

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE

USE OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE IN IMPROVING THE QUALITY OF THE ENVIRONMENT

Yury Alexandra VARGAS CORREDOR^{1*}, Liliana Ibeth PÉREZ PÉREZ¹

¹ Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Fundación Universitaria de San Gil–Unisangil, Yopal, Casanare.

* Autor corresponsal. E-mail: yuryvargas@unisangil.edu.co

Historia del artículo

Recibido: Octubre 12, 2017

Evaluado: Febrero 15, 2018

Aceptado: Marzo 1, 2018

Disponible: Marzo 13, 2018

Resumen |

La generación de subproductos o residuos agroindustriales en las diferentes etapas de los procesos productivos es actualmente una problemática a nivel mundial, debido a que en la mayoría de los casos no son procesados o dispuestos adecuadamente, situación que contribuye al proceso de contaminación ambiental. Los residuos agroindustriales cuentan con un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos, agregación de valor a productos originales y recuperación de condiciones ambientales alteradas. Este artículo presenta una revisión bibliográfica de las diferentes alternativas de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. La búsqueda incluyó publicaciones acerca del uso de residuos de origen agroindustrial en la prevención e intervención de posibles impactos negativos. Como resultado de la revisión se identificaron cinco categorías de empleo de los residuos agroindustriales: 1) obtención de bioenergéticos (bioetanol, biodiésel, biogás, biomasa energética), 2) proceso de compostaje, 3) aprovechamiento en la producción de alimentos para animales, 4) elaboración de otros productos de interés (ladrillos, composites, estibas, entre otros) y 5) recuperación de medios abióticos contaminados (remoción de colorantes, metales pesados e hidrocarburos). El aprovechamiento de estos residuos se ha convertido en un tema de gran interés por los diversos beneficios ambientales y económicos obtenidos, que promueven un desarrollo sostenible.

Palabras clave: residuos agroindustriales, aprovechamiento, productos, ambiente, recuperación.

Abstract |

Generating by-products or agroindustrial waste at the different stages of the production process is now a global problem because, in most cases, they are not processed or disposed of properly, which contributes to environmental pollution. Agroindustrial waste has a high potential to be exploited in different processes that include making new products, adding value to original products and recovering altered environmental conditions. This article presents a literature review of various alternate uses of agroindustrial waste in improving the quality of the environment. The search included publications about the use of agroindustrial waste in the prevention and intervention of possible negative impacts. As a result of the review, five categories of agroindustrial waste usage were identified: 1) obtaining bioenergy (bioethanol, biodiesel, biogas, energy biomass); 2) composting; 3) producing animal feed; 4) developing other products of interest (bricks, composites, pallets, etc.); and 5) recovering polluted abiotic media (removal of dyes, heavy metals and hydrocarbons). The use of this waste has become a topic of great interest for the various environmental and economic benefits obtained, which promote sustainable development.

Keywords: agroindustrial waste; environment; products; recovery; use.

INTRODUCCIÓN |

La agroindustria tiene la capacidad de fomentar el desarrollo económico, social y ambiental global, siempre y cuando mantenga el equilibrio entre la actividad desarrollada y la protección del medio ambiente en cada uno de sus procesos, desde la manipulación de la materia prima hasta la distribución y disposición final de los subproductos o residuos generados. Existen diferentes definiciones de agroindustria. Sin embargo, una de las más acertadas es la expuesta por Saval (2012), quien la define como una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para obtener alimentos o materias primas semielaboradas destinadas al mercado. De igual forma, algunos autores proponen una clasificación para esta actividad. Según la FAO (1997) la agroindustria puede clasificarse en dos clases, la primera está conformada por las industrias alimentarias y las no alimentarias, mientras que la segunda está compuesta por las industrias proveedoras de materia prima (como la molienda de trigo y arroz) y consumidoras de materia prima (como la fabricación de pan). No obstante, actualmente es muy difícil demarcar de manera precisa la actividad agroindustrial. En Colombia el sector agroindustrial genera el 6,2 % del PIB y se divide en subsectores como el acuícola, el de biocombustibles, el cármico, el forestal, el hortofrutícola, el lácteo, el cacaoero y el de chocolatería y confitería (Procolombia, 2012). Sin embargo, este sector también lo conforma la producción de caña de azúcar y alimentos, por mencionar algunos otros.

Como resultado adicional a las actividades principales de las empresas que conforman el sector agroindustrial, se generan subproductos o residuos agroindustriales que representan cantidades significativas y son considerados un problema ambiental (Restrepo *et al.*, 2011). De acuerdo con González (2013), en Colombia estos residuos aún no han sido aprovechados eficientemente por la falta de conocimiento sobre los métodos apropiados para la preparación y caracterización de sustancias de mayor valor agregado con la suficiente calidad e inocuidad.

La disposición inadecuada de los residuos de producción agroindustrial es una constante en este sector, y ocasiona alteraciones en los diferentes medios abióticos, bióticos y socioeconómicos, e incluso puede llegar a generar pérdidas económicas para las empresas. De esta manera, se identifica que la eliminación de tales residuos supone un problema de gestión para los diferentes establecimientos productores (Ramírez S, 2012). El aprovechamiento de los residuos agroindustriales permite dar solución a diferentes problemáticas ambientales originadas tanto por la generación y disposición de estos residuos como por otros factores producto del desarrollo de otros sectores productivos. De igual manera, ayuda a disminuir el uso de recursos naturales renovables y no renovables como materia prima de ciertos productos, y genera empleo y recursos económicos.

Ramírez S (2012) resalta que el aprovechamiento de residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecno-

logías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. Por consiguiente, el aprovechamiento de residuos agroindustriales se plantea como una estrategia base para su manejo, con diversidad de alternativas gracias a la composición tan variada que presentan esos residuos o subproductos.

Existen básicamente tres grupos de tecnologías para la recuperación de residuos agroindustriales: 1) la valorización biológica y química, 2) la obtención de combustibles (derivados de desechos) y 3) la valorización térmica. El primer grupo permite obtener gases, líquidos o sólidos comercializables —como pectinas, enzimas, aceites esenciales, fibra dietaria (alimento para animales y humanos), hongos comestibles, flavonoides y carotenoides— a partir de residuos orgánicos. Tales productos se pueden obtener mediante procesos biológicos como el compostaje o la lombricultura, entre otros. El segundo grupo permite obtener combustibles como el biogás (utilizado para diversos fines) y el tercero busca la reducción del volumen de los residuos y la recuperación de energía a partir de los gases, líquidos y sólidos generados, utilizando procesos como la incineración y la pirólisis (Yepes *et al.*, 2008).

El presente artículo tuvo como objetivo hacer una revisión bibliográfica de las diferentes alternativas de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. Se estableció como criterio de búsqueda el uso de residuos de origen agroindustrial en la prevención e intervención de posibles impactos negativos. Se identificaron diversidad de usos que contribuyen a la prevención de la contaminación, como obtención de bioenergéticos, abonos orgánicos y alimentos para animales, elaboración de productos de interés, entre otros. Asimismo, se logró establecer su empleo en la recuperación de medios contaminados con colorantes, metales pesados e hidrocarburos.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES |

Los residuos o subproductos se generan en cualquier proceso productivo y usualmente no son de utilidad posterior como materia prima para la cadena de producción (Rosas *et al.*, 2016). El sector agroindustrial no es la excepción, así que genera residuos que pueden ser definidos, según Saval (2012), como materiales en estado sólido o líquido obtenidos a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero sí se pueden aprovechar o transformar para obtener otro producto con valor económico, comercial o social. Cada subsector de la agroindustria genera residuos específicos. En su mayoría, estos presentan características óptimas para su aprovechamiento en otra cadena de producción o como alternativa de tratamiento o recuperación de algún medio contaminado.

Los residuos agroindustriales más utilizados para estos fines, según recientes investigaciones, son los provenientes de las frutas (Murillo *et al.*, 2010); el bagazo de agave, un residuo de la producción de tequila (Alonso *et al.*, 2012); la

cachaza, el bagazo, la carbonilla, la paja y el cogollo, residuos de la agroindustria de la caña de azúcar y de la caldera de las fábricas de ingenios azucareros (Montenegro *et al.*, 2015; Palma *et al.*, 2016); la cascarilla de arroz, los desechos cítricos (bagazo y cáscara), la cáscara del plátano, el zuro de maíz (Sánchez *et al.*, 2010; Vergara, 2015); la zoca de café (Aristizábal, 2015); las pastas proteicas, los lodos, el suero, el salvado, los mostos residuales, la vinaza, los residuos de material verde (cáscaras, hojas, tallos, bagazo de frutas) (Hernández *et al.*, 2016), entre otros.

Las características o composición química y biológica de los residuos agroindustriales dependen del proceso de transformación y de la materia prima utilizada. Sin embargo, los residuos agroindustriales son materiales lignocelulósicos; es decir, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina representan sus mayores porcentajes de composición (Alonso *et al.*, 2012; Saval, 2012). A su vez, Murillo *et al.* (2010) establecen que las frutas son alimentos ricos en compuestos fenólicos, especialmente pigmentos antocianicos de demostrada actividad antioxidante; por ende, sus residuos también presentarán estos compuestos. Por otra parte, según Alzate *et al.* (2011) los residuos de cítricos, mango, banano, uva, tomate, zanahoria y remolacha presentan en su composición ingredientes bioactivos. De igual forma, los residuos del café y cítricos comparten como característica en común su alto contenido en pectinas (Serrat *et al.*, 2016).

Los altos costos de disposición de los residuos agroindustriales, que deben ser asumidos por las mismas empresas generadoras, hacen que estos se transformen en un problema no solo ambiental sino económico (Yepes *et al.*, 2008). Por eso, el aprovechamiento de este tipo de residuos se convierte en una estrategia ambiental y económicamente adecuada de manejo de subproductos o residuos agroindustriales. Al momento de seleccionar la alternativa más apropiada para el aprovechamiento y posterior tratamiento de un residuo agroindustrial específico es necesario conocer su composición, la calidad de sus componentes, la cantidad que se genera y tener en cuenta que este proceso produce un nuevo residuo más agotado que puede tener otra aplicación o convertirse en un desecho (González, 2013; Saval, 2012). Asimismo, es necesario conservar las propiedades organolépticas y moleculares de varios residuos agroindustriales, como los orgánicos, para obtener resultados deseados en el desarrollo de procesos específicos posteriores. Según Alzate *et al.* (2011) los residuos orgánicos deben ser secados o deshidratados con el fin de extraer por medios físicos el agua contenida hasta que su nivel sea adecuado para la conservación del residuo por largos periodos. Ha de tenerse en cuenta que el nivel de agua varía de acuerdo al residuo orgánico. Existen diferentes alternativas de secado: solar controlado, por aire caliente, por aspersión o deshidratación por ósmosis.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES: IMPACTOS EN EL AMBIENTE |

La presencia de residuos agroindustriales genera impactos negativos y positivos en el ambiente. Todo proceso

productivo desarrollado en la agroindustria, sin importar la escala, genera residuos agroindustriales a diferentes niveles de acuerdo a sus características. Cuando estos residuos no son debidamente dispuestos o adecuadamente manejados provocan alteraciones adversas en el ambiente que son perjudiciales y afectan de modo negativo el desarrollo de los seres vivos. Sin embargo, los residuos agroindustriales bien aprovechados previenen la contaminación de diversos ecosistemas y podrían recuperar las condiciones del ambiente alteradas por las diversas actividades humanas, así que contribuirían a mejorar la calidad de aquel y evitarían afectaciones a la salud humana (Barragán *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2016).

Contaminación ambiental por residuos agroindustriales

Se entiende como contaminación el cambio en la calidad física, química, radiológica o biológica de un recurso (aire, tierra o agua) causado por el hombre o debido a actividades humanas y que es perjudicial para la existencia, fin o uso potencial del recurso (Rodríguez, 1999). La contaminación ambiental puede clasificarse por tipo, origen o naturaleza química de los contaminantes; por sus efectos o por el proceso que la causa. Este último puede demarcar el límite entre la contaminación de origen natural y la antropogénica. El origen antropogénico hace referencia a que la contaminación es resultado de las actividades humanas, como el desarrollo agroindustrial (Gómez *et al.*, 2016).

La generación de residuos agroindustriales sólidos, líquidos o gaseosos constituye focos potenciales de contaminación y riesgo para la salud (Guerrero y Valenzuela, 2011), si no son dispuestos o procesados apropiadamente. De acuerdo con Barragán *et al.* (2008) algunos de estos residuos son quemados o vertidos en rellenos sanitarios, lo que produce una gran liberación de dióxido de carbono (CO₂), contaminación de cursos de aguas, molestias por presencia de olores, proliferación de ratas, moscas y otros insectos, entre otros efectos negativos. La generación de estos residuos puede ocurrir durante los procesos relacionados con el cultivo u obtención de materia prima o en las actividades de procesamiento de esta. Si no son reciclados o dispuestos apropiadamente, tales residuos producen diversos impactos ambientales adversos, lo que genera, según Guerrero y Valenzuela (2011), contaminación principalmente en el suelo y el agua, tanto en fuentes superficiales como subterráneas. Adicionalmente, en menor proporción se ocasiona contaminación en la atmósfera por las emisiones provenientes de la operación agroindustrial que pueden incluir material particulado, óxido de azufre, óxidos nitrosos, hidrocarburos y otros compuestos orgánicos.

La agroindustria alimentaria —oleaginosas, vegetales, azúcar, carnes, pesca, lácteos, etc.— causa mayor impacto en el ambiente, entre otras, por la generación de diversos subproductos o residuos sólidos y líquidos en las diferentes etapas del procesamiento (Restrepo, 2006). Por ejemplo, en el

procesamiento de la palma de aceite (oleagínosa) se generan efluentes contaminados, como aguas y lodos residuales, y residuos sólidos —como impurezas de la fruta, cuesco y tusas vacías— en las diferentes etapas del proceso de recepción, esterilización, desfrutado, extracción y clarificación, que son en la mayoría de los casos vertidos y dispuestos en el ambiente sin ningún tratamiento previo (Benomie y Reyes, 2012). De igual forma, en la etapa de lavado desarrollada en la industria procesadora de frutas y hortalizas se producen residuos líquidos (Guerrero y Valenzuela, 2011). Asimismo, otra industria que presenta un alto potencial de generación de aguas residuales, con DBO (demanda biológica de oxígeno) de hasta 8000 mg/L, con características patógenas y principalmente presencia de sangre, huesos y vísceras, es la cárnica (Restrepo, 2006). Por su parte, la industria láctea también genera aguas residuales generalmente neutras, que contienen sustancias orgánicas disueltas como lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas, con una DQO (demanda química de oxígeno) entre 2000 y 4000 mg/L y una DBO entre 2000 y 3000 mg/L (Arango y Sánchez, 2009). De acuerdo con esto, los diferentes efluentes se caracterizan por presentar grandes cargas orgánicas, patógenos y alta concentración de sólidos, grasas y aceites. Todo esto puede provocar una disminución de oxígeno en la fuente receptora, muerte de especies acuáticas, producción y emisión de biogás o formación de una capa de sedimento en el fondo del cauce, donde se producirá una degradación anaerobia con la consecuente formación de gases y emisión de olores no agradables (Guerrero y Valenzuela, 2011).

Los residuos agroindustriales son de naturaleza predominantemente sólida y orgánica. Según Sánchez *et al.* (2010) estos residuos en su mayoría corresponden a biomasa lignocelulósica rica en polímeros de celulosa y hemicelulosa (entre 75 % y 80 %), registran una velocidad de degradación muy baja y adicionalmente, al no ser sometidos a un proceso de aprovechamiento, en la mayoría de los casos, presentan una disposición final deficiente, depositándose principalmente en lotes baldíos o espacios verdes sin ningún control (Mejía *et al.*, 2007). De acuerdo a lo expuesto por Saval (2012) si el residuo contiene carbohidratos, los microorganismos del suelo iniciarán su degradación y se generarán en algunos casos lixiviados que podrían infiltrarse en el subsuelo y provocar contaminación de los mantos acuíferos; si la degradación ocurre por medio de bacterias anaerobias, se podrían producir malos olores debido a gases como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el metano (CH_4).

La industria de la caña de azúcar y sus derivados, además de generar vertimientos de residuos materiales y energéticos, participa en la emisión de residuos a la atmósfera producto de la combustión del bagazo de caña (5,5 kg de cenizas volátiles por tonelada de caña procesada, aproximadamente), los combustibles empleados en el proceso y los vapores de fermentación y de las unidades de sulfitación (para el refinado del azúcar) (González *et al.*, 2012; Restrepo, 2006), lo que aumenta la contaminación atmosférica. Con base en lo expuesto previamente, los residuos y subproductos

de la agroindustria, al disponerse sin tratamiento previo o sin ningún control, alteran las condiciones del ambiente y provocan un desequilibrio natural que afecta la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de quienes habitan la zona.

Residuos agroindustriales en la protección del ambiente

Los residuos agroindustriales presentan una alta posibilidad de ser aprovechados generando beneficios para el ambiente y la sociedad, al reciclarse y utilizarse para prevenir la contaminación o recuperar ecosistemas alterados. La diversidad de residuos agroindustriales puede ser utilizada principalmente como alternativa para la producción de *compost* (Hernández *et al.*, 2016) y bioenergéticos (Muñoz *et al.*, 2013). Sin embargo, en un nivel menor está el aprovechamiento de estos en la producción de alimentos para animales (Saval, 2012) y fabricación de ladrillos o bloques (Mattey *et al.*, 2015) u otros productos de interés con un valor agregado.

La producción de *compost* puede reducir o incluso eliminar el uso de fertilizantes químicos puesto que tiene la capacidad de mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo aumentando su fertilidad actual (Rosas *et al.*, 2016). Además, puede prevenir la eutrofización en diferentes fuentes hídricas por la escorrentía de fertilizantes utilizados en diversos cultivos. Por otra parte, la producción de bioenergéticos como los biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biogás) contribuye, según Muñoz *et al.* (2013), a la reducción del uso de los combustibles fósiles, la lucha contra el cambio climático a través de tecnologías libres de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y el incremento de la competitividad de la economía. En este sentido, es posible expresar que los residuos agroindustriales previenen la contaminación al no ser dispuestos directamente en el ambiente y convertirse en productos que al ser utilizados son menos contaminantes, permiten conservar los recursos naturales no renovables y renovables, contribuyen con la economía nacional y de esta manera promueven un desarrollo sostenible.

Los residuos agroindustriales son utilizados como una solución a problemáticas ambientales como la contaminación del suelo y de fuentes hídricas por el vertimiento de hidrocarburos y efluentes textiles contaminados con metales pesados, compuestos que son comúnmente difíciles de degradar. Existen residuos agroindustriales, como la cascarilla de arroz, que pueden facilitar la eliminación de los colorantes presentes en el agua —debido a su estructura aromática, estos se caracterizan por su difícil y lenta degradación, lo que genera su acumulación y los convierte en fuentes de contaminación— (Moreno *et al.*, 2011). Según Álvarez *et al.* (2011), la remoción de colorantes mediante la adsorción utilizando estos residuos se perfila como una alternativa de tratamiento innovadora, eficiente y de bajo costo, que además impacta favorablemente al ambiente al emplear materiales de amplia disponibilidad y usualmente poco aprovechados. En general, gracias a las características adsorbentes que presentan algunos

residuos agroindustriales es posible recuperar los ambientes afectados por el desarrollo de actividades como las expuestas previamente.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO BIOENERGÉTICOS |

La bioenergía se define como la manera de generar energía a partir de biomasa: materia viva o derivada de seres vivos (González, 2009). Según Soto (2012), es generada por los biocombustibles. Algunos residuos agroindustriales presentan un gran potencial para producir bioenergía a partir de biocombustibles como la biomasa energética, el bioetanol, el biodiésel, entre otros, e incluyen un rango amplio de productos que a su vez se han dividido en diferentes tipos de combustible. Los sólidos (leña, residuos agrícolas y pecuarios y residuos municipales) se gasifican para producir calor y electricidad. Los líquidos, que utilizan cultivos energéticos (caña de azúcar, oleaginosas, higuera, palma de aceite y coco), sirven para producir etanol y biodiésel (González, 2009). En este sentido, los biocombustibles (bioenergéticos) son combustibles renovables producidos directa o indirectamente a partir de biomasa, es decir, materiales no fósiles de origen biológico, como la leña, el abono animal, el carbón vegetal, el biogás, el biohidrógeno, el bioalcohol, la biomasa microbiana, los desechos agrícolas y forestales y sus subproductos, los cultivos energéticos y otros (FAO, 2013; Soto, 2012). Los biocombustibles se agrupan en tres categorías: combustibles de madera, agrocombustibles y subproductos de origen municipal. Sin embargo, existen otras clasificaciones (González, 2009). En general los biocombustibles son considerados como una estrategia energética más sustentable que la quema de combustibles fósiles, que genera emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye al cambio climático (Valdés y Palacios, 2016.).

Bioetanol

El bioetanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de azúcares presentes en granos y plantas vegetales tales como cereales y caña de azúcar. Dichos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa (Montiel, 2010). Como alternativa ambiental se presenta la utilización de residuos agroindustriales lignocelulósicos para la producción de bioetanol empleando en su mayoría procesos biológicos.

La producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos presenta cuatro etapas: 1) pretratamiento (mecánico, térmico, fisicoquímico, químico o biológico), 2) hidrólisis enzimática, 3) detoxificación mediante métodos biológicos o fisicoquímicos y 4) fermentación principalmente de hexosas y pentosas. De esta última etapa se obtienen como productos finales un alcohol en forma de etanol, dióxido de carbono (CO_2) en forma de gas y moléculas de ATP (adenosín trifosfato) que consumen los microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico (Sánchez et al., 2010). El bioetanol de primera generación es el

producido a partir de cultivos tales como caña de azúcar, maíz, cebada, trigo, centeno, sorgo y papa (Montiel, 2010). Mientras tanto, el bioetanol de segunda generación se produce a partir de residuos sólidos de origen agroindustrial con bajo contenido de pentosa, como el producido por autohidrólisis. Este último proceso implica las siguientes tres etapas: 1) pretratamiento de LCM (material lignocelulósico: celulosa, hemicelulosa y lignina) para la mejora de la susceptibilidad de las enzimas, 2) hidrólisis enzimática de la celulosa en glucosa y 3) conversión biológica de la glucosa en etanol (Alonso et al., 2011).

Vega (2010) evaluó la hidrólisis del bagazo de caña de maíz y aserrín de laurel para la obtención de azúcares fermentables usando las enzimas celulasa producidas por los hongos celulolíticos *Trichoderma atroviride*, *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.* y *Fusarium sp.* Se desarrolló la producción de bioetanol empleando dos técnicas de fermentación, una por sacarificación y fermentación simultánea y otra por fermentación discontinua empleando *Saccharomyces cerevisiae*.

Capdevila et al. (2015) desarrollaron un modelo de simulación del proceso de fermentación/separación del bioetanol a partir de cascarilla de arroz pretratada e hidrolizada aplicando el simulador Aspen Hysys. Para este modelo establecieron variables de relación de la biomasa—agua (1:2,89), caudal de biomasa (50 t/h) y temperatura de entrada al separador (30 °C)— que conducen a maximizar el rendimiento del biocombustible hasta obtener una producción de bioetanol de 8,81 t/h con una pureza del 65,51 % p/p. En concordancia con los resultados anteriores Dagnino et al. (2014) utilizaron con el mismo fin la cascarilla de arroz y el aserrín de algarrobo sometidos a un proceso de pretratamiento ácido seguido de hidrólisis enzimática y fermentación. Se evaluó la conveniencia de la primera etapa. Después del pretratamiento, la cascarilla de arroz y el aserrín de algarrobo presentaron respectivamente un 52,8 % y un 51,2 % de glucanos, que luego de la hidrólisis enzimática, a las 72 h, se convirtieron en 22 % y 41,5 % respectivamente. Solo se obtuvo de material original un 19,7 % de cascarilla de arroz y un 9,6 %, de aserrín de algarrobo. Se concluyó que los rendimientos de la fermentación de los hidrolizados fueron aproximadamente del 100 % en todos los casos.

Biodiésel

El biodiesel es el producto de la transesterificación que se da a partir de la reacción química entre los ácidos grasos provenientes de una gran variedad de cultivos oleaginosos, así como de grasas animales y de aceites y grasas recicladas. Sin embargo, se obtiene principalmente de alcoholes como el metanol o el etanol y aceites vegetales (Montiel, 2010).

Existen residuos agroindustriales de los cuales es posible obtener grasas y aceites vegetales. Por ejemplo, las semillas de zapote mamey (*Pouteria sapota*), un subproducto de plantas procesadoras de frutas. En la investigación de Laiz et

al. (2009) se sintetizó biodiésel por transesterificación alcalina del aceite extraído de la “almendra” del zapote mamey. Dichas almendras tuvieron en promedio un contenido de aceite de 37,5 %, mejor en relación con la cantidad promedio de aceite de la mayoría de semillas oleaginosas, lo que hace de este residuo un material potencialmente rentable para la obtención de biocombustibles como el biodiésel. Por otra parte, García (2008) afirma que los compuestos lignocelulósicos tienen alto contenido de material fermentable, pero que el acceso a los componentes fermentables (pectina, hemicelulosa y celulosa) por hongos o enzimas constituye la principal limitante de la tecnología de fermentación, y por consiguiente, de la producción de biodiésel. García evaluó tres métodos de pretratamiento del bagazo de remolacha, tanto fresco como deshidratado, con el fin de incrementar la disponibilidad de los compuestos fermentables. Los tratamientos consistieron en el empleo de cal apagada, amoníaco y sacarificación con fermentación simultánea utilizando el hongo *Umbelopsis isabellina* para obtener lípidos. El tratamiento que reportó los mejores resultados fue el de sacarificación con fermentación simultánea, que obtuvo 6 % de lípidos por gramo de materia seca inicial. Es preciso destacar que estos lípidos deben ser posteriormente extraídos y transesterificados para obtener biodiésel.

El bagacillo de caña, el polvillo de fique y el afrecho de yuca, residuos agroindustriales típicos del departamento de Cauca, se caracterizan por ser biomasa lignocelulósica y al mismo tiempo residuos agroindustriales, por lo cual han sido de gran interés para la producción de biodiésel y otros biocombustibles. Muñoz et al. (2014) evaluaron el aprovechamiento como biocombustible térmico y biorefinería de dichos residuos y sus mezclas a partir de la determinación de sus propiedades térmicas, físicoquímicas y morfológicas. Se realizaron ensayos exploratorios de pretratamientos y posibles usos, y se concluyó que el polvillo de fique sin mezclarse y la mezcla a partes iguales de bagacillo de caña, polvillo de fique y afrecho de yuca son aptas para la producción de biodiésel.

Biogás

El biogás es el producto gaseoso que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica mediante acción bacteriana o de su combustión en condiciones anaeróbicas. Es considerado como un subproducto del compostaje y la pirólisis. Está compuesto principalmente por metano (50 %-60 %), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de hidrógeno y nitrógeno (Yepes et al., 2008). De los residuos agroindustriales —principalmente de las frutas (cáscara o pulpa) y de otros como los tallos y hojas de maíz o trigo— es posible obtener biogás para lámparas, estufas, calentadores, motores a gas, etc. De igual forma, el biogás puede ser utilizado para producción de energía eléctrica o térmica y como biocarburante (Valdés y Palacios, 2016; Yepes et al., 2008). Sin embargo, en algunos casos para la producción de biogás, es necesario mezclar la materia prima de los residuos agroindustriales con otros residuos no necesariamente resultado del mismo agroproceso. Por ejemplo, Ramírez E (2012) evaluó la obtención de biogás a

partir de una mezcla de estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado). Se trabajaron diferentes combinaciones de mezclas de peso (%) y sustrato: cosustrato y diluciones con agua. Con la mezcla estiércol-torta de piñón (50:50) se obtuvo la mayor producción de biogás, pero con un contenido de metano del 5,5 %. La mezcla estiércol-torta de piñón (20:80) produjo 1248 mL de biogás/kg con un biogás de baja calidad como resultado, inútil para la combustión o producción de energía. Con la mezcla estiércol-cascarilla de arroz (50:50), se obtuvo una producción de 2735 mL de biogás/kg con un contenido de metano de 48,9 %. La mezcla estiércol-rumen de ganado vacuno (50:50) produjo 1128 mL de biogás/kg con un 47,2 % de metano. A partir de esto, se determinó que los residuos agroindustriales que presentaron un mayor potencial de combustión o producción de energía fueron la cascarilla de arroz y el rumen de ganado vacuno.

Biomasa energética. Potencial energético de los residuos agroindustriales

Parte de los residuos de la agroindustria representa una biomasa con potencial energético que puede ser utilizada como biocombustible. En diferentes partes del mundo ya se ha presentado el aprovechamiento térmico de la biomasa. Por ejemplo, en Europa las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente son las más comunes en el sector de la biomasa (Muñoz et al., 2014). En Colombia el potencial utilizable de biomasa se estima en 450 PJ/año, con valores de poder calorífico inferior de 18 743,12 kJ/kg para tallos de café y 7531,2 kJ/kg para raquis de banano. Es preciso tener en cuenta que el poder calorífico es la cantidad de calor liberado durante la combustión por unidad de masa, a presión constante y a 25 °C (Muñoz et al., 2013, 2014).

Los cultivos de maíz, caña de azúcar o palma de aceite usualmente son conocidos como cultivos bioenergéticos porque de sus residuos de cosecha o procesamiento es posible obtener biocombustibles. Sin embargo, existen más cultivos de este tipo, como la soya, la jatropha y el ricino (Valdés y Palacios, 2016). En México, Debernardi et al. (2016) determinaron la energía disponible a partir de biomasa de residuos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). Muestrearon 25 ingenios azucareros y establecieron que para la cosecha 2013-2014 se molieron 52 246 508 t de caña y que la biomasa aprovechable energéticamente provenía del bagazo y las puntas de tallo. Se determinó que el PCI (poder calorífico inferior o neto) promedio obtenido por tonelada de caña molida representó un total de 57 277 234,6 TJ de energía disponible, equivalentes a 9 870 441,8 barriles de petróleo, de los cuales 6 698 332,1 son utilizados como fuente de energía en las calderas de los propios ingenios del país.

Asimismo, Muñoz et al. (2013) establecieron el potencial energético de tres tipos de biomasa residual agroindustrial presentes en el departamento de Cauca —el bagacillo de caña, el polvillo de fique y el afrecho de yuca— y de mezclas en diferentes proporciones de esos mismo residuos. Como

resultado obtuvieron que el poder calorífico de tales residuos se mantuvo homogéneo en un valor promedio de 15 623,35 kJ/kg y que el bagacillo de caña fue el que aportó mayor cantidad de energía. Según Ponce *et al.* (2009) Colombia es el quinto país productor de aceite de palma en el mundo y las plantas de beneficio de este se caracterizan por presentar cantidades considerables de subproductos de alto valor energético, como racimos vacíos, fibras, cuescos y efluentes líquidos con alto contenido de componentes orgánicos, todo lo cual es potencialmente aprovechable. Esto se reflejó en los resultados obtenidos en su investigación, en la que determinaron el potencial de cogeneración de energía eléctrica de tres plantas de beneficio localizadas en dos importantes regiones productoras de aceite de palma en Colombia. Se concluyó que la biomasa disponible en esas plantas no solo garantiza la demanda de energía del proceso, sino que permite generar excedentes de electricidad.

Otros biocombustibles

Además de los biocombustibles anteriormente mencionados existe una gran variedad que no tiene un impacto significativo en el mercado de los biocombustibles. Un ejemplo se halla en la investigación realizada por Aristizábal (2015), que diseñó y analizó el proceso para obtener etanol y combustible para avión o bioaditivos para combustible, a través de una plataforma de furfural, a partir de biomasa lignocelulósica compuesta de cascarilla de arroz, bagazo de caña y zoca de café. Los procedimientos experimentales aplicados en tales residuos obtuvieron resultados en la producción de etanol, compuestos furanos y derivados. Los respectivos residuos pasaron por tres etapas —secado y tamaño de partícula, hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática— con el fin de alterar su estructura y obtener azúcares (xilosa y glucosa) como plataforma para transformarlos en los productos de interés.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

El suelo es uno de los recursos abióticos importantes para la vida y cumple un papel funcional en el desarrollo económico de un determinado país o región. Es un cuerpo natural compuesto de capas (horizontes del suelo) de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. Asimismo, es un componente esencial de la Tierra y sus ecosistemas y producto final de la influencia combinada del tiempo, el clima, la topografía, los organismos (flora, fauna y ser humano) y los materiales parentales (rocas y minerales originarios) (FAO, 2017). Existen diversas técnicas que permiten mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo y su capacidad productiva. Entre estas se encuentran la aplicación de *compost* (humus) producido mediante el compostaje de residuos agrícolas y agroindustriales y el uso de estos residuos directamente. Según Varnero *et al.* (2011) el compostaje permite la recuperación de residuos orgánicos heterogéneos mediante un bioproceso aeróbico que los convierte en *compost*. Este es un producto homogéneo de gran calidad, que al aplicarse al suelo incrementa la población microbiana

existente y su actividad, además de los contenidos minerales y la capacidad de intercambio catiónico, todo lo cual aumenta la fertilidad de aquel. Hay que mencionar además que el *compost* es importante porque supone una solución a la demanda de materia orgánica, los desequilibrios nutricionales de los suelos y los costos de fertilizantes y calidad ambiental que tienen que asumir los diferentes productores agrícolas con el fin de mejorar sus producciones. Adicionalmente, el *compost* renueva los ciclos ecológicos a la vez que evita que los residuos agroindustriales orgánicos terminen en los vertederos (Navia *et al.*, 2013).

A partir de la descomposición térmica de la cascarilla de arroz, Prada y Cortés (2010) capturaron, a través de soluciones alcalinas acuosas de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), los gases de combustión de este residuo para transformarlos en carbonato de calcio (CaCO_3), conocido como *caliza*, una sustancia útil en labores agrícolas. Adicionalmente determinaron que las cenizas generadas por este proceso, debido a su composición química, pueden ser de gran utilidad en actividades agrícolas, especialmente como fuente de fósforo, magnesio y azufre, al presentar componentes como óxido de magnesio (MgO), óxido de fósforo (P_2O_5) y sulfato (SO_4 -2). El nitrógeno, por su parte, es uno de los macronutrientes esenciales para el suelo, influye en su fertilidad y es fijado por bacterias nitrificantes presentes en este. Pues bien, el *compost* obtenido a partir de residuos agroindustriales presenta este tipo de microorganismos, que son de mucha utilidad para el suelo. En la investigación adelantada por Montenegro *et al.* (2015) fue evaluada la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno (diazotróficas) mediante la presencia del gen *nifH*, característico exclusivamente de este tipo de bacterias, en tres mezclas de residuos con proporciones diferentes de *compost* de cachaza, arena y carbonilla, y con proporciones iguales de cascarilla de arroz y bagazo de caña. Se sugirió finalmente que los contenidos de materia orgánica son relevantes para la presencia de estas bacterias y como potencial estimulante de fijación biológica de nitrógeno.

Los residuos como la cachaza y el bagazo de la agroindustria de caña de azúcar son usualmente utilizados para la elaboración de abonos orgánicos, y por eso se prestan para diferentes estudios. Por ejemplo, Palma *et al.* (2016) evaluaron la calidad nutrimental de diferentes tipos de vermicompostas de esta naturaleza mezcladas con fuentes de estiércol (de gallina, caballo, vaca y borrego) y sometidas a compostaje por tres meses con lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). Se evidenció que los mejores tratamientos fueron los adicionados con estiércol de borrego y vaca. Por una parte, el estiércol de borrego se acercó más a un pH neutro, así que ofreció una mejor calidad de vermicomposta, al registrar el valor más alto de potasio intercambiable, AH (ácidos húmicos) y AF (ácidos fúlvicos). Por otra parte, el tratamiento con estiércol de vaca, presentó la mejor relación AH/AF, una tendencia a la acumulación del carbono orgánico en la vermicomposta y por lo tanto baja mineralización de esta.

Por otra parte, el suero de leche es un residuo agroindustrial proveniente de la industria láctea que puede ser utilizado para la elaboración de *compost*. La investigación adelantada por Gordon (2013) sobre la elaboración de abono orgánico a partir de suero de leche y otros componentes (agua, estiércol, melaza, alfalfa, ceniza, humus y lactofermento) en diferentes concentraciones establecidas en 9 tratamientos, obtuvo los mejores resultados de composición del abono en el tratamiento donde la concentración de suero de leche fue mayor. El abono orgánico presentó 839,6 ppm de N, 226,44 ppm de P, 5833,1 ppm de K, 1436,26 ppm de S, 3165,3 ppm de Ca, 3,12 ppm de Mg, 10,66 ppm de Zn, 1,95 ppm de Cu, 3660,97 ppm de Fe y un pH de 5,49.

La agroindustria del café también aporta una materia prima muy importante para la elaboración de *compost*: la pulpa del café posee una importante carga de nutrientes reutilizables en el proceso de compostaje, puede ser aplicada como abono orgánico (Hernández *et al.*, 2016) y también ha sido mezclada con otros componentes para obtener *compost*. Escobar *et al.* (2012) prepararon tres tipos de abonos orgánicos con pulpa de café, banano, bovinaza y gallinaza en diferentes concentraciones. Todas las mezclas contenían pulpa de café; sin embargo, no todas presentaban los demás componentes. Como resultado se obtuvo que el abono orgánico elaborado con mezclas que presentaban gallinaza tuvo mejores valores de calidad, abundancia y diversidad biológica. Todos los abonos orgánicos presentaron valores altos, lo que muestra la importancia de hacer mezclas a partir de sustratos simples para optimizar el uso de residuos agroindustriales orgánicos y obtener mejores resultados.

El nejayote es otro subproducto o residuo agroindustrial principalmente de interés para el mejoramiento de suelos ácidos, gracias a su naturaleza alcalina, puesto que este tipo de suelos requiere de la aplicación de correctores de pH como la cal. El alto contenido de calcio favorece el incremento del valor de pH del suelo y así aumenta su fertilidad y su productividad (Rosas *et al.*, 2016). Este subproducto hace referencia al agua residual del proceso de nixtamalización del maíz (DGCS, 2013) y contiene residuos de este cereal, lo que lo hace rico en materia orgánica en suspensión. Igualmente, está constituido por pericarpio, endospermo, pequeñas porciones de germen y hemicelulosas, residuos de cal suspendida que fueron usados en la cocción, entre otros (Rosas *et al.*, 2016).

Por otra parte, en la obtención de aceite de higuera se genera como subproducto la cascarilla del fruto, que puede ser fermentada con hongos filamentosos, como el *Aspergillus niger*, para obtener un sustrato con alto contenido de nutrientes. Este puede ser utilizado como abono orgánico (Aguilar *et al.*, 2013) para reducir o evitar el uso de fertilizantes en el suelo. De igual forma, es posible a través de la fermentación en estado sólido, con el empleo de los hongos basidiomicetos de pudrición blanca, biotransformar subproductos agrícolas lignocelulósicos como el abono orgánico. Un ejemplo de esto es la biotransformación de la pulpa de café con el empleo de setas comestibles *Pleurotus*

spp, en la cual se obtiene un sustrato remante (pleurotina de la pulpa de café), generado en el bioproceso de obtención de los cuerpos fructíferos, que puede ser aprovechado como abono orgánico y utilizado como fertilizante (Bermúdez *et al.*, 2014) de modo que permite obviar el uso de agroquímicos en los diferentes cultivos.

Finalmente, otro caso exitoso en el cual se utilizaron los residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del suelo fue el desarrollado por Pino *et al.* (2012), quienes caracterizaron y evaluaron los biosólidos (lodos) producidos en un reactor piloto alimentado con residuos agroindustriales. La caracterización química de los lodos se hizo a través de la medición de pH, materia seca y contenidos totales de C, N, P, K, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn. El estudio también evaluó la descomposición y liberación de los nutrientes presentes en los lodos agregando distintas dosis de lodo a dos suelos de diferente textura, equivalentes a 80 y 160 kg ha⁻¹ de N. Se determinaron la respiración del suelo y la liberación de nutrientes durante 115 días. Entre los resultados más importantes figura que el nitrógeno del lodo se mineralizó rápidamente, hasta llegar a niveles de N mineral similares a los de los suelos fertilizados. El agregado de lodo promovió la actividad microbiana del suelo e incrementó el contenido de fósforo (P) disponible, N mineral, calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables. Se concluyó, entonces, que los biosólidos fueron beneficiosos para la fertilidad del suelo.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS PARA ANIMALES |

El aumento del precio de la materia prima, ya sea los cereales u otros componentes necesarios para la elaboración de concentrados o cualquier otro tipo de alimento para animales, crea la necesidad de buscar alternativas más económicas y que permitan obtener un producto con un valor nutricional óptimo. Varios de los residuos agroindustriales presentan una composición química y física que permite utilizarlos para este fin con resultados satisfactorios. Algunos han sido utilizados en la producción de alimentos para ruminantes, cerdos, aves y otras especies (Saval, 2012).

Cuba es uno de los países donde se han utilizado los residuos agroindustriales para la alimentación de animales como el ganado vacuno, el porcino y otras especies. Con relación a esto, según el Instituto de Investigación Porcina y la FAO (1994) en la isla se han utilizado algunos subproductos agrícolas en la alimentación de los cerdos, como follaje del boniato, foliares del plátano y residuos de frutas cítricas. Por ejemplo, el follaje del boniato o batata se caracteriza por ser principalmente una fuente de proteína y vitaminas que ha sido usado para reemplazar un 10 % de los piensos comerciales consumidos por cerdos destetados (6 a 12 kg) con resultados satisfactorios. Por otra parte, Martín (2009) reportó que subproductos como la caña de demolición, residuos de cosecha, melazas, bagazo, mostos, fondajes, cabecilla, salvado, pastas proteicas, residuos de cervecera y residuos de hortalizas han sido

utilizados para la alimentación animal. De igual forma, este autor relaciona alimentos producidos a partir de las melazas y la destilación asociada a su fermentación. La alta concentración de azúcares de las melazas ha posibilitado su uso como fuente de energía para el consumo directo de rumiantes y monogástricos. Sin embargo, su principal limitante es el bajo contenido de nitrógeno, lo que ha tenido como expresión práctica la fabricación de levadura torula y melazas enriquecidas, que han sido utilizadas en la alimentación de diferentes especies.

Según Yepes *et al.* (2008) los residuos agroindustriales con alto valor de FDT o FDS (fibra dietaria total o soluble) pueden utilizarse en la producción de sustancias alimenticias para consumo animal. Por ejemplo, los residuos de maracuyá tiene un valor de FDT de 66,9 %, y los residuos de limón y naranja presentan un valor de FDS de 33 % y 35 % respectivamente. Además, estos residuos también pueden ser utilizados para la producción de sustancias alimenticias humanas. Los flavonoides, por ejemplo, sirven como suplemento alimenticio para animales y humanos. En México utilizaron el bagazo de *Agave tequilana* W. var. Azu en raciones alimenticias para rumiantes. A este residuo le evaluaron sus características físicas, que dependen de los procesos de cocción y molienda efectuados en la fábrica de tequila de la cual provenga, y su composición química, que hace evidente la proporción mayoritaria de las fibras lignocelulósicas expresadas en un 77 % en materia seca (celulosa, hemicelulosa y lignina). Lo anterior confirma que el bagazo de agave tiene potencial para ser utilizado como parte fibrosa de porciones alimenticias de rumiantes. No obstante, presenta un inconveniente referente a la baja digestibilidad por su alto contenido de lignina, que puede disminuirse mediante un tratamiento con hidróxido de calcio para hacer del bagazo un suplemento óptimo (Alonso *et al.*, 2012).

Por otra parte, existe el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de AF (alimentos funcionales) a través de la nutrición animal (Alzate *et al.*, 2011). La inclusión de ciertos componentes de los residuos agroindustriales en la producción de alimentos para animales aumenta la calidad de estos, mejorando el producto obtenido de animales como las aves y el estado de salud de la especie. Cabe resaltar que los AF son alimentos procesados con ingredientes que desempeñan una función específica en la fisiología del organismo, más allá de su contenido nutricional (Fuentes *et al.*, 2015). Alzate *et al.* (2011) registran el uso de residuos vegetales con alto contenido de carotenoides (compuestos bioactivos), provenientes de industrias agroalimentarias y centrales de abasto, como materia prima para elaborar premezclas que reemplazan el uso de colorantes artificiales, por ejemplo, en los concentrados para alimentar gallinas ponedoras. Se hace así porque carotenoides como la luteína y la zeaxantina son responsables del color de la yema del huevo (producto avícola), además de tener un importante efecto antioxidante. Así, la dieta suministrada produce sustancias bioactivas en el huevo y mejora la salud del animal, lo que contribuye a su vez a una alimentación

humana saludable, e incluso a la prevención de enfermedades crónicas en los seres humanos que los consumen.

Otro caso similar al anterior es el desarrollado por González (2013), quien evaluó el potencial de residuos agroindustriales como la lechuga, el tomate de aliño, la naranja, el repollo, el pimentón, el tomate de árbol, la auyama, el maracuyá, la papayuela y la zanahoria, provenientes de la Central Mayorista de Antioquia, como fuentes de ingredientes funcionales. Los residuos se caracterizaron evaluando su composición nutricional, el contenido total de compuestos bioactivos (carotenoides, fenoles) y la capacidad antioxidante mediante el método Orac. Como resultado se obtuvo que los residuos escogidos en la formulación de la premezcla para la elaboración de concentrados para gallinas ponedoras fueron en orden: pimentón, zanahoria, tomate de aliño, repollo y lechuga, por presentar los mayores contenidos en carotenoides totales y mayor volumen de generación. Igualmente, el pimentón fue el residuo que presentó mejores valores en el contenido de carotenos, fenoles totales y capacidad antioxidante, lo cual permite inferir que su uso en la premezcla hará que esta tenga gran capacidad para pigmentar los huevos de las gallinas y conferirles además propiedades funcionales.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA ELABORACIÓN DE OTROS PRODUCTOS DE INTERÉS |

El aprovechamiento de residuos agroindustriales permite la obtención de materia prima para ser utilizada en diferentes procesos o en la elaboración de productos con un valor agregado, amigables con el ambiente y similares a los productos obtenidos con materias primas comerciales. En apartados anteriores se ha documentado el uso de residuos agroindustriales como bioenergéticos, abono orgánico o *compost* y alimentos para animales. No obstante, esos pueden ser utilizados en la elaboración de otros productos, como los descritos a continuación.

En la molienda del arroz se obtiene como uno de sus residuos o subproductos su cascarilla, que puede ser utilizada como combustible en el secado de este cereal y genera como subproducto de la combustión la ceniza de CCA (cascarilla de arroz). Este último subproducto presenta porcentajes de sílice amorfa que pueden ser utilizados para la fabricación de bloques en concreto no estructurales y ladrillos de mampostería. Matthey *et al.* (2015) incorporaron la CCA en mezclas de concreto con el fin de estudiar su efecto como puzolana en la sustitución parcial de cemento Portland tipo I y como agregado fino en la fabricación de bloques no estructurales y bloques macizos. Se obtuvo que la utilización de la CCA permite el reemplazo de hasta un 20 % del agregado fino, con lo cual se logran inclusive valores de resistencia superiores a la mezcla patrón. De igual forma, Matthey *et al.* (2013) estudiaron la influencia del mezclado en dos etapas sobre la resistencia a la compresión de ladrillos de concreto elaborados con CCA. Obtuvieron que la adición del 20 % de CCA actuando como *filler* y puzolana es la composición óptima para el uso de este residuo agroindustrial en la fabricación de bloques.

La mayoría de los residuos agroindustriales son de naturaleza lignocelulósica, lo que posibilita la extracción de polímeros utilizables como materia prima en diferentes procesos. Vargas et al. (2013) caracterizaron la cascarilla de arroz mediante procedimientos de las normas de la ASTM (American Society for Testing Materials) y obtuvieron que los componentes orgánicos de mayor interés son la lignina (6,27%) y la celulosa (19,736%), cuyos porcentajes son significativos y similares a los de otros materiales lignocelulósicos utilizados en la formación de poliuretanos. Otro residuo agroindustrial aprovechado para este fin, según López et al. (2016), es el bagazo de caña (*Saccharum spp.*), del que se puede obtener celulosa mediante un tratamiento químico de hidrólisis ácida (sulfúrica). Como resultado se alcanzó 48% de rendimiento y se estableció finalmente que las características de la fibra celulosa le permitirán actuar como refuerzo en materiales compuestos, además de representar una fuente promisoría en la producción de biomateriales y papel. Adicionalmente, el bagazo de caña es la mayor fuente de fibra para la industria de pulpa y papel en México: en la mayoría de los grados de papel —de escritura, toallas e higiénico, recubierto y muchos otros— se emplean las pulpas de bagazo. Sin embargo, su rendimiento, calidad y propiedades se ven afectadas si el almacenamiento y manejo de las fibras no son los apropiados (Aguilar, 2011).

Por otra parte, la cepa *Trichoderma sp.* es muy utilizada en la obtención de bioetanol. La producción de hongos de este género es fundamental puesto que participan en la generación de biocombustibles. Ramírez S (2012) realizó un estudio experimental comparativo de aprovechamiento de la cascarilla de arroz y residuos de papa para la producción del hongo *Trichoderma spp.*, cultivándolo mediante fermentación sólida y utilizando estos residuos como sustratos bajo condiciones controladas de temperatura. En consecuencia, obtuvo un crecimiento significativo del respectivo hongo debido a que los residuos utilizados suplen la demanda de nutrientes requerida por los microorganismos.

Otro producto elaborado a partir de residuos agroindustriales es el pan integral. Ricce et al. (2013) mostraron el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por polvos de peladilla de espárrago, brácteas de alcachofa y salvado de trigo sobre las características sensoriales del pan integral. Elaboraron diferentes tratamientos que contenían sustitutos de los ingredientes ricos en fibra, solos o en mezcla, y evaluaron posteriormente la percepción de los consumidores para finalmente obtener como mezcla óptima: harina de peladilla de espárrago 4,5%; harina de brácteas de alcachofa, 0,75%, y salvado de trigo, 9,75%.

Cabe destacar que se han utilizado fibras extraídas de los residuos de la agroindustria platanera para reforzar composites como alternativa ante uno de los retos que experimenta el sector del transporte masivo: la reducción del consumo energético a través del uso de materiales de bajo peso en diferentes partes de los vehículos. Sin embargo, esta alternativa puede experimentar desventajas desde el punto

de vista del comportamiento frente al fuego y el desempeño mecánico (Salazar et al., 2007).

La mezcla de algunos residuos agroindustriales con diferentes tipos de plásticos ha permitido la elaboración de aglomerados utilizados posteriormente para la fabricación de estibas, postes, muebles entre otros productos de interés. Así por ejemplo, Baller y Ríos (2016) evaluaron el uso de cascarilla de arroz, polietileno y polipropileno de alta densidad en la producción de postes para cercamiento de sectores agropecuarios. Desarrollaron veinticuatro probetas mediante el proceso de extrusión, a diferentes condiciones de trabajo en cuanto a la composición de las materias primas, la temperatura y la velocidad de la máquina extrusora. A las respectivas probetas les hicieron pruebas de compresión basadas en la norma ASTM D-695, escogieron las tres mejores probetas e hicieron pruebas de tracción mediante la norma ASTM D-638, prueba de resistencia a agentes químicos y prueba de densidad relativa. Obtuvieron que las mejores condiciones de operación para la elaboración del producto se presentaron trabajando con una proporción del 30% de cascarilla de arroz, una velocidad de 45 rpm y una temperatura de 280 °C. Bajo esas condiciones fue posible conseguir un producto de alta resistencia a agentes químicos para ser usado en diferentes ambientes y capaz de exponerse a la intemperie sin verse afectado por el medio.

RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA RECUPERACIÓN DE MEDIOS ABIÓTICOS CONTAMINADOS |

El desarrollo de actividades económicas produce una serie de impactos negativos en el ambiente, que alteran principalmente al medio abiótico (agua, suelo, aire, paisaje) y afectan de modo indirecto la vida. La disposición final sin previo tratamiento de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos generados en diferentes procesos productivos es una de las causas de la contaminación ambiental. Los residuos agroindustriales dispuestos inapropiadamente hacen parte de la problemática; pero también han sido útiles para la remoción de contaminantes y la recuperación de los ambientes afectados, lo que los ha vuelto un tema de gran interés para diferentes autores. Cabe destacar que aunque se recupere, restaure o repare el medio contaminado, este no volverá a contar con las condiciones que presentaba antes de haber sido intervenido.

Las fuentes hídricas contaminadas con efluentes textiles pueden ser tratadas con algunos residuos agroindustriales con capacidad de adsorción. Moreno et al. (2011) realizaron una investigación mediante diseño estadístico de experimentos para encontrar las condiciones que permitieran una remoción eficiente del colorante azul de metileno con cascarilla de arroz. Como resultado obtuvieron una remoción máxima del 99%, a pH 9, con buen ajuste a los modelos estadísticos ($R_2=0,92$), y determinaron que la cascarilla de arroz se perfila como un buen adsorbente de colorantes catiónicos. Álvarez et al. (2011) también utilizaron la cascarilla de arroz para la remoción de

colorantes, en este caso, del colorante rojo básico 46 (RB46), y obtuvieron una remoción del 91 % a pH 8. Concluyeron que este residuo se proyecta como un material promisorio para una estrategia de tratamiento de efluentes industriales a gran escala. De modo similar, para la remoción del cromo presente en las aguas resultantes de la curtición Rodríguez *et al.* (2012) evaluaron la cascarilla de arroz transformada en ceniza y carbón con ácido fosfórico e hidróxido de sodio como agentes activantes. Realizaron calcinación de la cascarilla de arroz, activación química, caracterización y pruebas de adsorción y absorción atómica. En definitiva, obtuvieron que el carbón activado a una temperatura de 600 °C, con un tiempo de activación de 30 minutos y una concentración de la solución de 1 % p/p de NaOH presentó el mayor porcentaje de remoción de cromo, un 72,8 %, comparado con el de la cascarilla de arroz activada con H₃PO₄, que fue del 54,5 %, y el de la ceniza de cascarilla de arroz, de un 49,2 %.

En relación con los residuos capaces de clarificar efluentes textiles, la caracterización química de la superficie del material adsorbente permite establecer su capacidad para retener ciertos contaminantes iónicos. De acuerdo con esto, se han utilizado residuos agrícolas como la cascarilla de arroz y la corteza de coco para remoción del colorante catiónico rojo básico 46 (RB46) y del colorante aniónico rojo 40 (R40). Se han determinado inicialmente el PZC (punto de carga cero) y el IEP (punto isoeléctrico) de estos residuos para establecer la distribución de cargas sobre su superficie. De allí ha resultado, una remoción del 93 % a un pH >5 del colorante 46 (RB46) y del 73 % a un pH 2 del colorante 40 (R40). Es preciso resaltar que el establecimiento de las mejores condiciones para la adsorción de colorantes iónicos en solución es posible a partir de las determinaciones del PZC y el IEP (Amaringo y Hormaza, 2013).

Otros residuos agroindustriales utilizados para la remoción de colorantes son el bagazo de caña y el rastrojo de maíz. Ahora bien, en algunos casos estos residuos son modificados químicamente para aumentar su eficiencia en el proceso. Contreras *et al.* (2013) modificaron químicamente el bagazo de caña de azúcar y el rastrojo de maíz mediante el uso de H₂SO₄, HCl y H₃PO₄, y posteriormente probaron los productos resultantes en la remoción de azul de metileno en un medio acuoso. Concluyeron que estos residuos son adsorbentes utilizándolos con H₃PO₄ al 80 %, debido a que mostraron un 98,6 % de efectividad en la remoción en comparación con materiales sin modificar, cuya efectividad fue de un 92 %, o con el carbón activado (60,8 %).

Por otra parte, se presentan medios contaminados con metales pesados, que según su naturaleza y estructura química son de difícil biodegradación, persistentes en el ambiente, bioacumulativos y capaces de provocar enfermedades cancerígenas en caso de ser ingeridos. Los residuos agroindustriales más utilizados para la remoción de metales pesados como plomo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), cadmio (Cd), entre otros, han sido el bagazo de caña (Pb), la cáscara de mandarina (Pb y Cr), la cáscara de banano (Cr y Pb), la cascarilla de arroz (Cr y Pb), los residuos del café (Cu y Cd),

entre otros (Patriota *et al.*, 2016). El bagazo de caña y el zuro de maíz han sido utilizados en la preparación de carbones activados para adsorber cadmio y plomo, mediante la carbonización de los residuos a 400 °C por una hora, activados con ácido fosfórico, modificados con ácido nítrico o peróxido de hidrógeno y posteriormente sometidos a calentamiento. De esta manera, se han obtenido carbones activados con altas capacidades de adsorción, que han resultado más efectivos para adsorber cadmio que plomo y con mayor facilidad de remoción cuando los metales están solos que combinados (Primera *et al.*, 2011). En este sentido, el tratamiento con residuos agroindustriales de medios contaminados por metales pesados, principalmente fuentes hídricas, viene siendo una alternativa viable y sostenible.

El sector de hidrocarburos ha generado impactos adversos en el ambiente, como la contaminación del suelo y el agua, principalmente debido a derrames ocasionados por fallas operativas o humanas. Se han utilizado residuos agroindustriales como enmiendas y texturizantes debido a que incrementan la porosidad del medio y por lo tanto la aerobiosis del sistema, que funciona como una buena fuente de carbono y como aporte de microorganismos ligninolíticos (Ordaz *et al.*, 2011), los cuales a su vez degradan hidrocarburos. Además, algunos de los residuos agroindustriales participan en la biorremediación de medios contaminados con esos compuestos orgánicos de estructuras químicas complejas. García *et al.* (2011) utilizaron la cachaza y el bagazo de caña de azúcar como enmiendas y texturizantes en la remoción de HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y HTP (hidrocarburos totales del petróleo) de un suelo contaminado con petróleo crudo en diferentes relaciones de concentración de suelo. Obtuvieron una remoción del 60,1 % de HTP con bagazo de caña y del 51,4 % con cachaza. Sin embargo, con cachaza en una relación 96:4 se alcanzó una remoción de 43 % de HAP, mientras que el bagazo en una relación 98:2 removió 41 %. Además, la cachaza presentó la ventaja de aportar al suelo microorganismos con la capacidad de biotransformar los tóxicos y nutrimentos, en especial fósforo, en mayor concentración que los encontrados en el bagazo de caña de azúcar. Así pues, la cachaza resultó una alternativa interesante en los procesos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Ordaz *et al.* (2011), por su parte, evaluaron el efecto del tamaño de la partícula del bagazo de caña al utilizarlo como texturizante y enmienda en la remoción de HTP durante el cultivo sólido de un suelo arcilloso contaminado con petróleo crudo. Se obtuvo como resultando que a mayor tamaño de partícula se incrementa la remoción de los HTP en el suelo.

Finalmente, existe otro método para la adsorción de contaminantes, las columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar. Martínez *et al.* (2016), determinaron que este residuo dispuesto en columnas de lecho fijo tiene potencialidades como bioadsorbente de hidrocarburos presentes en aguas oleosas, pues logra una remoción significativa del indicador hidrocarburo total: hasta un 65 %. Consecuentemente, las columnas empacadas con bagazo natural, utilizadas como

solución para el tratamiento de las aguas oleosas generadas en estaciones de vapor, son una opción tecnológica y ambientalmente factible, que permite reducir los contenidos de grasa, aceites e hidrocarburos de las aguas contaminadas (Leiva et al., 2012).

CONCLUSIONES

La generación de residuos o subproductos de la agroindustria tiene impactos tanto negativos como positivos en el ambiente dependiendo del punto de vista desde el cual se observe o estudie el asunto. Pueden ser generadores de contaminación por su disposición final inadecuada o se pueden convertir en agentes mejoradores de la calidad del ambiente, y por ende, de la vida de los seres vivos, por su apropiado aprovechamiento.

Los residuos agroindustriales presentan un alto potencial de aprovechamiento gracias a su variada composición química, y esto se ve reflejado en la diversidad de alternativas existentes para su reutilización. Es posible obtener de aquellos, materia prima óptima para utilizarse en diferentes procesos y diversos productos de interés ambiental, social o económico. Asimismo, participan en la recuperación de medios abióticos contaminados con efluentes textiles, metales pesados e hidrocarburos.

Con base en la revisión realizada los residuos agroindustriales más utilizados en el mejoramiento de la calidad del ambiente son los provenientes del procesamiento de frutas y vegetales, la industria azucarera (bagazo de caña, cachaza, bagacillo de caña), la molinería del arroz (cascarilla de arroz), el procesamiento del café (pulpa de café) y el de maíz (zuro de maíz, rastrojo de maíz, nejayote). Entre otros residuos utilizados están el bagazo de agave, el aserrín de laurel y algarrobo, las semillas del zapote mamey y el polvillo de fique. Asimismo, se aprovechan los efluentes del procesamiento de la palma de aceite, la industria cárnica y la láctea.

Los residuos agroindustriales han sido utilizados en la producción de bioenergéticos como biodiésel, bioetanol, biogás y biomasa energética. Asimismo, se usan en la producción de abono orgánico, alimentos para animales, ladrillos o bloques, papel y biomateriales y pan integral; para producción de microorganismos de interés y como refuerzo de composites. Usos que previenen impactos ambientales negativos por su manejo incorrecto y otros factores inherentes a los sectores industriales, como la quema de combustibles fósiles y el uso irracional de recursos naturales renovables y no renovables, entre otros.

Diversos residuos de la agroindustria presentan una composición química específica que permite utilizarlos como material adsorbente, enmiendas y texturizantes para diversos procesos. Se emplean especialmente para la remoción de contaminantes como metales pesados, colorantes e hidrocarburos presentes en fuentes hídricas y suelos. De esta manera, los residuos agroindustriales son partícipes en la

solución de los impactos generados por estos contaminantes, mejorando la calidad del ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Fundación Universitaria de San Gil–Unisangil sede Yopal y al coordinador de su respectivo Departamento de Investigación, M. Sc. Diego Camilo Peña Quemba, por la revisión y sugerencias dadas para este artículo.

REFERENCIAS

- Aguilar B, Camacho M y Serrat M. 2013. Enriquecimiento proteico de residuales agroindustriales mediante fermentación sólida con el hongo filamentoso *Aspergillus niger*. *Revista Cubana de Química*, 26(1):17-24.
- Aguilar N. 2011. Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(1):189-197.
- Alonso J, Domínguez H, Garrote G, González M, Gullón B, Moure A, Santos V, Vila C y Yáñez R. 2011. Biorefinery processes for the integral valorization of agroindustrial and forestal wastes. *CyTA-Journal of Food*, 9(4):282-289.
- Alonso M, Ramírez C y Rigal L. 2012. Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3):449-457.
- Álvarez M, Alemán A y Hornaza A. 2011. Remoción de rojo básico de un efluente simulado: un caso de aplicación de la cascarilla de arroz, *Producción + Limpia*, 6(1):66-75.
- Alzate M, Jiménez C y Londoño J. 2011. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para mejorar la calidad sensorial y nutricional de productos avícolas. *Producción + Limpia*, 6(1):108-127.
- Amaringo F y Hormaza A. 2013. Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2):27-36.
- Arango O y Sánchez L. 2009. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 7(2):24-31.
- Aristizábal V. 2015. Jet biofuel production from agroindustrial wastes through furfural platform. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Baller J y Ríos A. 2016. Evaluación del uso de cascarilla de arroz, polietileno y polipropileno en la producción de postes para uso agropecuario. Trabajo de grado, Fundación Universidad América, Bogotá.
- Barragán B, Téllez Y Laguna A. 2008. Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1):44-50.
- Benomie M y Reyes M. 2012. Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. *Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, 14(3):323-332.
- Bermúdez R, García N, Serrano M, Rodríguez M y Mustelie I. 2014. Conversión de residuales agroindustriales en productos de valor agregado por fermentación en estado sólido. *Tecnología Química*, 34(3):263-274.
- Capdevila V, Kafarov V, Gely C y Pagano A. 2015. Simulación del proceso fermentativo para la obtención de bioetanol a partir de residuos de arroz. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(2):11-21.
- Contreras R, Hernández I, González R, García A y Arriaga M. 2013. Remoción de azul de metileno en medio acuoso mediante el uso de bagazo de caña de azúcar y rastrojo de maíz modificados con iones SO₄²⁻ y PO₄³⁻. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1):29-37.
- Dagnino E, Chamorro E, Felissia F y Area M. 2014. Obtención de bioetanol a partir de la celulosa presente en cascarilla de arroz y aserrín de algarrobo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 18(1):06.01-06.07.
- Debernardi H, Ortiz H y Rosas D. 2016. Energía disponible a partir de biomasa de residuos de caña de azúcar. *Agroproductividad*, 9(7):68-73.
- DGCS (Dirección General de Comunicación Social). 2013. Proponen reutilizar agua de nejayote desechada en el proceso de nixtamalización. http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013_075.html, consulta septiembre de 2018.
- Escobar N, Mora J y Romero N. 2012. Identificación de poblaciones microbianas en compost de residuos orgánicos de fincas cafeteras de Cundinamarca. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, 16(1):75-88.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1997. La agroindustria y el desarrollo económico. <http://www.fao.org/docrep/w5800s/w5800s12.htm>, consulta septiembre de 2018
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. La bioenergía y los biocombustibles. Vías de la sostenibilidad. <http://www.fao.org/3/a-ar589s.pdf>, consulta septiembre de 2018.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. Qué es el suelo. <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>, consulta septiembre de 2018.
- Fuentes L, Acevedo D y Gelvez M. 2015. Alimentos funcionales: impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2):140-149.
- García M. 2008. Producción de biodiésel mediante fermentación en estado sólido de compuestos lignocelulósicos derivados del bagazo de remolacha. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 9(1):66-72.
- García R, Ríos E, Martínez A, Ramos F, Cruz J y Cuevas M. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1):31-39.
- Gómez F, Trejo L, Velasco J y Lara L. 2016. Herramientas moleculares para estudios ambientales de actividades agroindustriales. *Agroproductividad*, 9(8):3-9.
- González D. 2013. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de alimentos funcionales: una aproximación desde la nutrición animal. Trabajo de grado, Corporación Universitaria Lasallista, Caldas, Antioquia.
- González M. 2009. Producción de bioenergía en el norte de México: tan lejos y tan cerca. *Frontera Norte*, 21(41):177-183.
- González M, González E, González V y Albernas Y. 2012. Impacto de la integración de los procesos de azúcar y derivados. *Tecnología Química*, 33(1):21-31.
- Gordon V. 2013. Utilización de suero de leche para la elaboración de abono orgánico (biol). Trabajo de grado, Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Tulcán, Ecuador.
- Guerrero R y Valenzuela L. 2011. Agroindustria y medio ambiente. *Trilogía. Ciencia Tecnología Sociedad*, 23(33):63-83.
- Hernández A, Real N, Delgado M, Bautista L y Velasco J. 2016. Residuos agroindustriales con potencial de compostaje. *Agroproductividad*, 9(8):10-17.
- Instituto de Investigación Porcina y FAO. 1994. Tratamiento y utilización de residuos de origen animal, pesquero y alimentación en la alimentación animal. Trabajo presentado en taller regional para el estudio FAO Producción y Sanidad Animal, La Habana.
- Laiz J, Tovar R, Durán M y Solís J. 2009. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: producción de biodiésel por transesterificación alcalina de aceite crudo de "almendras" de zapote mamey (*Pouteria sapota*). *Tecnología Ciencia y Educación (IMIQ)*, 24(1):48-56.
- Leiva J, Martínez P, Esperanza G, Rodríguez I y Gordiz C. 2012. Absorción de hidrocarburos en columnas rellenas con bagazo: una solución sostenible. *Icida. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(3):36-44.
- López A, Bolio G, Veleza L, Solórzano M, Acosta G, Hernández M, Salgado S y Córdova S. 2016. Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agroproductividad*, 9(7):41-45.
- Martín P. 2009. Uso de residuales agroindustriales en la alimentación animal en Cuba: pasado, presente y futuro. *Avance e Investigación Agropecuaria*, 13(3):3-10.
- Martínez P, Rosa E, Rodríguez I, Leiva J y Pérez M. 2016. Minimización del impacto ambiental de las aguas oleosas mediante columna rellena con bagazo de caña de azúcar. *Centro Azúcar*, 43(1):61-69.
- Matthey P, Robayo R, Díaz J, Delvasto S y Monzó J. 2013. Influencia del mezclado en dos etapas en la fabricación de ladrillos de mampostería con ceniza de cascarilla de arroz como agregado fino. *Revista Colombiana de Materiales*, 1(5):242-249.
- Matthey P, Robayo R, Díaz J, Delvasto S y Monzó J. 2015. Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agroindustrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(2):285-294.
- Mejía L, Martínez H, Betancourt J y Castrillón C. 2007. Aprovechamiento de residuo agroindustrial del mango común (*Mangifera indica L.*) para obtener azúcares fermentables. *Ingeniería y Ciencia*, 3(6):41-62.
- Montenegro S, Ararat M y Betancur J. 2015. Cachaza y carbonilla: residuos agroindustriales con potencial de fertilización biológica nitrogenada. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1):84-90.
- Montiel J. 2010. Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 6(1):57-62.
- Moreno A, Figueroa D y Hormaza A. 2011. Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Producción + Limpia*, 1(1):9-18.
- Muñoz D, Cuatín M y Pantoja A. 2013. Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del Cauca, a partir del poder calorífico inferior. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2): 56-63.
- Muñoz D, Cuatín M y Pantoja A. 2014. Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorrefinería. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2):10-19.
- Murillo E, Sánchez W y Méndez J. 2010. Potencial antioxidante de residuos agroindustriales de tres frutas de alto consumo en el Tolima. *Scientia et Technica*, 17(46):138-143.
- Navia C, Córdoba Y, Morales S, Prado F y López N. 2013. Evaluación de diferentes formulaciones de compostaje a partir de residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 1(2):165-173.
- Ordaz J, Martínez A, Ramos F, Sánchez L, Martínez A, Tenorio J y Cuevas M. 2011. Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula. *Multiciencias*, 11(2):136-145.
- Palma D, Zavala J, Cámara J, Ruiz E y Salgado S. 2016. Uso de residuos de la agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para elaboración de abonos orgánicos. *Agroproductividad*, 9(7):29-34.
- Patriota S, Cerutti M, Mulhollans D, Marques M y Acheidt G. 2016. Potencial dos residuos da agroindústria no desenvolvimento de adsorventes de metais pesados. *Periódico Tchê Química*, 6(12):42-51.
- Pino A, Casanova O, Barbazán M, Mancassola V, Rodríguez J, Arló L, Borzacconi L y Passeggi M. 2012. Caracterización y evaluación de biosólidos producidos por digestión anaerobia de residuos agroindustriales. *Ciencia del Suelo Argentina*, 30(2):129-136.
- Ponce F, Silva E, Yañez E y Catillo E. 2009. Potencial de cogeneración de energía eléctrica en la agroindustria colombiana de aceite de palma: tres estudios de casos. *Palma*, 29(4):59-72.
- Prada A y Cortés C. 2010. La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquia*, 14(1):155-170.
- Primera O, Colpas F, Meza E y Fernández R. 2011. Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 35(136):337-396.
- Procolombia. 2012. Inversión en el sector Agroindustria en Colombia. <http://www.inviertaencolombia.com.co/sectores/agroindustria.html>, consulta septiembre de 2018.
- Ramírez E. 2012. Producción de biogás a nivel de laboratorio, utilizando estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno) en la E. E. El Porvenir-districto de Juan Guerra. Trabajo de grado, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
- Ramírez S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales, cascarilla de arroz (*Oriza sativa*) y residuos de papa (*Solanum tuberosum*) para la producción de *Trichoderma spp.* Trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Restrepo A, Rodríguez E y Manjarrés K. 2011. Cortezas de naranja comestibles: una aproximación al desarrollo de productos con valor agregado a partir de residuos agroindustriales. *Producción + Limpia*, 6(2):47-57.
- Restrepo M. 2006. Producción más limpia en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 1(1):87-101.
- Ricce C, Leyva M, Medina I, Miranda J, Saldarriaga L, Rodríguez J y Siche R. 2013. Uso de residuos agroindustriales de La Libertad en la elaboración de un pan integral. *Agroindustrial Science*, 3(1):41-46.
- Rodríguez R. 1999. Aportaciones al conocimiento del estado medioambiental de microsistemas de interés internacional situado en Castilla-La Mancha. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
- Rodríguez Y, Salinas L, Ríos C y Vargas L. 2012. Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1):146-156.
- Rosas D, Ortiz H, Herrera J y Leyva O. 2016. Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas. *Agroproductividad*, 9(8):18-23.
- Salazar S, Kerguelen H, Cruz J, Palacio M, Pérez J y Gañán P. 2007. Desarrollo de composites a partir de residuos agroindustriales potencialmente empleados en transporte masivo. *Scientia et Technica*, 1(36):719-723.

- Sánchez A, Gutiérrez A, Muñoz J y Rivera C. 2010. Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 1(5):61-91.
- Saval S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Bio-Tecnología*, 16(2):14-16.
- Serrat M, Ussemame C, Camacho M, Méndez A y Bermúdez R. 2016. Valorización de residuos agroindustriales ricos en pectinas por fermentación. *Tecnología química*, 36(1):5-19.
- Soto F. 2012. Análisis de la titularidad de los derechos de propiedad emanados de la captura de carbono por bosques en el marco de red. Trabajo de grado, Universidad de Chile, Santiago.
- Valdés O y Palacios O. 2016. Evolución y situación actual de plantaciones para biocombustibles: perspectivas y retos para México. *Agroproductividad*, 9(2):33-41.
- Vargas J, Alvarado P, Vega J y Porras M. 2013. Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1):86-101.
- Varnero M, Galleguillos K y Rojas R. 2011. Sistemas de compostaje para el tratamiento de alperujo. *Información Tecnológica*, 22(5):49-56.
- Vega M. 2010. Uso de residuos celulósicos de la agroindustria para la producción de bioetanol. Trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Vergara J. 2015. Estudio comparativo del rendimiento de furfural a partir de diferentes residuos agrícolas (cascarilla de arroz, bagazo de caña, zuro de maíz). Trabajo de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil.
- Yepes S, Montoya L y Orozco F. 2008. Valorización de residuos agroindustriales –frutas– en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 61(1):4422-4431.