

ESTADO DEL ARTE DE MÉTODOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE LLANTAS USADAS EN COLOMBIA

REVIEW IN WASTE TIRE MANAGEMENT METHODS USED IN COLOMBIA

Paula Parra Landinez*
Andrés González Vera**
Juan Sandoval Herrera***

Recibido: 15 de agosto de 2017

Aceptado: 4 de octubre de 2017

Resumen

El Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emitió la Resolución 1457 de 2010 con el fin de establecer el sistema de gestión de residuos de llantas usadas en Colombia. Sin embargo, el problema continúa: acumulación sin control, contaminación visual y atmosférica, proliferación de vectores y propagación de enfermedades. En este marco, se realizó la revisión bibliográfica de las alternativas que se están empleando en el país para el manejo de residuos de llantas usadas. Este estudio es la base para desarrollar otras opciones para el uso de estos residuos.

Palabras clave: residuos sólidos, llantas usadas, revisión.

Abstract

Resolution 1457, from Environment Ministry, in 2010, created the waste tire management system, in paper. But, nowadays, problem continues: uncontrolled accumulation, atmospheric and visual pollution, plagues and diseases proliferation. In this context, was made a literature review on the alternatives applied in Colombia. This study is the first step for future researches.

Keywords: solid waste management, waste tire, review.

* Estudiante coinvestigador, programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Grupo de investigación Medio Ambiente y Hábitat, semillero de investigación Valorización de Residuos Sólidos. paula.parra2@estudiantes.uamerica.edu.co

** Estudiante coinvestigador, programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Grupo de investigación Medio Ambiente y Hábitat, semillero de investigación Valorización de Residuos Sólidos. andres.gonzalez12@estudiantes.uamerica.edu.co

*** Docente investigador, ingeniero químico, Programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Grupo de investigación Medio Ambiente y Hábitat, coordinador semillero de investigación Valorización de Residuos Sólidos. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

INTRODUCCIÓN

Se calcula que anualmente se generan alrededor de mil millones de llantas usadas en el mundo (World Business Council for Sustainable Development, 2008). En Europa se generaron en 2008 cerca de 3.4 millones de toneladas (Ramos, Alguacil y López, 2011). En Colombia, según lo expresado en la Resolución 1457 de 2010, del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial:

Se estima para el año 2008 un consumo de 4 493 092 llantas discriminadas así: 1 067 072 llantas de camiones y busetas, y 3 426 020 llantas de automóviles y camionetas. Considerando un promedio de recambio de llantas de 18 meses y unos pesos promedio para carcasas usadas de 7 kg por llanta para auto; de 15 kg para camioneta y de 50 kg para camión, la generación de residuos de llantas de automóvil, camioneta, camión y buseta se estima en 61 000 toneladas al año.

Marín (2012) indica que la producción anual de llantas usadas en Colombia se valora en 200 mil unidades. Aún más, el Decreto 442 de 2015, de la Alcaldía Distrital de Bogotá, afirmó que “en Bogotá se generan más de tres millones de llantas usadas anualmente”. En diciembre de 2015, la Asociación Colombiana de Reencauchadores de Llantas y Afines (ANRE) estimó que habían aproximadamente 11.9 millones de vehículos en Colombia, de los cuales los camiones, tractocamiones, buses y volquetas eran responsables de generar aproximadamente el 40 % de las casi 465 780 toneladas de residuos de llantas anuales (ANRE, 2015).

Los problemas asociados a la acumulación sin control de estos residuos son, entre otros: riesgo bajo de lixiviación de metales en medios ácidos; riesgo alto de liberación de aceites pirólíticos al suelo con daños a fauna y flora; emanación de gases contaminantes como CO, CO₂, NO_x o SO_x, debido principalmente a quemas incontroladas, y riesgo de proliferación de vectores (insectos y roedores) por mala disposición (UNEP y Secretariat of the Basel Convention, 2000).

Existe la necesidad de desarrollar estrategias de gestión de estos residuos, cuya acumulación se manifiesta a diario en las ciudades. Para entender el marco general de la gestión de residuos generados por las llantas, se puede partir los seis criterios establecidos por la Convención de Basilea (UNEP, 2011): 1) prevención (es decir, no generación de residuos), 2) minimización, 3) reutilización, 4) reciclaje, 5) valorización energética y 6) disposición final (que es el criterio menos deseado). Esta jerarquización se muestra en la figura 1:

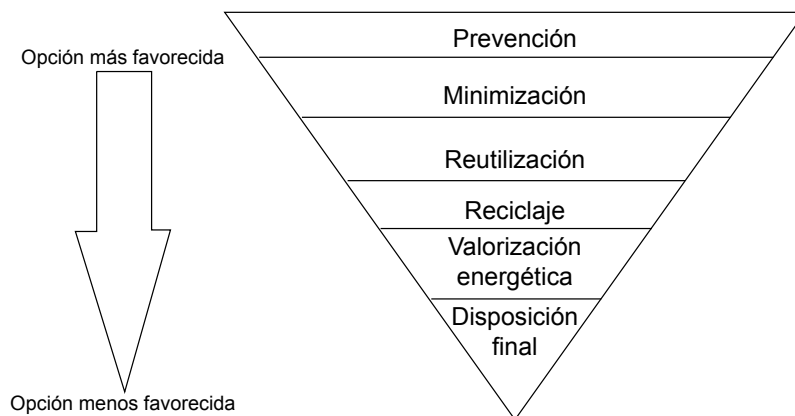


Figura 1. Jerarquía de gestión de llantas usadas.

Fuente: autor basado en datos de UNEP (2011).

En la presente revisión se describen las principales estrategias empleadas en Colombia para la gestión de residuos de llantas usadas, principalmente en los niveles de reutilización, reciclaje y valorización energética, de acuerdo con la Convención de Basilea. El objetivo es presentar un estado del arte del tema que sirva de base para futuras investigaciones.

MARCO TEÓRICO

Diagnóstico

En esta fase se determinan las cantidades, clases y composición de los residuos sólidos generados es la primera etapa de un plan de gestión integral (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994; Decreto 2981, 2013, título III). Asimismo, se identifican y caracterizan los generadores, además del entorno sociodemográfico, y se cuantifican los efectos medioambientales que se están produciendo. Para Bogotá D. C. se encuentran los diagnósticos de la Unión Temporal OCADE (PNUD Colombia, DAMA y OCADE Ltda., 1999) y el de la Universidad Nacional (Suárez, 2009). Algunos provienen de la academia, como el realizado por Díaz, del Castillo y Magri (2011) para la ciudad de Cartagena, o el de Cardozo, Polania y Gonzales (2014) para Ibagué. Incluso, pueden ser más focalizados, como el de Mosquera (2016) para el Siete de Agosto (Bogotá), o el de Bernal y Ovalle (2016) para una zona de Fontibón (Bogotá), sector que ha sido afectado por incendios causados por la mala acumulación de llantas usadas.

Prevención

Aunque el marco legal colombiano no prevé estrategias concretas respecto a la prevención de la generación de estos residuos, salvo el Decreto 442 de 2015 (modificado por el Decreto distrital 265 de 2016), las empresas productoras o comercializadoras de llantas, algunas en asocio con el sector automotor, recomiendan a sus clientes algunas pautas para prolongar la vida útil de las llantas, con lo que se logran dos objetivos: prevenir y minimizar.

Reutilización

En el caso de las llantas usadas, la estrategia de reutilización por medio del reencauchado es la más empleada en Colombia. Este sector cuenta con 81 plantas reguladas en todo el país, de las que el 75 % están certificadas y cumplen con la Norma Técnica Colombiana NTC 5384 (ANRE, 2015).

Aquí se debe diferenciar entre dos términos: el regrabado (*regrooving*) y el reencauchado (*retreading*). El primer proceso consiste en volver a labrar la llanta, es decir, solo se esculpe la banda de rodamiento para prolongar su vida útil; el segundo, es el reemplazo total de la banda de rodamiento sin alterar las características físicas de la llanta. En documentos oficiales se hace hincapié en la protección de las llantas para prolongar su vida útil, como una buena forma para disminuir el impacto ambiental de estos residuos (véase Cámara de comercio de Bogotá, 2006; Unidad de Estudios Económicos de Colfecar, 2015).

Reciclaje

Consiste en aprovechar los componentes de los que están hechas las llantas para darle otros usos. Es un factor necesario para reducir la cantidad de residuos de llantas que finalmente llegan al vertedero o a la incineración (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).

La vía del reciclaje parte del grano de caucho. Posterior a la etapa de trituración mecánica o criogénica, se debe hacer uso del material obtenido, que se conoce como grano de caucho reciclado o GCR¹ (GTR por su sigla en inglés).

Dependiendo del uso posterior, se separa en distintas fracciones, que varían según su tamaño o malla. Cuando se trabaja con grano fino (menor a 1 mm) o incluso medio (hasta 1.5 mm), se puede someter a modificación química superficial, injertado, activación por fotólisis, irradiación por UV, modificación por microondas, entre otros, con el fin de mejorar la compatibilidad del material con otros componentes para obtener mezclas de buena calidad en sus propiedades mecánicas, térmicas o de estabilidad físico química. Estas mezclas pueden realizarse con asfalto para pavimentación o impermeabilización, con polímeros vírgenes y/o reciclados, con otros cauchos sintéticos o naturales, o con arenas y cementos para usos constructivos. Por otra parte, si se desea obtener resinas de intercambio iónico también partiendo de grano fino o medio, el proceso es diferente porque se realiza sin etapas de extrusión o mezclado en molino por rodillos, sino mediante reacciones químicas (Torretta et ál., 2015). En la figura 2 se muestran algunos de estos procesos de reciclaje.

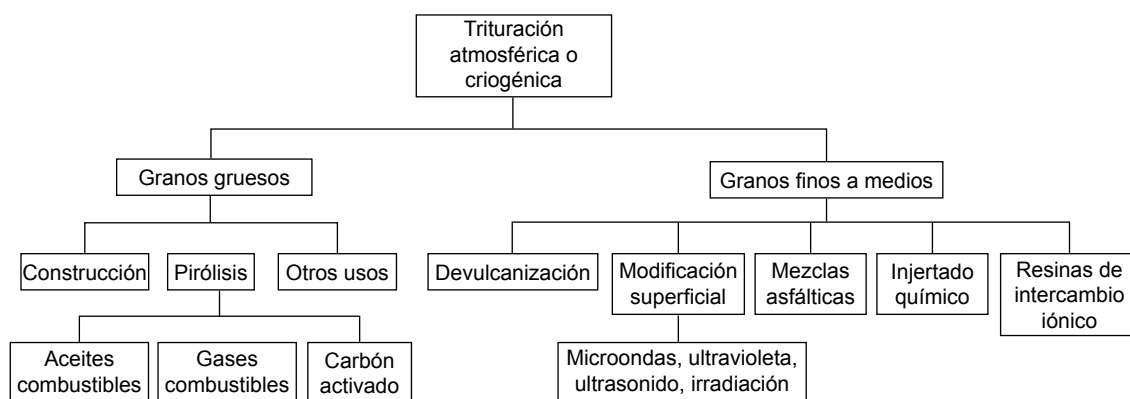


Figura 2. Alternativas de reciclaje de residuos de llantas usadas.

Fuente: basado en Torretta et ál. (2015).

Valorización energética

La pirólisis, la gasificación y la termólisis son las principales formas en las que se puede obtener energía como producto de las reacciones con oxígeno o por efecto de altas temperaturas y/o presiones (Sanguino, Téllez, Escalante y Vásquez, 2009). El poder calorífico de los aceites y gases combustibles obtenidos por pirólisis de residuos de llantas usadas es aproximadamente 41 MJ/kg (Ospina y Villada, 2011), valor superior a otros residuos: cuero: 19 MJ/kg; papel: 17 MJ/kg; madera: 16 MJ/kg. No se considera la incineración dentro de este nivel, sino como forma de eliminación o disposición final (Rincón y Silva, 2014, p. 276).

DESARROLLO DEL TEMA

Trabajos relacionados con mezclas asfálticas en Colombia

El principal antecedente de este tema en Colombia es el informe del Contrato IDU-366-01, desarrollado en convenio con la Universidad de los Andes (IDU-UniAndes, 2002). En este informe

¹ En adelante en este trabajo se usará la abreviatura GCR para grano de caucho reciclado.

se propusieron diversas opciones de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado, y se realizó un estudio detallado de sus propiedades mejoradas. Gran parte de la información disponible en Colombia (tesis y artículos, normas y regulaciones) está relacionada con el tema de mezclas con asfalto para pavimentación (véase Ángulo y Duarte, 2005; Rodríguez, 2005; Figueroa, Sánchez y Reyes, 2007; Figueroa, Fonseca, Amaya y Prieto, 2008; Figueroa-Infante, Fonseca-Santanilla y Reyes-Lizcano, 2009; Camargo y Suárez, 2010; Ramírez, 2011; Rondón-Quintana, Molano-Moray y Tenjo-Lancheros 2012; Moreno, 2013; Pérez, 2014; Ramírez, Ladino y Rosas, 2014; Vargas y Rodríguez, 2014).

La mezcla del asfalto con el GCR se puede realizar de dos formas: vía seca y vía húmeda. Según Ángulo y Duarte (2005), el proceso seco consiste en adicionar el GCR (o los diversos modificantes que se han empleado: corcho, polímeros, etc.), mezclado previamente con los agregados pétreos, al ligante asfáltico en caliente. Por su parte, la vía o proceso húmedo consiste en adicionar el GCR, en porcentajes entre 14 y 20 % en masa (Figueroa-Infante et ál., 2009), al ligante asfáltico previo a la mezcla con los agregados pétreos. En cada proceso existen diversas tecnologías para mejorar la eficiencia. En la tabla 1 se presentan un resumen de algunos resultados encontrados en el país:

Tabla 1. Resultados mezclas asfálticas con GCR (y otros componentes)

Título / tipo / año	Autores	Condiciones	Resultados
Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos (tesis)	Ángulo y Duarte (2005)	Asfalto Usado, penetración 70-80. T: 165-185 °C 45-75 min de modificación 4-12 % de GCR N.º tamiz: 50 – 200 Tres tipos de compatibilizantes (aceite liviano, mediano y pesado)	Asfalto modificado óptimo: a 165 °C, 45 minutos; 8 % en masa de GCR malla 50. Viscosidad del asfalto entre 150 y 190 cP.
Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor (tesis)	Rodríguez (2005)	Asfalto usado, penetración 80-100. Ripio de llanta. Icopor. Ensayos mecánicos (cántabro, de tensión, de fatiga, módulo dinámico elástico, etc.)	La adición de icopor hace más rígida la mezcla. La adición de caucho mejora la resistencia a la fatiga. Es mejor solo con caucho en este aspecto.
Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada (artículo)	Figueroa-Infante, Arnulfo-Sánchez y Reyes-Lizcano (2007)	Asfalto usado: 80 -100. 1 % en masa de poliestireno (icopor). 0, 12, 14, 16, 18 y 20 % en masa de GCR, T: 170 °C. 3000 RPM. Tiempo 1 minuto.	Poco dúctiles. Material rígido y con baja susceptibilidad a las deformaciones plásticas. Endurecimiento de las muestras a mayor contenido de GCR. Disminuyen puntos de ignición y de llama. Aumenta peso específico. Aumenta punto de ablandamiento. Aumenta la viscosidad Brookfield.

Título / tipo / año	Autores	Condiciones	Resultados
Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado (artículo)	Figuroa, Fonseca, Amaya y Prieto (2008).	Asfalto usado: 80-100. 1 % en masa de poliestireno (icopor). 0, 12, 14, 16, 18 y 20 % en masa de GCR, T: 170 y 180 °C. 2400 RPM. Tiempo 30 minutos. Se usó dispersor de asfaltos a 180 °C. A 170 °C fue manual.	Con el dispersor a 180 °C se logran mejores resultados que a 170 °C (manual). Se debe a mejor homogenización de la mezcla. Se encontró que las concentraciones óptimas eran: 1 % de icopor y 18 % de GCR.
Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado (artículo)	Figuroa-Infante, Fonseca-Santanilla y Reyes-Lizcano (2009)	Icopor y GCR malla 40. 1 % en masa de poliestireno (icopor). 0, 12, 14, 16, 18 y 20 % en masa de GCR	Estabilidad: mejor la muestra con 1 % de icopor solamente o con 1 % de icopor y 14 % de GCR. Fisicoquímica (penetración, ductilidad, puntos de ignición y de llama, peso específico, punto de ablandamiento y RTFOT): mejor la muestra con 1 % de icopor y 14 % de GCR. T. de mezclado para la mejor muestra: 190-200 °C T. de compactación: 175 – 185 °C
Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2 (tesis)	Camargo y Suárez (2010)	Se revisan todas las tecnologías existentes a la fecha en cuanto a modificación de asfaltos para carreteras que cumplan las normas del INVIAS.	
Pavimentos con polímeros reciclados (tesis)	Ramírez (2011)	Se usó asfalto 60-70. Caucho triturado de 0.5 a 0.85 mm de tamaño medio (malla 30). Poliestireno (EPS) sin vacíos, malla 30. En algunos casos se mezcló también con azufre (al 1.5 y al 2 %). T: 135, 150 y 180 °C 500 a 600 rpm. 10 minutos. El poliestireno (3 % en masa) se calienta previamente a 80 °C por 1 hora.	La más estable fue con 20 % GCR y 1.5 % de azufre a 180 °C. Problemas de aglutinación y separación del (EPS) en la mezcla con el asfalto. Probablemente el 3 % de EPS usado
Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monótonica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas (artículo)	Rondón-Quintana, Molano-Mora y Tenjo-Lancheros (2012)	Dos asfaltos: 60-70 y 80-100 GCR malla 40. Se realizaron briquetas por compactación para ensayo Marshall. Por vía húmeda, se adicionó el GCR en un 13 y 15 % del total. Dos diferentes granulometrías de agregados pétreos.	Porcentaje óptimo de asfalto en el cemento asfáltico: 6.5 % Las mezclas modificadas con GCR experimentan mejoría en la resistencia mecánica cuando disminuye la temperatura de compactación.

Título / tipo / año	Autores	Condiciones	Resultados
Comportamiento monotónico de mezclas asfálticas MDC-2 adicionadas con desecho de caucho-cuero (artículo)	Moreno (2013)	Asfalto 60-70. 1, 2, 3 y 4 % de GCR-cuero. T: 140 °C 45 a 60 minutos. Ensayos Marshall con mezcla pétreo de granulometría MDC-2 (INVIAS). El GCR-cuero, pasa malla 40 y es retenido por malla 80; proviene de residuos de remotoras de calzado. Puede contener: PVC, EVA, SBS, cauchos naturales vulcanizados y expandidos, y cueros sintéticos y naturales.	Porcentaje óptimo de asfalto en el cemento asfáltico convencional: 5 %. En cuanto a resistencia mecánica, la mejor mezcla fue con un 2 % de GCR-Caucho (incluso mejor que la convencional). A mayores porcentajes, se pierde adherencia. La deformación mínima la presentan las muestras con 1 % de agregado.
Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia (tesis)	Pérez (2014)	Revisión de estadísticas de uso de asfaltos modificados en Colombia. Análisis bibliográfico.	Hace referencia a los resultados del estudio realizado por el IDU y la Universidad de los Andes (ver referencias). El mejor asfalto fue el modificado por vía húmeda con caucho reciclado, seguido del modificado con SBS y el modificado con SBR.
Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap Graded para la ciudad de Bogotá (tesis)	Ramírez, Ladino y Rosas (2014)	Esta tecnología emplea una gradación de agregados pétreos y finos, lo que garantiza apenas entre un 3 y un 5 % de vacíos en el pavimento. T de mezcla con agregados: 175 ± 5 °C T de compactación: 135 ± 2 °C Contenido de asfalto: entre 7 a 8.5 % en cemento asfáltico.	Se propuso un diseño de mezcla asfáltica de acuerdo con la metodología de diseño AASHTO/93. En el caso del cemento asfáltico se propuso partir de un asfalto tipo 60/70.
Diagnóstico de las condiciones superficiales y evaluación del comportamiento estructural del pavimento de las vías construidas por el Instituto de Desarrollo Urbano con asfalto modificado con caucho reciclado de llanta (GCR), en las localidades de Fontibón, Bosa y Teusaquillo, en la ciudad de Bogotá (tesis)	Vargas y Rodríguez (2014)	Evaluación y diagnóstico del estado actual de la carpeta asfáltica de vías hechas con GCR. Metodología usada: PCI (<i>pavement condition index</i> : índice de condiciones del pavimento). Incluye inspección visual, ensayos a núcleos, inspección de fallas, determinación del índice de estado del pavimento y evaluación estructural por viga Benkelman	El 100 % del área no presenta piel de cocodrilo, grietas longitudinales o transversales, hundimientos o parches de abultamiento, a pesar de que son vías que soportan alto tráfico y aún tráfico pesado (alimentadores de Transmilenio, en algunos casos).

Trabajos relacionados con mezclas con concreto en Colombia

Torres (2014) comparó los resultados de ensayos mecánicos y fisicoquímicos a mezclas de concreto con 10, 20 y 30 % de GCR con los obtenidos por el concreto normal. En todos los casos disminuyó la resistencia a la compresión, que fue inferior para un 10 %; lo mismo ocurrió con la elasticidad y el módulo de rotura; aunque aumentó la resistencia a la penetración de cloruros hasta los 90 días (luego de lo cual disminuyó). En todos los casos se empleó arena de río como agregado fino y grava como agregado grueso.

Peñalosa (2015) evaluó el comportamiento mecánico de mezclas de concreto, en las que reemplazó el 10 y el 30 % de arena como agregado fino por GCR, contra una mezcla convencional. En los resultados de este estudio se observa que la mezcla con 10 % de reemplazo alcanzó el valor de resistencia a la compresión, mientras que la mezcla con 30 % no lo alcanzó.

Venegas (2016) realizó pruebas en estado fresco y estado endurecido de probetas con 5, 10, 15 y 20 % de grano fino y los mismos porcentajes de grano grueso, encontrando que el GCR aumenta la resistencia a la penetración de cloruros y mantiene la misma permeabilidad al agua, pero disminuye la resistencia a la compresión a porcentajes mayores a 10 % de GCR.

Hernández y Sánchez (2015) buscaron reemplazar 15, 25 y 35 % de arena por GCR en el agregado fino del concreto. Los autores verificaron el cumplimiento de los requisitos de resistencia para un concreto estructural (21 MPa); pero con un 15 % de reemplazo solo alcanzó 9.6 MPa a los 28 días de curado.

Eraso y Ramos (2015) ensayaron con 5, 10 y 15 % de GCR para preparar un concreto no estructural. El estudio comprobó que cuando se recubría con cierta cantidad de polvo calcáreo, el caucho reciclado mejoraba la compatibilidad de este con el concreto e, incluso, aumentaba ligeramente la resistencia a la compresión en la mezcla con 5 % de caucho. De manera similar con los demás trabajos analizados en esta sección, se observó la tendencia de que al aumentar la concentración de caucho reciclado –así fuera recubierto–, se desmejoraban sus propiedades mecánicas.

Trabajos relacionados con carbones activados

Betancur, Martínez y Murillo (2009) llevaron a cabo la degradación termomecánica de restos de llantas en atmósfera de CO_2 , malla 30 y sin pirólisis previa. El proceso consistió en inmersión de las muestras en un reactor de lecho fijo, con flujo variable de CO_2 (50 o 150 mL/min), por 30 minutos, con tasa de calentamiento de 15 °C por minuto, a temperatura cercanas a 900 °C. Una vez que alcanzaban la temperatura deseada, se dejaba reaccionar por un tiempo que se variaba para analizar su influencia. Las muestras se caracterizaron mediante isotermas de adsorción de N_2 . Las condiciones operación sugeridas fueron: 900 °C, 150 mL/min y 180 minutos de tiempo de reacción, para las cuales se obtuvo un carbón activado con una área superficial de 414 m^2g^{-1} .

Cantillo, Giraldo y Moreno (2011) limpiaron, cortaron y trituraron llantas usadas. Luego tamizaron los fragmentos a tamaños de 10 mm. Este material se dividió en tres porciones. A la primera porción la impregnaron con ácido fosfórico. La segunda se impregnó con hidróxido de potasio. Ambas por 48 horas. Se secaron y se calcinaron en horno hasta 1123 K por dos horas. Al final, el material se lavó con agua destilada a pH neutro. La tercera porción se carbonizó a 923 K por dos horas, después se activó con CO_2 a 1123 y a 1233 K. A cada uno de estos carbones activos se les realizó caracterización textural y obtención de termogramas mediante calorimetría. La activación química con KOH produjo sólidos con mayor área superficial (149 y 157 m^2g^{-1}) con respecto a los activados con H_3PO_4 (52.9 y 71.2 m^2g^{-1}) y los activados físicamente (25.4 y 58.1 m^2g^{-1}).

En 2012, los mismos autores realizaron una comparación entre dos tamaños de partícula del precursor: 4 mm y 10 mm. El tratamiento que sufrieron los residuos de llanta fue pirólisis a 923 K

por dos horas en atmósfera inerte, seguida de la activación con un flujo de 150 mL/min de CO₂ y calentamiento a 10 K min⁻¹ hasta llegar a 1123 K o a 1233 K (se mantuvieron estas temperaturas por dos horas en cada caso). Como conclusión se destaca que a menor tamaño inicial del precursor, el carbón activado tendrá mayor área superficial y menor entalpía de inmersión, tanto en benceno como en agua.

Acosta, Moncada, Gauthier-Maradei y Nabarlatz (2013) estudiaron la pirólisis de residuos de llantas, en un rango de tamaño de 0.85 a 2.1 mm, en un reactor tubular vertical de acero inoxidable, con control de temperatura, enfriamiento, condensación de gases de salida y medidor de flujo de gases. Como el objetivo de este proyecto no era obtener carbones activados, los autores determinaron que el producto sólido se debe activar posteriormente, ya que su área superficial apenas alcanza 85 m²g⁻¹.

Rueda (2015) obtuvo tres distintos tipos de carbones activados previamente sometidos a pirólisis. Uno de ellos no fue modificado; otro fue activado con O₂ y el último fue activado con O₂ y N₂. Rueda caracterizó y estudió la cinética de adsorción de cymoxanil, un pesticida bastante tóxico. Finalmente, el trabajo de Cardona, Betancur y Martínez (2015) presentó la obtención termoquímica directa (sin desvolatilización previa: pirólisis) de carbón activado con un área superficial de 418 m²g⁻¹, a partir de neumáticos usados. El material obtenido se evaluó en la adsorción de níquel en solución acuosa.

Trabajos de ingeniería industrial y administración de empresas

En esta sección se incluyen los trabajos de investigación en temáticas como las propuestas de factibilidad para desarrollo de empresas alrededor de este tema o las nuevas estrategias de gestión como la logística inversa, que consiste en el conjunto de estrategias necesarias para la gestión eficiente de los productos buscando recuperar su valor (Rubio, 2003).

Quintero y Ramírez (2012) aplicaron logística inversa o “reversiva”² para los residuos de llantas usadas (el trabajo fue realizado en Pereira). Plantearon como destino final de estos residuos su uso en forma granular para mezclas asfálticas. Por su parte, Ruíz (2016) propuso algunas estrategias de logística inversa para la ciudad de Bogotá, basadas en un modelo que funciona actualmente en España. Ortiz y Tribilcock (2014) hicieron un análisis de la situación a la época en materia de gestión de residuos llantas usadas en Colombia, dentro del marco legal vigente, para lo que propusieron la creación de una planta de fabricación de GCR en la ciudad de Bogotá para dos usos finales (ver figura 2): mezclas asfálticas y material para parques. De manera similar, Cardona (2016) propuso la creación de este tipo de empresa para el departamento de Risaralda, con destino mezclas asfálticas. Baquero (2016), partiendo de un modelo Canvas (asociados clave, actividades clave, recursos clave, propuesta de valor, relación con clientes, segmentos de clientes, canales, estructura de costos y fuentes de ingresos) y un análisis DOFA (debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas), propuso un plan de negocios para el reciclaje de llantas en Bogotá para satisfacer dos demandas objetivas: el sector de la fabricación de calzado en el barrio Restrepo y la construcción, pavimentación y parques infantiles. Otras propuestas de negocio para Bogotá son: Ramírez (2012), basada en el modelo DOFA, pero a nivel exploratorio; Barbosa y Salom (2016), a partir del modelo Canvas; Mesa y Patarroyo (2016), soportada en el análisis de las cinco fuerzas de Michael Porter, y la tesis de maestría de Castillo, Fuentes y Ponce, (2016), en la que se diseñó “un sistema de planeación estratégico y táctico de producción y operaciones enfocado en una planta de transformación de llantas usadas para la obtención de grano de caucho reciclado (GCR)” (p. 21).

² El término correcto es “logística reversa”, pero así lo escribieron los autores.

CONCLUSIONES

Considerando los trabajos analizados, se observa que los factores clave en el proceso de gestión de los residuos de llantas usadas son el diseño del sistema de recolección y una comercialización eficiente. Esto se ve en los trabajos de ingeniería industrial y de administración de empresas, ya que en su mayoría enfocan la producción de grano de caucho reciclado a los sectores tradicionales de mezclas asfálticas para vías y de otros usos en menor proporción. Por otra parte, en cuanto a los métodos de reciclaje o de valorización estudiados hasta el momento, no se han desarrollado los métodos de valorización energética, ni el reciclaje diferente a las mezclas asfálticas o al uso en construcción (concreto estructural y no estructural, adobes, pisos, láminas), con la única excepción de la industria del calzado. El desarrollo de las mezclas asfálticas se ha impulsado gracias a las necesidades de construcción de vías más resistentes al creciente tráfico vehicular, por ser una alternativa que puede manejar grandes cantidades de estos residuos. Las políticas gubernamentales han enfocado sus esfuerzos en fortalecer la inclusión de residuos de caucho en el sector de la construcción. La pirólisis está empezando a desarrollarse en Colombia. El destino principal de las llantas usadas en Colombia es el reencauchado; en segundo lugar, las mezclas asfálticas, seguido de construcción, obtención de carbones activados y otros usos (ciclorutas y parques infantiles). El campo en investigación está abierto para realizar desarrollos en tecnologías emergentes en Colombia.

REFERENCIAS

- Acosta, R., Moncada, S., Gauthier-Maradei, P., y Nabarlatz, A. (2013). Estudio preliminar de la producción de aceite y carbón mediante pirólisis intermedia de caucho de llantas usadas. *Revista Investigaciones Universidad del Quindío*, 24(1), 139-145.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de los Andes. (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desecho de llantas. Contrato IDU-366-01*. Recuperado de http://200.93.146.197:3888/manualProcesos/Innovacion_y_Gestion_Conocimiento%5C02_Planes_Manuales_y_Documentos/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf
- Ángulo, R., y Duarte, J. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander-Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, Colombia.
- Asociación Colombiana de Reencauchadores de Llantas y Afines. (2015). *El reencauche, una muestra de la eficiencia en la flota*. Recuperado de <http://reciclamoscundinamarca.com/wp-content/uploads/2015/10/reencauche.pdf>
- Baquero, L. (2016). *Medio ambiente sobre ruedas* (tesis de pregrado). Colegio de Estudios Superiores de Administración, Bogotá, Colombia.
- Barbosa, H., y Salom, J. (2016). *Modelo de negocio para el reciclaje y aprovechamiento de llantas usadas en la ciudad de Bogotá* (tesis de pregrado). Universidad EAFIT, Escuela de Administración, Bogotá, Colombia.
- UNEP y Secretaria de Basel Convention. (2000). *Technical guidelines on the identification and management of used tyres*. Recuperado de <http://archive.basel.int/meetings/sbc/workdoc/old%20docs/tech-usedtyres.pdf>
- Bernal, A., y Ovalle, D. (2016). *Diagnóstico ambiental de la gestión de llantas usadas en la avenida Centenario de la localidad de Fontibón desde la carrera 90 hasta la carrera 140* (tesis de

- pregrado). Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia.
- Betancur, M., Martínez, J., y Murillo, R. (2009). Production of activated carbon by waste tire thermochemical degradation with CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2), 882-887.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). *Guía para el manejo de llantas usadas* (1ª edición). Bogotá: Editorial Kimpress.
- Camargo, H., y Suárez, A. (2010). *Diagnóstico de las nuevas tecnologías empleadas para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2* (monografía de grado). Universidad Militar Nueva Granada, Especialización de Ingeniería de Pavimentos, Bogotá, Colombia.
- Cantillo, M., Giraldo, L., y Moreno, J. (2011). Preparación de carbones activados a partir de residuos de llantas. Activación física y química. *Revista Colombiana de Química*, 40(2), 269-282
- Cantillo, M., Giraldo, L., y Moreno, J. (2012). Carbones activados obtenidos a partir de residuos de llantas con diferente tamaño de partícula. *Afinidad LXIX*, 560, 266-271.
- Cardona, L., Betancur, M., y Martínez J. (2015). Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂ para la obtención de carbón activado y comparación con el obtenido en dos etapas. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 9(1), 57-69.
- Cardona, P. (2016). *Estudio de factibilidad para la creación de una planta de producción de granos de caucho (GCR) mediante el reciclaje de llantas fuera de uso* (tesis de pregrado). Administración Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Cardozo, A., Polania, D., y Gonzales, J. (2014). *Diagnóstico ambiental de la generación y manejo de los residuos peligrosos (RESPEL) generados por los centros de servicios especializados en el mantenimiento motociclístico de Ibagué-Tolima* (tesis de especialización). Especialización en Gestión Ambiental y Evaluación de Impacto Ambiental, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.
- Castillo, L., Fuentes, S., y Ponce, M. (2016). *Diseño de un plan estratégico y táctico de producción y operaciones enfocado en el aprovechamiento de llantas usadas para la obtención de grano de caucho reciclado (GCR)* (tesis de maestría). Maestría en Producción y Operaciones, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia.
- Decreto 2891 de 2013. *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo*. Diario Oficial 49010 de diciembre 20 de 2013.
- Decreto 442 de 2015. *Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia.
- Decreto 265 de 2016. *Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 442 de 2015 y se adoptan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia.
- Díaz, C., del Castillo, J., y Magri, K. (2012). Problemática del manejo de llantas usadas generadas por el parque automotor en la ciudad de Cartagena. *Desarrollo regional y competitividad*, 1(1), 51-61.
- Eraso, H., y Ramos, N. (2015). *Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo* (tesis de pregrado). Departamento de Ingeniería Civil e Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Hernández, H., y Sánchez, H. (2015). *Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto usando neumáticos triturados como reemplazo del 15 %, 25 % y 35 % del volumen del agregado fino para*

- un concreto con fines de uso estructural* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Figuroa, A., Sánchez, A., y Reyes, F. (2007). Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. *Revista Epsilon*, 9, 41-55
- Figuroa, A., Fonseca, B., Amaya, C., y Prieto, M. (2008). Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado. *Revista Epsilon*, 10, 67-79.
- Figuroa-Infante, A., Fonseca-Santanilla, E., y Reyes-Lizcano, F. (2009). Caracterización físico-química y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 13(1), 45-70.
- Marín, B. (2012). En favor del medio ambiente: de llanta vieja a carbón activado. *Revista Universitas Científica*, 15(1), 33-36
- Mesa, M., y Patarroyo, S. (2016). *Plan de negocio dirigido a la recuperación de neumáticos usados y comercialización de grano de caucho reciclado (GCR) en la ciudad de Bogotá* (tesis de pregrado). Ingeniería Industrial, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Moreno, L. (2013). Comportamiento monotónico de mezclas asfálticas MDC-2 adicionadas con desecho de caucho-cuero. *Revista Academia y Virtualidad*, 6(2), 56-66.
- Mosquera, R. (2016). *Manual de reciclaje y su plan de socialización para la disposición de llantas usadas en el sector de Siete de Agosto* (trabajo de grado). Ingeniería industrial, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ortiz, A., y Tribilcock, A. (2014). *Propuesta de un plan de empresa para el diseño y la fabricación de productos a partir del reciclaje de llantas, de acuerdo a las disposiciones normadas de los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas en Bogotá* (proyecto de tecnología). Tecnología Industrial, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Ospina, J., y Villada, G. (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM. *Lámpsakos*, 6(3), 23-31.
- Peñaloza, C. (2015). *Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10 % y 30 % del volumen del agregado fino para un concreto con fines de uso estructural* (tesis de pregrado). Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pérez, R. (2014). *Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia* (monografía de grado). Especialización de Ingeniería de Pavimentos, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- PNUD Colombia, DAMA y OCADE Ltda. (1999). *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de baterías usadas generadas por el mantenimiento del parque automotor de Santa Fe de Bogotá*. Recuperado de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/diagnostico-ambiental-sobre-el-manejo-actual-de-baterias-usadas-generadas-por-el-mantenimiento-del-parque-automotor-de>
- Quintero, A., y Ramírez, J. (2012). *Diseño de un proceso logístico reversivo de llantas usadas en la ciudad de Pereira año 2012* (tesis de pregrado). Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

- Ramírez, L. (2011). *Pavimentos con polímeros reciclados* (tesis de pregrado). Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia.
- Ramírez, V. (2012). *Creación de una empresa dedicada al reciclaje de llantas a través de su trituración* (tesis de pregrado). Administración de Empresas, Universidad Escuela de Administración de Negocios, Bogotá, Colombia.
- Ramírez, A., Ladino, I., y Rosas, J. (2014). *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap Graded para la ciudad de Bogotá* (tesis de especialización). Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ramos, G., Alguacil, F., y López, F. (2011). The recycling of end-of-life tyres. Technological review. *Revista de metalurgia*, 47(3), 273-284.
- Resolución número 1457. Diario Oficial de la República de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia, 29 de julio de 2010.
- Rincón, J., y Silva, E., (2014). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá: CYTED.
- Rodríguez, K. (2005). *Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor* (tesis de pregrado). Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Rondón-Quintana, H., Molano-Mora, Y., y Tenjo-Lancheros, A. (2012). Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas. *Revista Tecno Lógicas*, 29, 13-31.
- Rubio, S. (2003). *El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones* (tesis doctoral). Departamento de Economía Aplicada y Organización de Empresas, Universidad de Extremadura, Badajoz, España.
- Rueda, Y. (2015). *Obtención de carbones activados a partir de caucho de llantas y evaluación en la adsorción de cymoxanil* (tesis de pregrado). Ingeniería química, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.
- Ruíz, D. (2016). *Estrategias de Logística inversa que permitan la reutilización de llantas usadas* (tesis de pregrado). Administración en Logística y Producción, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.
- Sanguino, P., Téllez, N., Escalante, H., y Vásquez, C. (2009). Aprovechamiento energético de la biomasa residual del sector avícola. *Revista Ión*, 22(1), 43-52.
- Suárez, O. (2009). *Manejo y disposición de residuos peligrosos derivados del sector transporte* [presentación Power Point]. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005644/Presentacion04UniversidadNacionalPIRS.pdf>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. México: McGraw-Hill.
- Torres, H. (2014). *Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho* (tesis de maestría). Maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- Torretta, V., Rada, E., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I., y Cioca, L. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste management*, 45, 152-160.

- Unidad de Estudios Económicos de Colfecar. (2015). Reciclaje de llantas: maximizar su vida útil y desecharlas correctamente. *El Container*, 135(12) 8-13.
- UNEP. (2011). *Revised technical guidelines for the environmentally sound management of used and waste pneumatic tyres* (UNEP/CHW.10/6/Add.1/Rev.1). Cartagena, Colombia: UNEP y ONU.
- Vargas, N. y Rodríguez, F. (2014). *Diagnóstico de las condiciones superficiales y evaluación del comportamiento estructural del pavimento de las vías construidas por el Instituto de Desarrollo Urbano con asfalto modificado con caucho reciclado de llanta (GCR), en las localidades de Fontibón, Bosa y Teusaquillo, en la ciudad de Bogotá* (monografía). Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- World Business Council for Sustainable Development. (2008). *Managing end of life tires. Full report*. Recuperado de http://wbcsdservers.org/wbcsdpublications/cd_files/datas/business-solutions/tire/pdf/EndOfLifeTires-FullReport.pdf