

Reciclaje de residuos de cuero: una revisión de estudios experimentales

Recycling of waste leather: a review of experimental studies

Recibido: 04-05-2015 Aceptado: 05-11-2015

Sandra Milena Velásquez Restrepo¹
Diego Hernán Giraldo Vásquez²
Natalia Cardona Vásquez³

¹ Colombiana, Líder de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Itagüí, Antioquia. Bioingeniera, Magíster en Ingeniería, Especialista en Gerencia. Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y Calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas.

² Colombiano, Profesor del Programa de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería. Grupo de Materiales Poliméricos.

³ Colombiana, Ingeniera de Materiales, Grupo BIOMATIC-Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y Calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas. Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia.

Resumen

El curtido del cuero convierte las pieles naturales en materiales flexibles, imputrescibles y duraderos, mediante complejos procesos que generan cantidades significativas de residuos que representan un problema ambiental si no se gestionan adecuadamente. Se presenta una revisión de la literatura sobre la reutilización de residuos sólidos procedentes de las operaciones de procesamiento del cuero. Se encontraron cuatro renglones de investigación ampliamente reportados; en primer lugar, la pirólisis de los residuos para la obtención de combustibles sólidos alternativos y para la síntesis de materiales carbonosos con propiedades multifuncionales, con potencial para el secuestro de dióxido de carbono y para la adsorción de tintes en soluciones acuosas. Los otros tres renglones identificados son la obtención de biodiesel mediante transesterificación, la modificación de asfaltos y el uso de residuos de cuero como material reforzante en mezclas de caucho. La revisión de la literatura indicó que es posible disminuir el impacto ambiental de la industria del cuero, no sólo mediante el tratamiento de efluentes, que ha sido la temática más estudiada, sino tratando los residuos sólidos que se generan durante el curtido para obtener nuevos y valiosos productos.

Palabras claves: procesamiento del cuero; carnaza; curtido; reciclaje de residuos sólidos.

Abstract

Tanning transforms raw hides in leather, a rot-proof, flexible and durable material. During this complex process significant amounts of waste are generated. Therefore, an appropriate environmental management is required. This work presents a review on the recycling of solid waste from leather processing. Pyrolysis was found as a widely studied way for recycling leather scrap, obtaining alternative solid fuels and carbonaceous materials with multifunctional

properties, potentially useful for carbon dioxide capture and dye adsorption in aqueous solutions. Transesterification of leather for biodiesel production, mixing of leather scrap with asphalt for improving the durability of pavements and reinforcement of rubbers appears to be viable processes for wastes of tanning. We conclude that is possible to reduce the environmental pollution from leather industry, not only by effluent treatment, by processing the solid waste for obtaining valuable new products.

Keywords: Leather processing; wet blue; tanning; solid waste recycling.

Introducción

El curtido es el proceso que transforma las pieles de varias especies animales hasta hacerlas permanentemente imputrescibles, pero conservando su estructura natural fibrosa y por ende su resistencia y flexibilidad (NPCS, 2005). Con el cuero, nombre otorgado a la piel curtida, se fabrica calzado, muebles, tapicería, vestuario, guantes, accesorios personales e incluso algunas piezas industriales (Marshall, 2003).

La producción de cuero es una actividad relevante para el desarrollo económico de países como Turquía, China, India, Pakistán, Etiopía, Italia, España, Brasil (Orhon *et al.*, 1999; Leta *et al.*, 2004; Lefebvre *et al.*, 2006; Rajesh y Kaliappan, 2007; Kanagaraj *et al.*, 2015) y Colombia (DNP, 2014). Las primeras curtiembres colombianas datan de 1920 en Antioquia y de 1950 en los municipios de Villapinzón y Chocontá en Cundinamarca. Actualmente existen curtiembres en Nariño, Quindío, Risaralda, Cundinamarca, Antioquia, Atlántico, Valle del Cauca, Tolima, Bolívar, Santander y Huila, es decir, en los 11 departamentos del país con mayor actividad económica (Alzate, 2008). Es pertinente indicar que la cadena colombiana del cuero ha registrado superávit comercial a partir de 2003, e incluso es considerada por en el Plan Nacional de Desarrollo como un sector productivo clave para varias regiones del país, específicamente en la estrategia que apunta a crear plataformas tecnológicas y competitivas para aprovechar el talento humano de la región, y que sean fuente de empleos nuevos y sofisticados (DNP, 2014).

No obstante ser una industria económicamente importante, deben tomarse cuidados para mitigar la contaminación ambiental causada por los desechos generados durante el procesamiento del cuero, aunque en los últimos años se han implementado importantes mejoras

tecnológicas para disminuir el impacto sobre el ambiente (Dixit *et al.*, 2015).

Para comprender el tipo de residuos que se generan, es pertinente indicar que en el proceso de curtido se presentan cuatro sub-grupos que a su vez implican múltiples tareas cada uno, los cuales son: operación, curtido, recurtido y acabado (Beghetto *et al.*, 2013) como se esquematiza en la Figura 1. Durante el proceso se generan gran cantidad de desechos sólidos y líquidos, que debe tratarse adecuadamente para evitar generar alta contaminación ambiental; una de las formas de atenuar el riesgo es la introducción de tecnologías limpias sostenibles (Kanagaraj *et al.*, 2015), o la incorporación de valor agregado a estos residuos (Shabani *et al.*, 2009), siendo este último uno de los principales retos para las curtiembres en el mundo (Cabeza *et al.*, 1998; Rao *et al.*, 2002), y Colombia no es la excepción.

La mayoría de los residuos sólidos corresponde a la piel defectuosa no procesada, trozos de cuero procesados y otros, que representan más de 150.000 toneladas por año en todo el mundo (Bermúdez, 2013), los cuales contienen metales y productos químicos que incluyen cromo, titanio y otros (El-Sabbagh y Mohamed, 2011). De aquí la importancia de encontrar alternativas que le den valor agregado a este tipo de residuos, ofreciendo una alternativa a la práctica actual de disponerlos en los vertederos.

Considerando que pueden emplearse diversos métodos para obtener diferentes aplicaciones para este tipo de residuos, esta revisión describe varios logros importantes para la reducción de la contaminación con el tratamiento de residuos sólidos proteicos procedentes de las operaciones del cuero después del curtido, incluyendo las posibles aplicaciones que se le pueden dar a este tipo de materiales.

Es pertinente tener en cuenta que el proceso de curtido es diferente para cada producto final, y el tipo y la cantidad de residuos que se producen pueden variar significativamente (Islam *et al.* 2014). Los químicos utilizados durante el procesamiento del cuero son muy variados: ácidos, álcalis, sales de cromo, taninos, disolventes, sulfuros, colorantes, entre muchos otros compuestos que se utilizan en la transformación de pieles en bruto en bienes comerciales (Lofrano *et al.* 2013). Estos compuestos no se fijan por completo a las pieles y pueden migrar hacia el agua que posteriormente se vierten en la red sanitaria, de aquí que un gran número de investigaciones de esta industria se centran en buscar alternativas para disminuir la contaminación de aguas (Suganthi *et al.* 2013; Fabbricino *et al.* 2013; Mannuci *et al.* 2010;). Sin embargo, son

pocos los estudios relacionados con procesos y tecnologías que valoricen los residuos sólidos para convertirlos en nuevos productos como por ejemplo, materiales, productos químicos y energía, los cuales según algunos investigadores deben ser el foco de futuros proyectos de investigación (Lin *et al.* 2012; El-Sabbagh y Mohamed, 2011). Agregar valor a

los residuos, a diferencia de la gestión básica de disponerlos en los rellenos sanitarios, podría ser una alternativa para que las organizaciones disminuyan el impacto ambiental al mismo tiempo que obtienen subproductos que generarían nuevos ingresos (Lofrano *et al.* 2013).



Figura 1. Flujograma del proceso de curtido
Fuente: (Adaptado de Beghetto *et al.*, 2014; Cooman *et al.*, 2003)

De forma similar han sido reportados algunos estudios que presentan tratamientos y usos alternativos para este tipo de residuos, que pueden ser llevados a aplicaciones específicas y útiles para la industria en general, como se describe a continuación.

Principales aplicaciones para los residuos de cuero

La pirólisis puede ser una de las rutas alternativas para el tratamiento de los residuos sólidos obtenidos en las curtiembres (Lua *et al.*, 2004). Consiste en calentar el material orgánico en una atmósfera inerte, siendo un método ampliamente aplicado al tratamiento de residuos orgánicos, entre los que se encuentran los agrícolas, las llantas fuera de uso, los lodos de depuradora y los plásticos. Los productos de la reacción son gases, que se pueden utilizar como combustible, petróleo que se puede usar como combustible o como materia prima para

productos químicos, y residuos carbonosos que se pueden usar como combustible o para la producción de carbón activado (Yilmaz *et al.*, 2007). Se presentan algunos estudios sobre la pirólisis de residuos de cuero para aplicaciones en combustibles y para la síntesis de materiales carbonosos.

Utilización de residuos sólidos de la industria del cuero como fuente de combustión

El aumento del precio del petróleo, así como la disminución de las reservas mundiales del crudo, se han convertido en las principales causas de la búsqueda y desarrollo de combustibles alternativos (Silitonga *et al.*, 2013), en particular para transporte y propósitos industriales (Koutinas *et al.*, 2012). En un estudio realizado por Yilmaz *et al.*, (2007), se trató mediante pirólisis residuos de cuero en varias presentaciones como: virutas de cuero curtidas al cromo, y/o con tintes vegetales y en la forma de

polvo esmerilado, mostrando características interesantes como fuente para la producción de combustibles; el polvo de esmerilado presentó el más alto rendimiento en producción de aceite (23% en peso), mientras que los otros dos desechos produjeron entre 8% y 9%. Los rendimientos de residuos carbonosos estuvieron entre 37,5% y 48,5%, y su valor calórico estuvo entre 4300 y 6000 kg⁻¹ kcal, valores adecuados para esta aplicación. La producción de combustible sólido a partir de residuos de cuero es una alternativa técnicamente viable de ser implementada a escala industrial, pero se debe considerar el tratamiento del amoníaco, cianuro de hidrógeno y dióxido de azufre que se generaron durante el proceso, así como la viabilidad económica dadas las altas temperaturas requeridas y la necesidad de emplear gases inertes (Font *et al.*, 1999).

Síntesis de Materiales Carbonosos

Los carbones activados se pueden producir a partir de materiales carbonosos por activación química (Girgis e Ishak, 1999) y por activación física (Lua *et al.* 2004; San Miguel *et al.*, 2003). El método de activación física implicó la pirólisis de la materia prima, y la posterior activación a alta temperatura en una atmósfera de dióxido de carbono o vapor, de tal manera que en realidad se trató de una activación térmica. La activación química implicó la impregnación de los residuos de cuero en agentes químicos activantes como el ácido fosfórico, el cloruro de zinc, el hidróxido de potasio o el carbonato de potasio; estos activantes degradan el material orgánico remanente en el residuo carbonoso tipo *char*, al promover reacciones de deshidratación u oxidación en el precursor celulósico. La mezcla se sometió a pirolisis de tal manera que se elimina por arrastre el material volátil que aún permanece en el residuo carbonoso tipo *char* y que genera poros libres. El mecanismo de activación depende del tipo del agente activante utilizado, pues en el caso de los hidróxidos éstos reaccionan con el carbono a temperaturas entre 630 °C y 730 °C, para producir finalmente sodio o potasio metálico, según el activante empleado, y monóxido de carbono. Aunque los mecanismos por los cuales se dio la formación de poros no son claramente entendidos (Afinata *et al.*, 2007), se encontró que el carbonato de potasio se redujo por el carbón en atmósfera inerte lo cual dio paso a la formación de potasio metálico. Independientemente del tipo de activante empleado, la formación de iones metálicos en la superficie del residuo carbono se derivó en su activación química y por ende en su capacidad de adsorción (Hayashi *et al.*, 2002).

La obtención de carbón activado a partir de residuos de cuero curtidos al cromo se ha convertido en una opción útil para su disposición. Luego de ser clasificados según el tamaño de partícula, estos residuos se trataron a altas temperaturas (alrededor de 850°C) en una atmósfera de CO₂, lo cual promueve el proceso de activación y formación del carbón activado (Oliveira *et al.*, 2008). Estos materiales carbonosos o carbonatados tienen una estructura parcialmente injertada con una morfología de cebolla y están naturalmente enriquecidos con nitrógeno y oxígeno, con un área superficial aproximada de 800 m².g⁻¹ (Yilmaz *et al.*, 2007) lo que les brinda propiedades multifuncionales (Ashokkumar *et al.*, 2012). Estas propiedades multifuncionales de los materiales carbonatados permiten su aplicación en el secuestro de CO₂ (D'Alessandro *et al.*, 2010; Ashokkumar *et al.*, 2012), electrodos para batería (Ashokkumar *et al.*, 2012; Thanikaivelan, 2011), fibras, geles, películas, obtención de esponjas por medio de la reticulación con varios compuestos para el campo de la cosmética, la medicina o la veterinaria (Catalina *et al.*, 2012; Catalina *et al.*, 2013) y como adsorbente de tintes en soluciones acuosas (Yilmaz *et al.*, 2007).

La aplicación potencial de los carbones activados obtenidos a partir de virutas de cuero curtido con anilinas vegetales ha sido también estudiada, y ha demostrado ser una buena opción como adsorbente para la eliminación de fenoles, azul de metileno y cromo hexavalente de aguas contaminadas (Kantarli y Yanik, 2010).

También se estudiaron otras formas de manejar los residuos de cuero diferentes a la pirólisis. A continuación se describen los principales estudios reportados.

Utilización de residuos de cuero para la obtención de biodiesel

El biodiesel se posicionó como una alternativa a combustibles derivados del petróleo, sin embargo, como se obtuvo a partir de aceites vegetales (Barbosa *et al.*, 2010; Endalew *et al.*, 2011) y grasas animales (Alptekin y Canakci 2010; Encinar, 2011), la industria considera que el precio de estas materias primas en algunas aplicaciones no ha sido competitivo (Haas y Foglia, 2005). Por otra parte, algunos aceites vegetales y grasas animales son comestibles, lo que conlleva una intensa competencia con las industrias alimentarias. Recientemente los estudios se han dirigido hacia la utilización de materias primas no comestibles, de bajo costo y con alto contenido en lípidos para la producción

de biodiesel, como los residuos del curtido de cuero, que se describe a continuación.

Los métodos más utilizados para la producción de biodiesel a partir de residuos de cuero curtido se basan en la transesterificación, bien en una o en dos etapas, utilizando ácido y catalizadores alcalinos (Alptekin *et al.*, 2012; Kolomazník *et al.*, 2009; Özgünay *et al.*, 2007). El proceso se llevó a cabo usando un catalizador alcalino para convertir directamente los triglicéridos en ésteres de alquilo. Sin embargo, la transesterificación catalizada por álcali es muy sensible a altos contenidos de ácidos grasos libres (FFA, por su sigla en inglés) y agua reduciendo el rendimiento de biodiesel. Por lo tanto, este método se usó para materias primas refinadas con contenidos bajos de FFA y agua (Canakci, 2009).

Utilización de residuos de cuero para la modificación de asfalto

En la actualidad se están realizando estudios mecánicos de asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado. Esta línea de investigación ha sido la de mayor acogida en Colombia, si se compara con las demás aplicaciones estudiadas en la literatura (Barinas y Manotas, 2012; Aranda y Clavijo, 2014; Viveros y Gonzales, 2012; Reyes y Pinzón, 2013; Menjura, 2014). Estas investigaciones se han orientado a estudiar el comportamiento físico-mecánico del cemento asfáltico modificado con este tipo de desechos, y también a realizar el análisis químico del material modificado. Los desechos de calzado utilizado provenían de botas de seguridad, conocidas en la industria como calzado de dotación; se reporta que la adición de los residuos mejora las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, mostrando que esta línea de investigación puede ser una alternativa muy viable para aprovechar los residuos de cuero (Moreno y Calvo, 2014; Gutiérrez *et al.*, 2014).

Otra investigación reciente también evalúa el comportamiento de muestras de asfalto modificado con cuero obtenido de las industrias de calzado, sin considerar otros polímeros como en los estudios referidos previamente. Se realizó un proceso de molienda del cuero, para posteriormente tamizarlo utilizando sólo el pasante por tamiz N° 40 y retenido en el tamiz N°80. Se adicionó el cuero triturado como agente modificador en proporciones de 4%, 8% y 12% en peso. Para realizar el proceso de mezclado se calentó el cemento asfáltico en el horno hasta una temperatura de 150°C, que dio como resultado

un material fluido al que se adicionaron las partículas de cuero. Los autores reportan que la adición de los residuos de cuero mejoró las propiedades del asfalto (Rodríguez y Téllez, 2013).

Cuero como material para el tratamiento de aguas residuales coloreadas

Los residuos sólidos húmedos del proceso de curtido, es decir, la carnaza o cuero azul, poseen un alto contenido de proteínas y un adecuado patrón de isoterma de adsorción para captar reactivos colorantes de diferentes textiles (Gupta, 2009; Oliveira *et al.*, 2007). Otras investigaciones han demostrado que la carnaza o el cuero azul estabilizado orgánicamente se ha utilizado como un material adsorbente para la eliminación del color de las aguas residuales contaminadas. En esos trabajos se encontraron los valores de parámetros como dosis de adsorbente, concentración de colorante y pH, con los que se obtienen la mayor adsorción de contaminantes para las condiciones de cada estudio (Fannun, 2014; Piccin *et al.*, 2012; Fathima *et al.*, 2011, Fathima *et al.*, 2009). También se han estudiado las sales neutras como estabilizantes de los residuos de cuero, y se ha identificado su efecto en la capacidad de adsorber colorantes, se encontró que se logró eliminar más del 99% del color de las aguas (Fathima *et al.*, 2009). Ensayos comerciales afirman que las carnazas estabilizadas orgánicamente se pueden emplear para el tratamiento de aguas residuales de color; en esos estudios se informa que otra ventaja del método es que después de usar la carnaza o el cuero azul para la adsorción del colorante, se puede extraer el cromo por hidrólisis básica (Oliveira *et al.*, 2007). Para la eliminación de colorante azul de metileno y rojo de algunos textiles también se evaluaron los residuos del cuero, pero son relativamente más costosos que otros materiales adsorbentes (Oliveira *et al.*, 2007).

Se han evaluado los residuos de carnaza o cuero azul reticulado con glutaraldehído para estabilizarlos contra la degradación, con el estudio de el efecto del pH, la función de la concentración de sal, la dosis adsorbente y la concentración inicial de tinte. Encuentran que se puede eliminar alrededor del 90% del tinte en aguas coloradas mediante la disolución del colorante con la carnaza reticulada (Fathima *et al.*, 2011). También se utilizó el hierro para estabilizar los residuos de carnaza o de cuero azul, y se alcanzó una remoción de color de las aguas de más del 99% (Fanun, 2014). Otra línea de investigación

evaluó la posibilidad de reutilizar el colorante cargado en los residuos de carnaza o cuero azul como reductor en la fabricación de una sal utilizada para la tinción durante el curtido de cueros (Fanun, 2014; Fathima *et al.*, 2011).

Residuos de cuero como material reforzante en mezclas de caucho

Varios estudios se han enfocado en la incorporación de residuos de cuero a una matriz de caucho, para actuar como carga reforzante. Se demostró una alta compatibilización dentro de estos compuestos (El-Sabbagh *et al.*, 2011), viables para aplicaciones específicas. Esto es posible debido a que el cuero es una proteína fibrosa con altos contenidos de colágeno que forma cadenas reticuladas en diferentes direcciones; puede favorecerse el entrecruzamiento de cadenas carbonadas en elastómeros como el caucho, con lo cual se logran propiedades reológicas y de estabilidad térmica interesantes (El-Sabbagh *et al.*, 2011). También se ha estudiado la incorporación de virutas de cuero curtido con cromo en una matriz compuesta por caucho natural y diferentes cauchos sintéticos; se concluyó que es una metodología viable (Przepiorkowska *et al.*, 2004).

Las fibras de cuero se han utilizado como un aditivo en varios compuestos elastoméricos basados en caucho de nitrilo butadieno (NBR), caucho de cloropreno (CR), copolímeros de etileno-propileno-dieno monómero (EPDM), y caucho de isobutileno-isopreno clorado (CIIR) (Shabani *et al.*, 2009). En este estudio se evaluaron los efectos del empleo de fibras de cuero en las características de vulcanización así como en las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los compuestos. Los resultados indican que las características de vulcanización de los compuestos no se afectaron por la incorporación de las fibras de cuero, ya que no se encontró ningún efecto significativo sobre la viscosidad inicial, la procesabilidad y el tiempo de curado de los compuestos, pero se evidenció un aumento de la densidad de reticulación. En cuanto a las evaluaciones de las propiedades mecánicas de los compuestos vulcanizados, el estudio mostró que el uso de fibras de cuero aumenta la resistencia a la tracción del compuesto a base de NBR, debido a la compatibilidad entre el NBR y el cuero. Sin embargo, con los otros elastómeros no se detectaron cambios significativos en las propiedades, a excepción de la dureza pues el empleo de fibras de cuero aumentó drásticamente esta propiedad en todos los compuestos.

Otra aplicación estudiada para las virutas de cuero ha sido su uso como relleno en un compuesto de caucho acrilonitrilo-butadieno carboxilado (XNBR) y en el caucho

acrilonitrilo-butadieno (NBR), en el que se usa como agente dispersante Limanol PEV fabricado por la compañía Schill+Seilacher. Encuentran que las virutas de cuero en polvo mejoran propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura y el aumento de la densidad de reticulación de las mezclas con ambos tipos de caucho, gracias a las proteínas que contienen las virutas de cuero (Przepiorkowska *et al.*, 2007). Otro estudio similar demuestra que rellenar con viruta de cuero mejora propiedades como la resistencia al envejecimiento térmico y la conductividad eléctrica en estos tipos de caucho (Chronska y Przepiorkowska, 2008).

Otros estudios con caucho NBR y virutas de cuero han revisado el efecto del neutralizado de los desechos de cuero con bicarbonato de sodio y amoníaco, y con hidróxido de sodio. Muestran mejores características de vulcanización y propiedades mecánicas en las mezclas donde las virutas de cuero fueron neutralizadas con bicarbonato de sodio y amoníaco (Natchimuthu *et al.*, 1994).

Los residuos de cuero se utilizan como relleno de refuerzo en polímeros termoplásticos como el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), como fue estudiado por Ramaraj (Ramaraj, 2006). En ese trabajo los materiales compuestos de ABS y polvo de cuero se prepararon mediante la extrusión de ABS con 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, y 15% en peso de polvo de cuero en una extrusora de doble tornillo corrotante. Los filamentos extruidos se pelletizaron y se moldearon por inyección para obtener probetas con el fin de evaluar propiedades físico-mecánicas como resistencia a la tracción, a la flexión, al impacto Charpy, a la abrasión, la dureza Rockwell, la densidad, la temperatura de deflexión térmica (HDT) y el punto de reblandecimiento Vicat (VSP), entre otras. La incorporación de polvo de desecho de cuero no afectó significativamente propiedades como resistencia a la tracción, a la flexión, a la abrasión, dureza, densidad, o temperatura HDT. Sin embargo, el módulo de tracción, alargamiento a la tracción y los valores de resistencia al impacto Charpy se redujeron significativamente. Un comportamiento similar de aumento de la resistencia a la tracción se observa por la incorporación de residuos de cuero como relleno en matrices de material reciclado de Vinil butiral (PVB) (Ambrósio *et al.*, 2011).

Se ha encontrado que la incorporación de residuos de cuero en una matriz compuesta por caucho natural y caucho natural reciclado es viable, aprovechando de forma simultánea dos residuos que constituyen un problema ambiental, como lo son los residuos de cuero y el caucho vulcanizado. Durante estas investigaciones los residuos de cuero son empleados más como medio de compatibilización

entre el caucho virgen y el ya vulcanizado que como carga reforzante, y muestran que llevando a cabo una vulcanización entre los 140°C y 150°C no se presenta una reversión significativa en la reacción, siempre y cuando se aplique un tratamiento previo de neutralización a los residuos de cuero, además de que su morfología muestra una fase continua a través de toda la matriz (Ravichandran, y Natchimuthu, 2005). Es importante tener presente que para la mayoría de los estudios reportados se han empleado residuos de cuero con tamaños de partícula inferiores a 300 µm, factor que se vuelve importante al momento del diseño de la mezcla, ya que se encuentra directamente relacionado con la distribución de las cargas adicionadas dentro de la matriz de caucho (Ravichandran y Natchimuthu, 2005).

Como se puede observar los residuos de cuero se pueden aplicar como material de relleno o de refuerzo tanto en mezclas de caucho natural como de caucho sintético; esto es posible debido a que al ser el cuero una proteína fibrosa con alto contenido de colágeno que forma cadenas reticuladas en diferentes direcciones, puede favorecerse el entrecruzamiento de cadenas carbonadas en elastómeros como el caucho, mostrando propiedades reológicas y de estabilidad térmica interesantes (El-Sabbagh y Mohamed, 2011).

Orientación futura para el aprovechamiento de residuos de cuero

Una estrategia para emplear métodos de producción más limpia en la industria del cuero es buscar nuevas aplicaciones a los residuos que generan sus procesos, para lo cual este estudio revisó diversos métodos y aplicaciones para el aprovechamiento de los residuos sólidos de cuero curtido. Teniendo en mente la importancia de la gestión de residuos y el aprovechamiento de los mismos para generar valor agregado, se han encontrado diferentes usos para estos residuos que pueden ser de viable aplicación en la industria colombiana. El uso de residuos de cuero para la elaboración de biocombustibles, para la modificación de asfaltos y de formulaciones de caucho, y como adsorbentes de color para aguas, son algunas de las aplicaciones que se han sugerido. Con la adopción de estas tecnologías es posible reducir la carga contaminante de esta industria, pues se minimiza la generación de carnaza o cuero azul, uno de los principales residuos proteicos provenientes del descarnado del cuero.

Conclusiones

- Este trabajo identificó las principales tendencias para el tratamiento de los residuos de la industria del cuero, así como las tecnologías desarrolladas para obtener productos novedosos a partir de los mismos. Se detectó que estos residuos se están empleando principalmente para obtener materiales compuestos con caucho y con pavimentos, para desarrollar reciclaje químico, siendo especialmente importante la pirólisis, y como material de partida para obtener biocombustibles.
- Las tecnologías abordadas en la literatura indican que es posible disminuir el impacto ambiental de la industria del cuero, con el tratamiento de efluentes, que ha sido la tendencia más estudiada, y de los residuos sólidos que se generan durante el curtido. Si bien se identifica en los estudios consultados que existen diversas opciones técnicamente viables para la reutilización de residuos de cuero, es pertinente recordar la necesidad de evaluar la factibilidad económica de implementarlas según las condiciones del entorno en el cual se desee implementar la solución.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda de Claudia Patricia Aristizábal, aprendiz de Tecnología en Sistemas Integrados de Calidad, por la participación al inicio del proyecto como monitorea de investigación en el Centro de Diseño y Manufactura del Cuero.

Referencias

- Alptekin, E., y Canakci, M. (2010). Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat. *Fuel*, 89(12), 4035-4039.
- Alptekin, E., Canakci, M., y Sanli, H. (2012). Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production. *Fuel*, 95, 214-220.
- Alzate, A. (2008). *Proyecto Gestión Ambiental en la industria de Curtiembre en Colombia. Diagnóstico y estrategias*. Recuperado de: <http://www.tecnologiaslimpias.org/Curtiembre/EstrategiasDiagnostico.pdf>.

- Ambrósio, J., Lucas, A., Otaguro, H., y Costa, L. (2011). Preparation and characterization of poly (vinyl butyral)-leather fiber composites. *Polymer Composites*, 32(5), 776-785.
- Aranda, C., y Clavijo, C. (2014). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2 modificada con caucho y cuero en porcentajes 25% y 75% respectivamente* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ashokkumar, M., Narayanan, N., Reddy, A., Gupta, B., Chandrasekaran, B., Talapatra, S., y Thanikaivelan, P. (2012). Transforming collagen wastes into doped nanocarbons for sustainable energy applications. *Green Chemistry*, 14(6), 1689-1695.
- Barbosa, D., Serra, T., Meneghetti, S., y Meneghetti, M. (2010). Biodiesel production by ethanolysis of mixed castor and soybean oils. *Fuel*, 89(12), 3791-3794.
- Barinas, B., y Manotas, M. (2012). Caracterización de mezclas asfálticas tipo 2 (mdc-2) en caliente, modificadas con desechos de caucho-cuero y caucho molido de llanta. *Ingen Infraestructura*, 155, 3.
- Beghetto, V., Zancanaro, A., Scrivanti, A., Matteoli, U., Pozza, G. (2013). The Leather Industry: A Chemistry Insight. Part I: an Overview of the Industrial Process. *Sciences At Ca' Foscari*, 1(1), pp. 13-22
- Bermúdez, J., Dominguez, P., Arenillas, A., Cot, J., Weber, J., y Luque, R. (2013). CO₂ separation and capture properties of porous carbonaceous materials from leather residues. *Materials*, 6(10), 4641-4653.
- Cabeza, L., Taylor, M., DiMaio, G., Brown, E., Marmer, W., Carrio, R., y Cot, J. (1998). Processing of leather waste: pilot scale studies on chrome shavings. Isolation of potentially valuable protein products and chromium. *Waste Management*, 18(3), 211-218.
- Canakci, M. (2007). The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology*, 98(1), 183-190.
- Catalina, M., Cot, J., Balu, A. M., Serrano-Ruiz, J. C., y Luque, R. (2012). Tailor-made biopolymers from leather waste valorisation. *Green Chemistry*, 14(2), 308-312.
- Catalina, M., Cot, J., Borrás, M., Lapuente, J., González, J., Balu, A., y Luque, R. (2013). From waste to healing biopolymers: biomedical applications of bio-collagenic materials extracted from industrial leather residues in wound healing. *Materials*, 6(5), 1599-1607.
- Chronska, K., y Przepiorowska, A. (2008). Buffing dust as a filler of carboxylated butadiene-acrylonitrile rubber and butadiene-acrylonitrile rubber. *Journal of hazardous materials*, 151(2), 348-355.
- Cooman, K., Gajardo, M., Nieto, J., Bornhardt, C., y Vidal, G. (2003). Tannery wastewater characterization and toxicity effects on *Daphnia* spp. *Environmental toxicology*, 18(1), 45-51.
- DNP – Dirección Nacional de Planeación. (2014). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018*. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PND%202014-2018%20Bases%20Final.pdf>
- D'Alessandro, D., Smit, B., y Long, J. (2010). Carbon dioxide capture: prospects for new materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(35), 6058-6082.
- Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P., y Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: A review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 39-49.
- El-Sabbagh, S., y Mohamed, O. (2011). Recycling of chrome-tanned leather waste in acrylonitrile butadiene rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(2), 979-988.
- Encinar, J., Sánchez, N., Martínez, G., y García, L. (2011). Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresource Technology*, 102(23), 10907-10914.
- Endalew, A., Kiros, Y., y Zanzi, R. (2011). Inorganic heterogeneous catalysts for biodiesel

- production from vegetable oils. *Biomass and bioenergy*, 35(9), 3787-3809.
- Fabbricino, M., Naviglio, B., Tortora, G., y d'Antonio, L. (2013). An environmental friendly cycle for Cr (III) removal and recovery from tannery wastewater. *Journal of environmental management*, 117, 1-6.
- Fanun, M. (Ed.). (2014). *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection: Effective Utilization of Solid Waste from Leather Industry*. Elsevier. Pages 593–613
- Fathima, N., Aravindhan, R., Rao, J., y Nair, B. (2009). Utilization of organically stabilized proteinous solid waste for the treatment of coloured waste-water. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 84(9), 1338-1343.
- Fathima, N., Aravindhan, R., Rao, J., y Nair, B. (2011). Stabilized protein waste as a source for removal of color from wastewaters. *Journal of applied polymer science*, 120(3), 1397-1402.
- Font, R., Caballero, J., Esperanza, M., Fullana, A. (1999). Pyrolytic products from tannery wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 49, 243–56.
- Girgis, B., Ishak, M. (1999). Activated carbon from cotton stalks by impregnation with phosphoric acid. *Materials Letters*, 39(2), 107-114.
- Gupta, V. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of environmental management*, 90(8), 2313-2342.
- Gutiérrez, D., Vivas, S., Moreno, L. (2014). *Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2 MDC-2 elaborada con asfalto modificado con caucho vulcanizado de suela de bota militar* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Haas, M., y Foglia, T. (2005). Alternate feedstocks and technologies for biodiesel production. *The biodiesel handbook*, 42-61.
- Hayashi, J., Horikawa, T., Takeda, I., Muroyama, K., Nasir, F. (2002). Preparing activated carbon from various nutshells by chemical activation with K₂CO₃. *Carbon*, 40(13), 2381-2386.
- Islam, B., Musa, A., Ibrahim, E., Sharafa, S., y Elfaki, B. (2014). Evaluation and Characterization of Tannery Wastewater. *Journal of forest products and Industries*, 3 (3), 141-150.
- Kanagaraj, J., Senthivelan, T., Panda, R., y Kavitha, S. (2015). Eco-friendly waste management strategies for greener environment towards sustainable development in leather industry: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 89, 1-17.
- Kantarli, I., y Yanik, J. (2010). Activated carbon from leather shaving wastes and its application in removal of toxic materials. *Journal of hazardous materials*, 179(1), 348-356.
- Kolomazník, K., Barinova, M., y Fuerst, T. (2009). Possibility of using tannery waste for biodiesel production. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 104(5), 177-182.
- Koutinas, A.; Kopsahelis, N.; Stamatelou, K.; Dickson, F.; et al. (2012). Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy Environ. Sci.* 6, 426–464.
- Lefebvre, O., Vasudevan, N., Torrijos, M., Thanasekaran, K., y Moletta, R. (2006). Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment. *Water research*, 40(7), 1492-1500.
- Leta, S., Assefa, F., Gumaelius, L., y Dalhammar, G. (2004). Biological nitrogen and organic matter removal from tannery wastewater in pilot plant operations in Ethiopia. *Applied microbiology and biotechnology*, 66(3), 333-339.
- Lin, C., Pfaltzgraff, L., Herrero-Davila, L., Mubofu, E., Solhy, A., Clark, J., Luque, R. (2013). Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. *Energy and Environmental Science*, 6(2), 426-464.

- Lofrano, G., Meriç, S., Zengin, G., y Orhon, D. (2013). Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review. *Science of The Total Environment*, 461, 265-281.
- Lua, A., Yang, T., y Guo, J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 72(2), 279-287.
- Mannucci, A., Munz, G., Mori, G., y Lubello, C. (2010). Anaerobic treatment of vegetable tannery wastewaters: a review. *Desalination*, 264(1), 1-8.
- Marshall Cavendish Corporation Staff (Ed.). (2003). *How It Works: Science and Technology*. Marshall Cavendish.
- Menjura, C. (2014). *Características mecánicas de una mezcla MDC-2 con adición de caucho y cuero de bota militar*. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Tunja, Colombia.
- Moreno, L., y Calvo, D. (2014). *Estudio mecánico del asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado*. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Tunja, Colombia.
- Natchimuthu, N., Radhakrishnan, G., Palanivel, K., Ramamurthy, K., y Anand, J. S. (1994). Vulcanization characteristics and mechanical properties of nitrile rubber filled with short leather fibres. *Polymer international*, 33 (3), 329-333.
- NPCS - NIIR Project Consultancy Services. (2005). *Leather processing and taining technology handbook*. India, National Institute of industrial research.
- Oliveira, L., Guerreiro, M., Gonçalves, M., Oliveira, D., y Costa, L. (2008). Preparation of activated carbon from leather waste: a new material containing small particle of chromium oxide. *Materials Letters*, 62(21), 3710-3712.
- Oliveira, L., Goncalves, M., Oliveira, D., Guerreiro, M., Guilherme, L., y Dallago, R. (2007). Solid waste from leather industry as adsorbent of organic dyes in aqueous-medium. *Journal of hazardous materials*, 141(1), 344-347.
- Orhon, D., Genceli, E., y Çokgör, E. (1999). Characterization and modeling of activated sludge for tannery wastewater. *Water environment research*, 50-63.
- Özgünay, H., Çolak, S., Zengin, G., Sari, Ö., Sarikahya, H., y Yüceer, L. (2007). Performance and emission study of biodiesel from leather industry pre-fleshings. *Waste Management*, 27(12), 1897-1901.
- Piccin, J., Gomes, C., Feris, L., y Gutterres, M. (2012). Kinetics and isotherms of leather dye adsorption by tannery solid waste. *Chemical Engineering Journal*, 183, 30-38.
- Przepiorkowska, A., Chrońska, K., y Zaborski, M. (2007). Chrome-tanned leather shavings as a filler of butadiene-acrylonitrile rubber. *Journal of hazardous materials*, 141(1), 252-257.
- Przepiorkowska, A., Prochon, M., y Zaborski, M. (2004). Use of waste collagen as filler for rubber compounds. *Journal of the society of leather technologists and chemists*, 88(6), 223.
- Rajesh Banu, J., y Kaliappan, S. (2007). Treatment of tannery wastewater using hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(4), 415-421.
- Ramaraj, B. (2006). Mechanical and thermal properties of ABS and leather waste composites. *Journal of applied polymer science*, 101(5), 3062-3066.
- Rao, J. R., Thanikaivelan, P., Sreeram, K. J., y Nair, B. U. (2002). Green route for the utilization of chrome shavings (chromium-containing solid waste) in tanning industry. *Environmental science y technology*, 36(6), 1372-1376.
- Ravichandran, K., y Natchimuthu, N. (2005). Natural rubber - leather composites. *Polímeros*, 15(2), 102-108
- Ravichandran, K., y Natchimuthu, N. (2005). Vulcanization characteristics and mechanical properties of natural rubber-scrap

- rubber compositions filled with leather particles. *Polymer international*, 54(3), 553-559.
- Reyes, U., y Pinzón, J. (2013). *Asfaltos modificados con caucho y cuero de bota militar* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, G., y Téllez, G. (2013). *Caracterización física de asfalto modificado con cuero de calzado* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- San Miguel, G., Fowler, G., y Sollars, C. (2003). A study of the characteristics of activated carbons produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber. *Carbon*, 41(5), 1009-1016.
- Silitonga, A., Masjukia H., Mahliac, T., Onga, H., Chonga, W., Boosroh, M. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 346-360
- Shabani, I., Arani, A., Dakhel, H., e Iranmehr, G. (2009). Using of leather fibers as an additive in elastomeric compounds: Its effect on curing behavior and physico-mechanical properties. *Journal of applied polymer science*, 111(4), 1670-1675.
- Suganthi, V., Mahalakshmi, M., y Balasubramanian, N. (2013). Development of hybrid membrane bioreactor for tannery effluent treatment. *Desalination*, 309, 231-236.
- Thanikaivelan, P. (abril de 2014). *Transformation of Leather Industry Bio-Wastes into High-Value Multifunctional Materials*. En: International and Interuniversity Center for Nanoscience and Nanotechnology (IIUCNN). Third International Conference on Recycling and Reuse of Materials. Kerala, India.
- Viveros, C. y J. González. (2012). *Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC -2) empleando asfaltos modificados con caucho*, (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Yilmaz, O., Cem Kantarli, I., Yuksel, M., Saglam, M., y Yanik, J. (2007). Conversion of leather wastes to useful products. *Resources, conservation and recycling*, 49(4), 436-448.