este problema es el reciclaje y la reutilización de los neumáticos usados ([Martínez et al., 2013](#); [Mui et al., 2004](#)).

A través de los años, algunos investigadores han venido aplicando técnicas como la licuefacción, la desvulcanización y diferentes tratamientos termoquímicos como la combustión, la pirólisis y la gasificación con el fin de aprovechar su elevado poder calorífico (comprendido entre 30 y 44 MJ/kg). En esta dirección, la pirólisis de neumáticos usados es considerada como la ruta termoquímica para la obtención de líquidos combustibles y materiales carbonosos con alta potencialidad no sólo para ser usados como combustible sólido sino también como precursores de materiales altamente porosos que presentan un alto abanico de posibilidades. Es así como existen diversos y diferentes trabajos relacionados con la obtención de carbones activados (CAs) utilizando diferentes metodologías, entre las que se destacan aquellas que llevan a cabo una etapa previa de pirólisis con posterior activación física (gasificación) usando H<sub>2</sub>O y/o CO<sub>2</sub>, ([Mui et al., 2004](#)) así como otras que ejecutan la activación directa sin etapa previa de desvolatilización ([Betancur, 2010](#)).

Investigadores como [Lehmann et al. \(1998\)](#), [Ogasawara et al. \(1987\)](#), [Teng et al. \(1995\)](#) y [Betancur et al. \(2009\)](#) han reportado sobre la posibilidad de obtener una matriz carbonosa con

buenas características de porosidad a partir de neumáticos usados sin etapa previa de desvolatilización. En sus experimentos, el proceso de activación de los neumáticos fue realizado variando los tiempos de residencia, la temperatura de la reacción y los flujos del agente gasificante (H<sub>2</sub>O y/o el CO<sub>2</sub>). Los resultados obtenidos en este tipo de transformaciones, sin etapa de desvolatilización, pueden ser comparados en términos de las propiedades de textura (área superficial y porosidad) con los procesos que bajo las mismas condiciones experimentales tienen en cuenta una etapa previa de desvolatilización (pirólisis) antes de la activación propiamente dicha. Con lo anterior, se muestra que el proceso de activación física sin etapa de desvolatilización (en una sola etapa) presenta una serie de ventajas en términos de versatilidad dada las menores etapas involucradas en el proceso.

En términos generales el procedimiento de activación física en una sola etapa presenta una mayor probabilidad de ser aplicado a escala industrial, debido fundamentalmente al menor tiempo requerido para llevar a cabo el proceso y su menor demanda energética. En contraste, el proceso en dos etapas precisa realizar inicialmente la liberación de la materia volátil presente en el neumático (proceso endotérmico) y posteriormente la activación a temperaturas elevadas (proceso igualmente endotérmico).

Por otro lado, el CA producido a partir de neumáticos usados es una opción para la remoción de contaminantes generados por muchas industrias con descarga de aguas residuales. Una solución doblemente eficaz para este tipo de contaminaciones ambientales es convertir los neumáticos usados en materiales carbonosos con propiedades de adsorción. Por un lado, se usa un residuo de difícil disposición y por otro lado, se obtiene un material adsorbente de alta potencialidad para el sector ambiental ([Saleh, T., Gupta V.K., 2014](#)).

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación se basa en la continuación de las investigaciones para el aprovechamiento de los neumáticos usados en la producción de CA por medio de la transformación termoquímica con CO<sub>2</sub> en una sola etapa con el objetivo de compararlo y analizarlo con los carbones obtenidos por gasificación con CO<sub>2</sub> considerando

etapa previa de desvolatilización (proceso en dos etapas).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Degradación termoquímica

La degradación termoquímica de los neumáticos usados se realizó en un reactor de lecho fijo construido en acero inoxidable 316, de ¾" de diámetro nominal, provisto con un horno eléctrico y un controlador de temperatura PID. Este reactor cuenta con un manómetro para monitorear la caída de presión dentro del sistema.

Se depositaron aproximadamente 17g de neumático triturado en el centro del reactor ubicado dentro del horno. Se alimentó N<sub>2</sub> por 15 min para purgar el sistema y garantizar una atmósfera inerte en el interior del reactor. Posteriormente, se ajustó la temperatura del sistema a 900°C, y se alimentó CO<sub>2</sub> durante 180 min (3 horas) con un flujo volumétrico de 100 mL/min. Los flujos volumétricos fueron controlados con los rotámetros adecuados para cada gas conectado al reactor. Finalmente, se dejó enfriar el sistema y se pesó la muestra resultante para calcular el % de conversión de la activación y el rendimiento de las fracciones producidas (sólidos, líquidos y gases, este último calculado por diferencia).

El porcentaje de conversión obtenido se calculó haciendo uso de la ecuación (1).

$$\% \text{Conversión} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \cdot 100 \quad (1)$$

donde  $w_1$  es el peso de la muestra inicial (peso del neumático) y  $w_2$  es el peso de la muestra final (peso del CA).

Este trabajo pretende la comparación entre CAs producidos tanto en una como en dos etapas. La metodología para la producción del primero fue mencionada anteriormente, mientras que el CA en dos etapas fue producido previamente durante el desarrollo de una tesis doctoral realizada en conjunto entre el Grupo de Investigaciones Ambientales y el Instituto de Carboquímica ([Betancur, 2010](#)). El carbonizado se obtuvo en una planta de pirólisis en continuo diseñada por personal científico del Instituto de Carboquímica en Zaragoza, España. Detalles técnicos de la

instalación se encuentran en (Aylón et al., 2010). Las condiciones de operación fueron las siguientes: temperatura de 600 °C, presión atmosférica, tiempo de residencia de 3.5 min, flujo de N<sub>2</sub> de 5 L<sub>N</sub>/min y una alimentación de neumáticos de 4 kg/h.

La etapa de activación fue realizada en un reactor de lecho fijo, para lo cual se utilizaron 17g de carbonizado, en atmósfera combinada de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (80/20 vol. %) a un flujo volumétrico de 5 L<sub>N</sub>/min. El reactor con el flujo del gas inerte fue calentado hasta alcanzar una temperatura de 900°C, para posteriormente alimentar CO<sub>2</sub> hasta un tiempo de reacción determinado para cada experimento (10 horas). Una vez alcanzado el tiempo final, se cerraba el flujo de CO<sub>2</sub> y se procedía a enfriar el reactor con el fin de detener la reacción y posteriormente determinar la conversión (Betancur, 2010).

## 2.2. Caracterización de la materia prima y el carbón activado

Tanto las materias primas como los CAs obtenidos por ambos métodos fueron caracterizados tal y como se describe a continuación:

*Análisis elemental:* Este análisis, también llamado análisis último, determina el contenido de la muestra por elementos: carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S), siendo el oxígeno usualmente determinado por diferencia. Este tipo de análisis es sumamente versátil y puede aplicarse a una amplia variedad de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas, requiriendo para ello cantidades relativamente pequeñas de muestra (Idriss, 2012). Este análisis fue realizado tanto para la materia prima como para los CAs obtenidos, a partir de un equipo Carlo Erba-1108.

*Análisis inmediato:* Esta técnica, conocida también como análisis próximo, se realiza para determinar los porcentajes de humedad, ceniza y materia volátil de las muestras. La determinación de cada porcentaje se realiza según la norma ASTM 2867-09, ASTM 2866-11 e ISO-5623-1974 respectivamente, siendo el carbono fijo determinado por diferencia.

*Área superficial BET:* El método BET se utiliza para la determinación de la superficie específica

de sólidos porosos. Durante el proceso de adsorción física, a presiones relativas bajas, los primeros sitios cubiertos son los más energéticos, los cuales corresponden a los poros de menor diámetro. Este método se aplica a los datos obtenidos en la isoterma de adsorción de N<sub>2</sub> y permite una primera caracterización de sólidos porosos a partir del cálculo de la capacidad de adsorción en monocapa (Brunauer S. et al, 1938), con la ecuación (2).

$$\frac{P}{n(P_0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C - 1}{n_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2)$$

donde  $P_0$  es la presión de saturación (Pa),  $P$  es la presión parcial de N<sub>2</sub> (Pa),  $n$  es la cantidad de N<sub>2</sub> adsorbida para cada presión relativa  $P/P_0$ ,  $n_m$  es la capacidad de adsorción de la monocapa (moles),  $C$  es la constante de la ecuación de BET que está relacionada exponencialmente con el calor de adsorción de la primera monocapa y en consecuencia su valor es un indicativo de la magnitud de las interacciones entre el adsorbente y el adsorbato. Esta prueba fue realizada en un equipo Micromeritics ASAP.

*Porosimetría de mercurio:* La porosimetría de mercurio revela información sobre la porosidad y la distribución de poros de un sólido en la región de los macroporos y mesoporos. El principio de la técnica se basa en forzar, bajo una presión creciente, la entrada del mercurio en los poros más pequeños (Idriss, 2012). Esta técnica se realizó en un porosímetro de mercurio Pore Master de Quantachrome.

*Microscopía electrónica de barrido (SEM):* La microscopía electrónica barrido está destinada principalmente a la observación superficial de materiales y proporciona una valiosa información acerca de la textura, tamaño y forma del material analizado. La aplicación de esta técnica aporta una información complementaria sobre la porosidad, en particular de los poros que están directamente abiertos al exterior (Idriss, 2012). Este análisis fue realizado a partir de un microscopio SEM-EDX Hitachi S-3400N.

*Método de Boehm:* Con el método Boehm es posible determinar los grupos funcionales superficiales en una muestra carbonosa que contiene oxígeno. El método usa bases de distinta fortaleza asumiendo que el bicarbonato sódico (NaHCO<sub>3</sub>) neutraliza ácidos carboxílicos, el carbonato sódico (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) neutraliza grupos



carboxílicos y lactónicos, el hidróxido sódico (NaOH) neutraliza ácidos carboxílicos, lactonas y fenoles, mientras que el etóxido sódico (NaOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) reacciona con todas las especies oxigenadas, incluso los ácidos extremadamente débiles ([Boehm, 1996](#)). El procedimiento empleado se describe brevemente a continuación:

*Grupos básicos:* Se pesa un gramo de muestra y se coloca en contacto con 50 mL de una solución de HCl 0.1 mol/L en un erlenmeyer cerrado y saturado con atmósfera de N<sub>2</sub>. Posteriormente, se mantiene en agitación a 25 °C durante 48 horas. Después se filtra la mezcla, y se toma una alícuota de 25 mL del filtrado y se titula con una solución de NaOH 0.1 mol/L ([Boehm, 1996](#)). El procedimiento se realizó por triplicado.

La cuantificación (mmol/mg) de los grupos básicos “Q<sub>B</sub>” es calculada a partir de la ecuación (3).

$$Q_B \left( \frac{\text{mmol}}{\text{mg}} \right) = \frac{(V_b - V_{am}) \cdot f_c \cdot M \cdot V_e}{V_{al} \cdot m} \quad (3)$$

donde  $V_b$  es el volumen gastado para titular el blanco (mL),  $V_{am}$  es el volumen para titular la muestra (mL),  $f_c$  es el factor de corrección de la solución de NaOH,  $M$  es la concentración de NaOH,  $V_e$  es el volumen de la solución de HCl utilizado (mL),  $V_{al}$  es el volumen de la alícuota del filtrado (mL) y  $m$  la cantidad de muestra (g).

*Grupos carboxílicos:* Se pesa un gramo de la muestra y se pone en contacto con 50 mL de solución de NaHCO<sub>3</sub> 0.1 mol/L en un erlenmeyer saturado con atmósfera de N<sub>2</sub>. Posteriormente, se mantiene en agitación a 25 °C durante 24 horas. La mezcla se filtra y a una alícuota de 25 mL se le adiciona 40 mL de HCl 0.1 mol/L. Esta solución se somete a calentamiento para eliminar el ácido carbónico formado, posteriormente se enfría a temperatura ambiente para ser titulada con una solución de NaOH 0.1 mol/L. El procedimiento se realizó por triplicado.

*Grupos lactónicos:* Se pesa un gramo de la muestra y se coloca en contacto con 50 mL de solución de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.05 mol/L en un erlenmeyer y saturado con atmósfera de N<sub>2</sub>. Luego se mantiene en agitación a 25°C durante 24 horas. La mezcla se filtra y a una alícuota de 25mL se le adiciona 40 mL de solución de HCl 0.1 mol/L.

Esta solución se somete a calentamiento para eliminar el ácido carbónico formado y posteriormente se enfría a temperatura ambiente para ser titulada con una solución de NaOH 0.1 mol/L saturada con N<sub>2</sub>.

*Adsorción de Níquel:* Los experimentos de adsorción de los iones de Níquel se realizaron en un proceso discontinuo. Se utilizaron reactivos de calidad analítica y se preparó una solución patrón de concentración de 1000 ppm mediante la disolución de Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O en agua desionizada. El equipo utilizado para realizar el experimento de adsorción en discontinuo consistió en un Shaker (DIMAQ). Las concentraciones de iones de Ni (II) en solución se determinaron por medio de un espectrofotómetro de adsorción atómica ICE 3000 Series AA Spectrometers.

El procedimiento para realizar esta experimentación, consistió en colocar en recipientes herméticamente cerrados 0.25 g de muestra del CA y 25 mL de una solución de Níquel de concentración igual a 20 ppm en el Shaker (DIMAQ), con el fin de agitar los sistemas adsorbato-adsorbente y el blanco. Los ensayos se realizaron a 150 rpm, a una temperatura de 28 °C por un periodo de 24 horas, el diámetro de partícula del CA fue de 0.2<dp<0.4mm. Los ensayos de adsorción se llevaron a cabo a un pH igual a 6.0 (el pH de las suspensiones se registró al inicio y al final). Una vez alcanzado el equilibrio, las suspensiones se filtraron y se determinó la concentración de equilibrio en solución de las especies metálicas ([Betancur, 2010](#)). Este procedimiento fue igualmente realizado por triplicado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de la materia prima

La [Tabla 1](#) muestra los análisis elemental e inmediato para los neumáticos usados considerados en los procesos de obtención de CA, tanto para el obtenido en una sola etapa como el producido en dos etapas. Como es posible observar, ambos neumáticos presentan contenidos comparables de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre, con diferencias relevantes en el contenido de cenizas (el contenido presente en el neumático utilizado para la activación en dos etapas (6.66%)

es casi el doble del contenido presente en el neumático usado en una etapa (3.60%). Por otro lado, el contenido de carbono fijo, atribuido al negro de carbón utilizado en la manufactura del neumático, es comparable para los dos tipos de neumáticos (30%). Esta fracción es el material precursor para la obtención de CA, ya que considera la matriz sólida carbonosa donde se desarrolla la estructura porosa necesaria en los procesos de adsorción (Peláez, 2005).

Tabla 1. Análisis Elemental e inmediato de la materia prima utilizada en los procesos termoquímicos

Análisis	MP (1 Etapa)	MP (2 Etapas)
<b>Elemental (% en peso, base seca)</b>		
Carbono	84.0	81.72
Hidrógeno	7.19	6.54
Nitrógeno	0.49	0.55
Azufre	1.42	1.67
Oxígeno (determinado por diferencia)	3.27	2.81
<b>Inmediato (% en peso, base húmeda)</b>		
Humedad	0.8	0.71
Cenizas	3.60	6.66
Volátiles	65.60	62.60
Carbono Fijo	30.00	30.03

De igual forma, el contenido de material volátil, el cual se asocia principalmente con los contenidos de hidrógeno y carbono orgánico presentes fundamentalmente en el material polimérico (Betancur, 2010), son comparables para los dos tipos de neumáticos. Los contenidos de volátiles y de carbono fijo presentes en este tipo de material hacen interesante, su utilización no sólo para su uso como combustible, sino también para la obtención de diferentes fracciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos, de alto valor añadido, a partir del proceso termoquímico de la pirólisis.

Comparando los resultados obtenidos con los reportados por algunos investigadores, se encuentra que en la mayoría de los estudios el contenido en masa de carbono en el neumático es superior al 80%. La composición del neumático obtenida en este estudio, 84.0%, es similar a la reportada por Li et al (2005) y Ariyadejwanich et al. (2003), mientras que otros autores como

Lehmann et al. (1998) reportaron un valor del 87%. Asimismo, es posible encontrar mayores valores, como las publicadas por Teng et al. (1995), y Murillo et al. (2006), quienes obtuvieron composiciones de carbono en torno al 88%. Este alto porcentaje de carbono en el neumático sugiere que este tipo de materiales presenta buenas características para ser considerado como precursor de CA.

Así pues, comparando los resultados para las materias primas utilizadas para la producción de CA, tanto para el proceso en una sola etapa como para el proceso en dos etapas, se puede observar que para el análisis elemental las diferencias pueden ser consideradas como mínimas. Por otro lado, y a partir del análisis inmediato, se observa que la diferencia sustancial radica en el contenido de cenizas.

### 3.2. Resultados para el carbón activado

#### Resultados degradación termoquímica

En la degradación termoquímica de neumáticos usados se obtuvieron tres productos: sólidos, líquidos y gaseosos; la Tabla 2 presenta los resultados para el porcentaje de conversión de los neumáticos usados, determinado a partir de la ecuación (1), así como los porcentajes de producción de cada uno de los productos obtenidos mencionados anteriormente.

Tabla 2. Porcentaje de conversión y producción

Ensayo	1	2	3	Promedio
% Conversión	78.1	77.5	78.2	78.0
<b>% Producción</b>				
% Sólidos	21.9	22.5	21.8	22.0
% Líquidos	46.4	49.9	47.6	48.0
% Gases	31.7	27.6	30.6	30.0

Para las condiciones experimentales utilizadas se obtuvo en promedio una conversión de 78% (entendida como el porcentaje de desvolatilización). Esta conversión se puede ver favorecida cuando se realiza el proceso a mayores temperaturas y con altos tiempos de activación. Por otro lado, se observa que la menor producción entre las fracciones resultantes, es la de sólidos, esto debido a que el proceso se realizó en presencia de un agente oxidante a altas temperaturas que además de favorecer la liberación de la materia volátil presente en el

neumático, puede conducir a una cierta oxidación del carbono fijo (Betancur et al., 2009). Bajo este esquema se disminuye la producción de sólidos y favorece la producción de líquidos y gases (Murillo et al., 2005).

Estos resultados son comparables con los reportados en la literatura por Betancur et al. (2009), quienes obtuvieron una conversión del 73%, en un estudio de producción de CA sin etapa previa de pirólisis. Asimismo, estos autores reportaron porcentajes de producción de sólidos, líquidos y gaseosos (valores de 25%, 48% y 26% respectivamente) similares a los obtenidos en esta investigación (ver Tabla 2). Las variaciones encontradas entre ambos estudios se atribuyen a las condiciones experimentales utilizadas (tiempo de residencia del sólido en el interior del reactor, cantidad de muestra utilizada) y a las diferencias presentes en la materia prima empleada.

Otros investigadores como Ogasawara et al. (1987), y Lehmann et al. (1998), obtuvieron rendimientos entre 4-9% utilizando H<sub>2</sub>O como agente activante, mientras que Teng et al. (1995) reportó rendimientos de 16% activando con CO<sub>2</sub>. Dichos valores están por debajo del rendimiento obtenido en esta investigación el cual fue de 22%, lo cual demuestra la influencia del agente activante y la materia prima en el proceso de activación. Al realizar la activación con CO<sub>2</sub>, se tiene por un lado las condiciones necesarias para favorecer la liberación de los compuestos volátiles presentes en el neumático (< 500°C). A mayor temperatura el CO<sub>2</sub> se vuelve reactivo y permite la gasificación de la matriz sólida resultante en la desvolatilización previa, dando lugar a la formación de porosidad en función del tiempo de reacción establecido.

#### *Resultados caracterización de carbón activado*

A través del análisis elemental presentado en la Tabla 3, se observa que después de la activación el contenido de carbono es superior al 80% (incluso el carbono fijo), debido a la reorganización de elementos en el material, después que los compuestos volátiles fuesen liberados de la estructura carbonosa del neumático a la vez que se genera porosidad. Asimismo, se puede apreciar en la Tabla 3 que ambos CAs presentan bajos contenidos de hidrógeno, lo que da indicios del buen grado de desvolatilización alcanzado a partir de cada proceso. Es posible que en dicha

desvolatilización, se contribuya a la formación de porosidad para que dicho residuo presente características semejantes a las de los carbones activados (Betancur, 2010).

Tabla 3. Resultados análisis elemental e inmediato para ambos procesos termoquímicos

Análisis	CA 1 Etapa	CA 2 Etapas
<b>Elemental (% en peso, base seca)</b>		
Carbono	83.87	82.52
Hidrógeno	0.12	0.63
Nitrógeno	0.19	0.43
Azufre	2.90	3.33
<b>Inmediato (% en peso, base húmeda)</b>		
Humedad	1.78	1.03
Cenizas	12.69	14.09
Volátiles	1.71	4.16
Carbono Fijo	83.82	80.72

Por otro lado, algunos investigadores han sugerido que el azufre presente en la materia prima es relativamente estable, incluso después de someterlo a una alta temperatura en atmósfera inerte; por lo que es realmente difícil su eliminación del CA (Bandosz, 2006). Como resultado, para los dos CAs, el porcentaje para el contenido de azufre se fue incrementando sustancialmente en comparación al presentado por la materia prima. De acuerdo con varios autores, el azufre presente en la fracción sólida resultante después de la desvolatilización aparece a partir de la formación de sulfuros metálicos, principalmente sulfuro de zinc (Darmstadt et al., 1995; Piskorz et al., 1999).

El contenido de cenizas que se muestra en la Tabla 3, hace referencia a los compuestos inorgánicos que quedan en el CA después del proceso de gasificación (activación). En ambos procesos este contenido aumentó respecto al valor reportado para la materia prima inicial después de la activación, dada la desvolatilización de los compuestos volátiles (12.69% y 14.09%, para los procesos llevados a cabo en una y dos etapas, respectivamente). Estas cenizas afectan considerablemente la capacidad de adsorción de los CAs, ya que ocupan un lugar que no ofrece porosidad.

La capacidad de adsorción de los CAs está determinada por su estructura porosa, y la composición química correspondiente a los

grupos funcionales presentes en su superficie. La distribución del tamaño de poro, área superficial específica BET, volumen de mesoporos ( $V_{\text{meso}}$ ), volumen de microporos ( $V_{\text{micro}}$ ) y volumen total de poro ( $V_T$ ), fue determinado a partir de isothermas de adsorción y desorción de  $N_2$  (77K); en la [Tabla 4](#) se presentan los resultados para los CAs obtenidos a partir de ambos procesos termoquímicos. Para los cálculos del área superficial y el volumen de poros respecto al radio, fueron utilizados el método MULTIPOINT BET y la ecuación BJH respectivamente.

Tabla 4. Parámetros texturales de los carbones activados obtenidos

Propiedad	CA 1 Etapa (3h)	CA 2 Etapas (10h)
$S_{\text{BET}}$ ( $m^2/g$ )	418.2	648.2
$V_T$ ( $cm^3/g$ )	0.93	0.58
$V_{\text{meso}}$ ( $cm^3/g$ )	0.58	0.51
$V_{\text{micro}}$ ( $cm^3/g$ )	0.092	0.094

Teniendo en cuenta que el  $H_2O$  presenta una cinética de reacción más rápida que el  $CO_2$ , el área superficial específica BET encontrada en este trabajo es comparable con los estudios de activación realizados por diferentes investigadores; por ejemplo, [Ogasawara et al. \(1987\)](#), sin una etapa previa de pirólisis, encontraron un CA con una área superficial específica BET de  $1260 m^2/g$ , en una atmósfera de He y  $H_2O$  a  $900^\circ C$  durante 1h; sin embargo, obtuvo un rendimiento de sólo 9% en peso de la muestra original de neumático.

También, sin considerar etapa previa de desvolatilización, [Lehmann et al. \(1998\)](#), reportaron un área superficial específica BET de  $690 m^2/g$  a  $900^\circ C$ , durante 120 min de tiempo de reacción y en atmósfera de  $H_2O$ . Por otro lado, el valor reportado por [Betancur et al. \(2009\)](#), para el área superficial en los experimentos sin etapa previa de pirólisis fue de  $414 m^2/g$  con 180 min de tiempo de activación y flujo volumétrico de  $CO_2$  de  $150 mL/min$ . En general, el valor obtenido en la presente investigación ( $418.2 m^2/g$ ) se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para CAs obtenidos a partir de neumáticos usados ( $400-1000 m^2/g$ ) ([Mui et al., 2004](#)), corroborando así que las propiedades de

textura obtenidas pueden compararse en términos de área superficial con los CAs con etapa previa de pirólisis.

Asimismo, es importante resaltar que el tiempo de activación juega un papel importante en la estructura porosa y el área superficial de un CA obtenida a partir de un proceso de activación física. Lo anterior se observa comparando estas condiciones con el área superficial alcanzada en ambos procesos; mientras que el obtenido en una etapa y 3 horas de tiempo de residencia es de  $418.2 m^2/g$ , el producido en dos etapas alcanza  $648.2 m^2/g$  para un tiempo de residencia de 10 horas. Como es posible prever, la relación entre el tiempo de activación y el área superficial específica BET es directamente proporcional aunque debe alcanzar un máximo en el que posteriormente, mayores tiempos de activación favorecerán una estructura cada vez más macroporosa que tenderá a disminuir el área superficial.

La [Fig. 1](#) muestra las isothermas de adsorción de  $N_2$  (77K) correspondientes a los CAs en ambos procesos termoquímicos con  $CO_2$  a  $900^\circ C$ . Para el caso del CA obtenido en dos etapas, se muestra adicionalmente isothermas de CAs producidos a diferentes tiempos de residencia (6, 8 y 10 horas). De modo general, se observan características similares de adsorción entre el CA en dos etapas durante 6 horas y el CA en una etapa obtenido en 3 horas. Además, las isothermas obtenidas en los dos procesos estudiados muestran que con el aumento en el tiempo de residencia del sólido en el reactor se produce un aumento en el volumen adsorbido de  $N_2$  a valores bajos de la presión relativa. En conclusión, las isothermas obtenidas confirman que bajo las condiciones estudiadas, la temperatura y el tiempo de activación favorecen el desarrollo de la porosidad.

Con respecto a la clasificación de las isothermas, se observan comportamientos combinados entre los tipos II y IV; debido al punto de inflexión al inicio de la isoterma y el ciclo de histéresis. Los comportamientos muestran el incremento en la cantidad adsorbida de  $N_2$  a medida que aumenta la presión relativa del gas y la presencia de macroporos (Tipo II) y, finalmente que los carbones presentan un buen desarrollo de estructuras mesoporosas (Tipo IV) puesto que en las isothermas se visualiza el bucle de histéresis en la rama de desorción ([Betancur, 2010](#)).



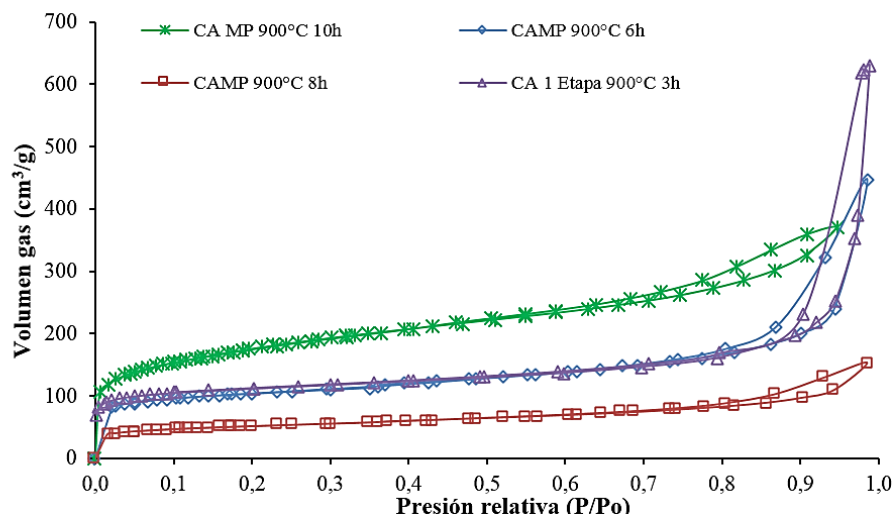


Fig. 1. Isotermas de adsorción - desorción de  $N_2$  a 77 K para los CAs obtenidos en una y dos etapas.

El CA obtenido tendrá su aplicación según el tamaño de las moléculas del adsorbato. A partir de los resultados mostrados en la Tabla 4, el volumen total de microporos es muy bajo para ambos carbones (alrededor de  $0.09 \text{ cm}^3/\text{g}$ ), mientras que el volumen de mesoporos obtenido para el CA producido en una etapa ( $0.58 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) es similar al obtenido para dos etapas ( $0.51 \text{ cm}^3/\text{g}$ ). Ambos CAs presentan una estructura mayoritariamente mesoporosa, siendo, para el caso del obtenido en una sola etapa, un 60% de la porosidad total del material. Aunque este valor se encuentra por debajo del rango reportado por la literatura (entre  $0.6\text{-}1.3 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) ([Ariyadejwanich et al., 2003](#)), vale la pena mencionar que esta distribución de tamaños de poro depende marcadamente del proceso de obtención del CA y se puede mejorar a partir de las variables involucradas en el proceso. De acuerdo a lo anterior, el CA producido en este trabajo, podrá ser utilizado en procesos de remoción para partículas entre 2 y 50 nm

La capacidad de adsorción de moléculas de tamaño diferente se determina a través de la porosimetría de mercurio la cual es una herramienta que arroja resultados valiosos para muestras con características de mesoporosidad y macroporosidad. La distribución de tamaño de poro calculado a partir de esta técnica (ver [Fig. 2](#)), muestra que existe un tamaño de poro característico entre 10 y 30 nm para todas las muestras, lo cual confirma la presencia de mesoporos para los CAs obtenidos en una y dos etapas, como sugiere la [Tabla 4](#).

Por otro lado, la [Tabla 5](#) muestra los resultados del porcentaje de mesoporosidad ( $E_p$ ) y la densidad aparente ( $\delta_{\text{Aparente}}$ ) arrojados por porosimetría de mercurio para los dos CAs que este estudio compara. El valor encontrado para el CA obtenido en una sola etapa (66%) es del mismo orden que el valor encontrado por la técnica de área superficial específica BET, verificándose con esto la estructura predominantemente mesoporosa del CA obtenido en una sola etapa.

Tabla 5. Resultados del porcentaje de porosidad y densidad aparente obtenida de la porosimetría de mercurio

Parámetro	CA 1 Etapa	CA 2 Etapas
$E_p$ (%)	66	78
$\delta_{\text{Aparente}}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	378.2	343.8

En contraste, el desarrollo de mesoporosidad es más marcado en la activación en dos etapas ya que alcanza hasta un 78% de porosidad; atribuido al mayor tiempo de activación empleado que para el caso favoreció el desarrollo de una estructura mesoporosa. Por otro lado, la densidad aparente es un parámetro importante para los adsorbentes y las diferencias que se presentan en ambos procesos termoquímicos son muy pequeñas y perfectamente atribuibles a las variaciones que conllevan trabajar con sólidos de naturaleza heterogénea ([Aranda, 2010](#)).

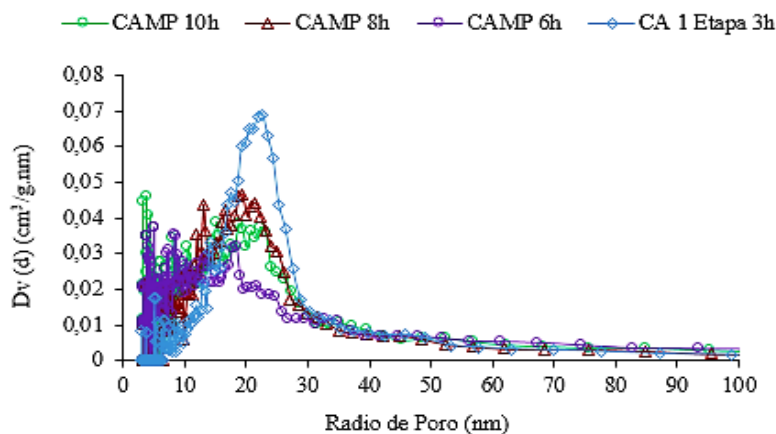


Fig. 2. Distribución de tamaño de poros obtenida a partir de porosimetría de mercurio para los CAs obtenidos en una y dos etapas.

Los valores de porosidad y de densidad aparente de los CAs comparados en este estudio se asemejan a los obtenidos por otros investigadores en procesos de activación de dos etapas donde reportan valores entre 64 y 74% y de 386 kg/m<sup>3</sup> respectivamente ([Aranda, 2010](#)).

Para poder apreciar con mayor nitidez la morfología del CA obtenido, se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido. La [Fig. 3](#) muestra las imágenes obtenidas por esta técnica, para la superficie del CA producido en una etapa. Se observa una distribución de grano heterogénea y una estructura interna lisa, así como la presencia de macro y mesoporos. El desarrollo de esta porosidad se explica a partir de un doble fenómeno; en primer lugar, se crean microporos estrechos y, a continuación, estos microporos estrechos crecen para producir poros más amplios llegando a convertirse en meso y macroporos.

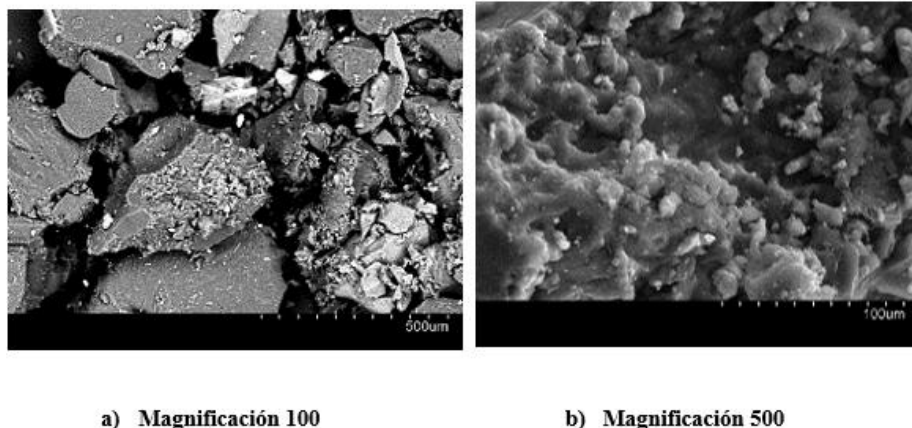
La caracterización de los grupos superficiales de las muestras de CA se presenta en la [Tabla 6](#). Tal y como se mencionó anteriormente, los grupos superficiales se cuantificaron por medio del método de Boehm. El pH durante la experimentación se midió tanto al inicio como al final, encontrándose variaciones despreciables, lográndose mantener dentro del rango reportado en la literatura de 5 a 7 ([Basso et al., 2002](#)). La adsorción de iones metálicos en soluciones acuosas depende del pH de la solución y es

eficiente por debajo del pH de precipitación del metal ([Kadirvelu et al., 2001](#)). Los sitios de tipo ácido analizados fueron los grupos carboxílicos, fenólicos y lactónicos. Además, fueron igualmente considerados los grupos básicos totales.

Tabla 6. Resultados Método de Boehm para ambos procesos termoquímicos

Grupos Funcionales (mmol/g)	CA 1 Etapa	CA 2 Etapas
Básicos	1.01	1.40
Carboxílicos	0.58	0.47
Lactónicos	0.34	0.10
Fenólicos	0.84	0.54

Tal y como se aprecia en la [Tabla 6](#), la concentración de grupos ácidos de 1.76 mmol/g y 1.11 mmol/g para los CAs obtenidos en una y dos etapas respectivamente, que indica una mayor presencia de grupos ácidos en el CA en una etapa. Esta mayor concentración de grupos ácidos permite explicar el comportamiento hidrofílico de los materiales carbonosos, dado que los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua, que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno ([Cantillo, 2012](#)).



a) Magnificación 100

b) Magnificación 500

Fig. 3. Imágenes SEM de los carbones activados en una etapa

En general, estos resultados indican la presencia para ambos CAs de grupos carbonilos y fenólicos. Estos grupos superficiales de oxígeno tienen mayor actividad y definen las características químicas de la superficie del sólido poroso; tienen una mayor afinidad por los iones metálicos los cuales aportan una carga superficial negativa, lo que favorece las fuerzas de atracción entre el ion metálico (como por ejemplo de níquel) y la superficie de CA, incrementando la capacidad de adsorción ([Henaó, 2010](#)).

Finalmente, después de conocer las propiedades texturales de los CAs obtenidos, se evaluó el proceso de adsorción y se obtuvo una remoción del 50% del níquel presente en la solución metálica a partir de una dosis de 0.25g/25mL para el CA en una etapa. Mientras que el CA en dos etapas a partir de la misma dosis logró una remoción del 42%. Los resultados de la adsorción de los CAs obtenidos así como la curva de dosis y la cinética se presentarán en detalle en una futura publicación.

La química de la superficie del CA tiene una gran influencia en el proceso de adsorción y se puede considerar el factor principal en el mecanismo de adsorción en soluciones acuosas diluidas, es por esto que mayor contenido de grupos superficiales de oxígeno aumenta la capacidad de adsorción del metal ([Basso et al., 2002](#)). Lo anterior se evidenció con la presencia en ambos CAs de una cantidad mayor de grupos ácidos.

Se puede concluir que para ambos procesos se encuentran capacidades de adsorción importantes, siendo levemente mayor la capacidad de adsorción del CA en una etapa durante 3 horas. Estos resultados sobre la capacidad de adsorción están de acuerdo con los obtenidos en las isotermas de adsorción de N<sub>2</sub>, donde se encontró que el CA tiene una estructura predominantemente mesoporosa con buenas características de adsorción. Este desarrollo de la estructura mesoporosa y las características químicas de la superficie, permite que sea mayor la capacidad de adsorción de iones de níquel en soluciones acuosas del CA en una etapa. Adicional a esto, el proceso de activación de una sola etapa requiere un menor tiempo de activación, por lo que el proceso puede verse positivamente favorecido desde la perspectiva de eficiencia.

#### 4. CONCLUSIONES

Se realizó la degradación termoquímica de neumáticos usados en un reactor de lecho fijo, sin etapa previa de desvolatilización (pirólisis). De esta manera se obtuvo un CA con un área superficial de 418 m<sup>2</sup>/g y estructura predominantemente mesoporosa.

El CA obtenido en una sola etapa puede ser comparado con el CA obtenido en dos etapas en términos de propiedades de textura. Se comprobó que la porosidad, en términos del volumen del mesoporo, es muy similar (en torno a 0.5-0.6 cm<sup>3</sup>/g), lo cual indica que el tratamiento térmico con CO<sub>2</sub> a 900°C tiene un efecto positivo para la

obtención de un sólido poroso sin etapa previa de desvolatilización. Asimismo, ambos CAs mostraron una capacidad de adsorción de iones de níquel en solución acuosa del 50% y 42%, para los procesos llevados a cabo en una y dos etapas respectivamente.

En general se puede decir que los resultados obtenidos para la activación física en una etapa son satisfactorios y que este proceso termoquímico presenta una gran posibilidad de ser aplicado, debido a que es un proceso con menos etapas que se desarrolla en menor tiempo, en contraste con el proceso de dos etapas.

## REFERENCIAS

- Aranda, M.A. (2010). *Desarrollo de tecnologías de concentración y eliminación de hidrocarburos aromáticos policíclicos. Producción de carbones activados, adsorción cíclica y combustión catalítica*. Tesis Doctoral. (Doctor en Ingeniería Química). Universidad de Zaragoza. Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Arias, M. (2015). Argos utilizará las llantas usadas como combustible. El Colombiano. Noticia del 10 de Febrero de 2015 [ <http://www.elcolombiano.com/argos-utilizara-las-llantas-usadas-como-combustible-HE1251832>], consultado en 2015-06-01.
- Ariyadejwanich, P., Tanthapanichakoon W., Nakagawa K., Mukai S.R. (2003). Preparation and characterization of mesoporous activated carbon from used tires. *Carbon*, **41**: 157–164.
- Aylón, E., Fernández-Colino A., Murillo R., Navarro M.V., García T. y Mastral A.M. (2010). Valorisation of waste tyre by pyrolysis in a moving bed reactor. *Waste Manage*, **30**: 1220-1224.
- Bandosz, T. (2006). Desulfurization on activated carbons. *Interface Sci. Technol*, **7**: 231-292.
- Basso, M.C., Cerrella E.G. y Cukierman A.L. (2002). Activated carbons developed from a rapidly renewable biosource for removal of cadmium(II) and nickel(II) from dilute aqueous solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**: 180-189.
- Betancur, M. (2010). *Obtención de carbón activado a partir de neumáticos usados mediante la incorporación de calcio y su aplicación en procesos de adsorción*. Tesis Doctoral. (Doctor en Ingeniería). Universidad Pontificia Bolivariana. Área Energía y Termodinámica, Medellín.
- Betancur, M., Martínez J.D., y Murillo R. (2009). Production of activated carbon by waste tire thermochemical. *J. Hazard. Mater*, **168**: 882–887.
- Boehm, H. (1996). Chemical Identification of Surface Groups. *Adv. Catal.*, **16**: 179-274.
- Brunauer S, Emmett P, Teller E. (1928). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Am. Chem. Soc.*, **60** (1): 309–319.
- Cantillo, M. (2012). *Preparación de materiales porosos a partir de residuos de llanta por activación química y térmica. Comparación de sus propiedades fisicoquímicas y su capacidad de adsorción*. Tesis de Maestría (Ciencias-Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Bogotá.
- Costa, C. (2010). Decreto 1457 de 2010, En Línea, en [ <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=40063>], consultado en 2013-03-03.
- Darmstadt, H., Roy C. y Kaliaguine S. (1995). Characterization of pyrolytic carbon blacks from commercial tire pyrolysis plants. *Carbon*, **33**: 1449–1455.
- Henao, L.M. (2010). *Adsorción de níquel a partir de carbón activado proveniente de neumáticos usados*. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Química, Medellín.
- Hooshmand Ahoor, A. y Zandi-Atashbar N. (2014). Fuel production based on catalytic pyrolysis of waste tires as an optimized model. *Energ. Convers. Manage*, **87**: 653-669.
- Idriss, A. (2012). *Preparación y caracterización de carbón activado a partir de residuos de biomasa y su utilización en tratamientos de descontaminación del agua*. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Departamento de Química Orgánica e Inorgánica, Badajoz.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi K. y Namasivayam C. (2001). Adsorption of nickel (II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. *Sep. Purif. Technol.*, **24**: 497-505.
- Lehmann, C., Rostam-Abadi M., Rood M.J. y Sun J. (1998). Reprocessing and Reuse of



- Waste Tire Rubber to Solve Air-Quality Related Problems. *Energ. Fuels.*, **12**: 1095-1099.
- Li S.Q. y Q.Yao, S.Y. (2005). Properties of pyrolytic chars and activated carbons derived from pilot-scale pyrolysis of used tires. *J. Air Waste Manage.*, **55**: 1315-1326.
- Marín, B. (2012). En favor del medio ambiente: de llanta vieja a carbón activado. *Revista Universitas Científica.* 32-35.
- Martínez, J.D., Puy N., Murillo R., García T., Navarro M.V. y Mastral A.M. (2013). Waste tyre pyrolysis—A review. *Renew. & Sust. Energ. Rev.*, **23**: 179-213.
- Mui, Edward L.K., Ko Danny C.K. y McKay G. (2004). Production of active carbons from waste tyres—a review. *Carbon*, **42** (14): 2789-2805.
- Murillo, R., Aylón E., Navarro M.V., Callén M.S., Aranda A. y Mastral A.M. (2006). The application of thermal processes to valorise waste tyre. *Fuel Process. Technol.*, **87**: 143-147.
- Murillo, R., Navarro M. V., García T., López J. M., Callén M. S., Aylón E., y Mastral A.M. (2005). Production and application of activated carbons made from waste tire. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**: 7228-7233.
- Ogasawara, S., Kuroda M. y Wakao N. (1987). Preparation of activated carbon by thermal decomposition of used automotive tires. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**: 2552-2556.
- Peláez, A.F. (2005). *Biodegradación y biotrituración de llantas usadas*. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Química, Medellín.
- Piskorz, J., Majerski P., Radlein D., Wik T. y Scott D.S. (1999). Recovery of carbon black from scrap rubber. *Energ Fuels*, **13**: 544–551.
- Saleh, T. y Gupta V.K. (2014). Processing methods, characteristics and adsorption behavior of tire derived carbons: A review. *Adv. Colloid Interfac.*, **211**: 93-101.
- Sánchez, R. (2012). Segunda Vida de los Neumáticos. *Química Viva*, **11** (1): 24-39.
- Teng, H., Serio M.A., Wójtowicz M.A., Bassilakis R. y Solomon P.R. (1995). Reprocessing of used tires into activated carbon and other. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**: 3102-3111.

## SOBRE LOS AUTORES

### Luisa Fernanda Cardona Álvarez

Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. En la actualidad se desempeña como profesional de transferencia en el Grupo de Investigaciones Ambientales de la UPB.

### Mariluz Betancur Vélez

Doctor en Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. En la actualidad se desempeña como Docente Investigador de la UPB en la Facultad de Ingeniería Química, y es líder de la Línea de Gestión y Valorización de Residuos del Grupo de Investigaciones Ambientales.

### Juan Daniel Martínez Ángel

Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad de Zaragoza. En la actualidad se desempeña como Docente Investigador de la UPB en la Facultad de Ingeniería Química.