

Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México

MEJÍAS-BRIZUELA, Nildia*†, OROZCO-GUILLEN, Eber, y GALÁAN-HERNÁNDEZ, Néstor.

Programa Académico de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Carretera municipal libre Mazatlán-Higueras Km 3, Colonia Genaro Estrada, 82119, Mazatlán, Sinaloa, México.

Recibido Octubre 7, 2016; Aceptado Noviembre 11, 2016

Resumen

Los residuos agroindustriales están siendo en las últimas décadas motivo de diversos estudios, debido a que gran parte de sus componentes pueden ser utilizados como materia prima para la generación de productos con valor agregado, condición que prevalece actualmente y que se prevé continúe en el futuro desde el punto de vista de la generación de bioenergéticos y la prioridad para reducir el impacto ambiental que ocasionan dichos residuos. El objetivo de esta revisión es analizar una serie de artículos que documentan el estado del arte del aprovechamiento biotecnológico y energético de los residuos agroindustriales a través del impacto ambiental que generan los mismos dado las malas prácticas en el sector agrícola y los aspectos relevantes que poseen, intentando con ello una perspectiva que contribuya al desarrollo sostenible del país. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos y la normativa energética y ambiental de México, con la intención de ofrecer una visión panorámica del potencial biomásico residual.

Residuos agroindustriales, bioenergéticos, desarrollo sostenible.**Abstract**

Agro-industrial residues has been in recent decades the subject of several studies, because many of its components can be used as raw material for the generation of value-added products, a condition that at present prevailing and which is expected to continue in the future from the perspective of the generation of bioenergy and priority to reduce the environmental impact caused for such residues.

The aim of this review is to analyze a selection of reports that documenting the art of biotechnological and energetic valorization of agro-industrial residues, through the environmental impact generated for agro-industrial residues, for practicals bad in agriculture, the relevant aspects of a variety of agro-industrial residues that can be leveraged for the development of bioenergy products that contribute to sustainable development. The research was conducted through literature review of scientific articles and regulatory framework of energy and environment in Mexico, with the intention of providing an overview of the residual biomass potential.

Agro-industrial residues, bioenergetics, sustainable development.

Citación: MEJÍAS-BRIZUELA, Nildia, OROZCO-GUILLEN, Eber, y GALÁAN-HERNÁNDEZ, Néstor. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales* 2016, 2-6: 27-41

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: nmejias@upsin.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Cada vez es más frecuente los temas relacionados con el medioambiente tales como la concentración poblacional, el incremento del parque vehicular, los sistemas de transportes, los procesos industriales, que conllevan a otros temas como contaminación atmosférica, afectación de la capa de ozono, deterioro y pérdida de áreas verdes, generación de residuos y desechos, entre muchos otros, considerados todos problemas de interés público.

México, en la búsqueda de alternativas a esta problemática y su intención de elevar la calidad de vida de sus habitantes, se ha comprometido con el desarrollo sostenible como un paradigma viable a nivel mundial, firmando los acuerdos de la última Cumbre de las Naciones Unidas celebrada en 2015, donde la sostenibilidad provee una nueva visión, pues a partir del ambiente que se tiene se propone una transformación planificada y gradual que modifique el enfoque actual económico, cultural y social de nuestra relación social con la naturaleza.

Factores claves a atender para ese desarrollo sostenible eficaz y eficiente son la demanda energética, el cambio climático, la escasez de recursos naturales y el manejo de los residuos (ProMéxico, 2014).

Bajo este contexto, la agroindustria mexicana, sus cadenas de producción y servicios generan un gran número de residuos con calidad no comercial que pueden ser aprovechados para la generación de alternativas renovables como los bioenergéticos: biocombustibles y biolubricantes líquidos gaseosos y sólidos (Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México, 2008).

En su mayoría los residuos agroindustriales corresponden a biomasa lignocelulósica y lipídica que pese a su dificultad de degradación en algunos casos, es posible su desdoble a monosacáridos y ésteres más simples mediante procesos físicos, químicos y/o biológicos.

Por tanto, el aprovechamiento de los residuos agroindustriales ha venido evolucionado a través de investigaciones implementadas en países desarrollados donde han dejado de ser productos desecho-problema para convertirse en materia prima potencial maximizando su potencial de uso al dar valor agregado a los mismos, que de no ser así presentan un gran problema ambiental debido a su disposición final.

En el caso contrario, países en desarrollo, México específicamente, existe un marco regulatorio para la generación de energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a través de tecnologías limpias; programas de apoyo a agricultores e investigaciones relacionadas con la producción de biocombustibles, pero todo ello sigue siendo aún precario, problemático, desconocido para muchas regiones, municipios y localidades del país, donde todavía la basura orgánica e inorgánica se destina en vertederos a cielo abierto.

Las publicaciones unas están enfocadas al tema agroindustria y otras a obtención de biocombustibles específicos. Por ello, el objetivo es crear el estado del arte que muestre el aprovechamiento de los residuos agroindustriales para el desarrollo energético de México, partiendo del eje central del país, la agroindustria, sus residuos y el impacto ambiental causado, su aporte a la biotecnología y la valorización energética que existe aplicando tecnologías limpias.

Agroindustria

Dada la articulación que existe entre la producción primaria (procedente del sector agrícola, pecuario, acuícola y forestal) y la transformación de la misma, se tiene en la actualidad una serie de enfoques que definen el término “Agroindustria”, todos ellos basados en los intereses de estudios propios de cada autor (Grass, 2011; Saval, 2012).

En tal sentido, los autores consideran adecuada la definición dada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1997) donde agroindustria, es el conjunto de actividades económicas que favorecen la transformación de los productos procedentes de la agricultura, la ganadería, la pesca y lo forestal, es decir, elaboración de materias primas y productos intermedios derivados del sector agrícola.

Implica entonces que existen dos tipos de agroindustria, la alimentaria y la no alimentaria. La primera de ellas comprende materia prima proveniente del sector agrícola, pecuario, acuícola y forestal, dirigido exclusivamente a la obtención de alimentos, mientras que, la segunda, la agroindustria no alimentaria, se encarga de la transformación de productos del campo a productos como: maderas, flores, tabaco, fibras, colorantes, entre otros, es decir, no alimenticios (Escandón y Pineda, 2014).

Otra clasificación de agroindustria útil para este artículo dada por la FAO, es la que contempla a la industria proveedora de materias primas y a la industria consumidora de materias primas. La primera se dedica a la elaboración inicial de productos agrícolas como molinos, curtidos, prensado, aserrado y enlatado, mientras que, la segunda se encarga de la fabricación de artículos a base de productos intermedios derivados de las materias agrícolas como fabricación de papel, tejidos, ropa y calzado o manufactura de caucho.

Es de aclarar que, el sistema agroalimentario es un subconjunto del sistema agroindustrial y los dos conllevan a la existencia del sistema socioeconómico global, por tanto el desarrollo de agroindustrias competitivas sobre todo en países en desarrollo, es crucial para generar empleos e ingresos tanto para la población rural como urbana y no solo a nivel agrícola sino también en actividades como el procesamiento, envasado, transporte y comercialización de los productos, contribuyendo a la mejora de la calidad agrícola y su demanda (Grass, 2011).

En América Latina, el potencial de desarrollo agroindustrial está vinculado a la abundancia relativa de materias primas agrícolas que existen y al bajo costo de la mano de obra en la mayoría de los países. En estas condiciones, las agroindustrias más adecuadas son precisamente las que utilizan de forma relativamente más intensiva esas materias primas y mano de obra no especializada, mientras que, es relativamente menos intensiva la utilización de capital y mano de obra especializada que se presumen escasos (Gumucio, 2016).

El Banco Mundial reporta al término del año 2015 que las actividades agrícolas (siembra-cosecha) conformaron el 12 % del Producto Interno Bruto (PIB) de América Latina; pero al incluir las actividades agroindustriales (transformación de los productos del campo) el promedio se eleva al 21 %, lo que muestra la importancia que tiene la Agroindustria (PwC México, 2015).

En México, la agroindustria es uno de los principales empleadores del país, beneficiando a más de 6 millones de personas (INEGI, 2010).

En cuanto al PIB, el INEGI lo reporta como PIB del sector agroalimentario, que incluye actividades del sector primario (agricultura, ganadería y pesca) y actividades del sector agroindustrial. El dato más reciente corresponde al primer semestre del 2016 donde se reportó un aumento del 3.3 % respecto al mismo periodo semestral del 2014, de acuerdo a comunicado de prensa de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA.

De igual manera la tendencia también se observó al cierre del 2015, donde aportó el 8.12 % del PIB total del país, lo que permitió una alza general del PIB de 2.4 % en relación al mismo lapso de 2014 (INEGI, 2016). El comercio exterior también alcanzó un record histórico, con ventas por más de 24 millones de dólares (SAGARPA, 2016).

Sin embargo, a pesar del dinamismo de industrialización que se tiene, la agroindustria mexicana se desarrolla en un entorno ampliamente dominado por la presencia de empresas internacionales (Escandón y Pineda, 2014). Este crecimiento presenta problemas de equidad e inclusión dado el desequilibrio que existe en las agrocadenas, donde la adición de valor es limitada a unos pocos participantes, perjudicando al resto, como pequeños agricultores y/o productores, puesto que, estos al tener menos recursos quedan excluidos de las cadenas de abastecimientos. Esto implica que, es necesario contar con políticas y estrategias que promuevan el aprovechamiento de sus residuos y al mismo tiempo consideren los temas de competitividad, equidad e inclusión que permitan una sostenibilidad social y económica real (Da Silva, Baker, Shepherd, Jenane y Miranda da Cruz, 2013).

Residuos agroindustriales y su impacto ambiental

En la agroindustria mexicana los productos que se industrializan son: frutas, verduras, tubérculos y vainas, semillas, raíces, hojas; algunos comercializados en fresco y otros son transformados en harinas, aceites, néctares, jugos, vinos, mermeladas, ensaladas, concentrados en polvo, entre otros, por lo que es notable la generación de residuos, desde la cosecha misma, pasando por los centros de concentración y distribución y finalizando en la industrialización, comercialización y consumo. A muy groso modo se mencionan algunas agroindustrias y su generación de residuos:

- En lo agrícola, es decir, en la cosecha de cultivos se generan como residuos primarios hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. De la post-cosecha se generan residuos secundarios obtenidos del procesamiento entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Valdez, Acevedo y Hernández, 2010).
- La agroindustria azucarera durante la producción de azúcar genera residuos de cosecha, coproductos y subproductos tales como bagazos, cachazas, melazas, vinazas, sacarosa y aguas residuales (Zafranet, 2016). En este sentido, para la elaboración de productos como néctares, zumos y mermeladas únicamente se utiliza la pulpa y se desecha aproximadamente el 50 % del fruto (Ramos, 2015).

- En el caso del café y cacao sólo se aprovecha económicamente el grano que corresponde alrededor de un 10 % del peso del fruto fresco (Abarca, Martínez, Muñoz, Torres y Vargas, 2010).
- Las industrias de producción vegetal generan una elevada cantidad de residuos como tallos, hojas o frutos con calidad no comercial como resultado de las operaciones de poda, corte, clasificación y renovación de cultivos durante la cosecha y poscosecha. La agroindustria de origen animal genera también residuos como los estiércoles, purines y subproductos como pelos o plumas (Gavilanes, 2016).
- La industria del aceite de palma solo aprovecha el 9 % de la extracción, la industria de la cerveza utiliza un 8 % de los componentes del grano y la industria del papel utiliza menos del 30% para producción. (Saval, 2012).

En tal sentido es necesario definir el termino residuo, el cual de acuerdo a Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México, es *“material o producto cuyo propietario desecha y que puede ser susceptible de ser valorizado o someterse a tratamiento o disposición final conforme a lo previsto en la misma ley”*. Este marco referencial, permite enunciar que, los residuos agroindustriales son productos orgánicos sólidos, semisólidos y líquidos generados a partir del uso directo de productos primarios o de su industrialización, no útiles para el proceso que los generó, pero si susceptibles de un aprovechamiento o transformación que genere otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social.

Bajo este contexto y dados los procesos necesarios para la generación de productos que brinden al país desarrollo económico, seguridad alimentaria y confort de sus habitantes, la agroindustria mexicana enfrenta una grave problemática referente a que no existe una legislación específica que promueva la gestión de sus residuos que asegure un manejo integral desde su generación hasta su disposición final, así como la falta de recursos económicos y capacidad tecnológica. Son pocos los productores que forman parte de proyectos gubernamentales ambientales que pudieran estar realizando cambios estructurales en sus formas de trabajo.

Las industrias, están reguladas por normativas ambientales gubernamentales, donde sin embargo, a cada nada es noticia derrames de químicos o sus gestión de residuos consiste en regalías de sus residuos a agricultores para alimento del ganado, por lo tanto es poca o nula la conciencia ecológica para el manejo de tales materiales.

La consecuencia es un efecto ambiental causado por el daño al suelo, agua, aire, el cual no es en sí causado por los cultivos, la ganadería, etc., sino por las malas prácticas realizadas por muchos agricultores, dueños de terrenos y las agrocadenas que a partir de aquí se enfrentan: distribución, procesos industriales, comercialización, exportación, y consumo como destino final del producto, conllevando a lo que se conoce como *impacto ambiental*.

Las prácticas comunes en el sector agroalimentario que generan problemas ambientales son: la *labranza intensiva*, basada en la práctica de arar el suelo totalmente a profundidad; el *monocultivo* a gran escala, adoptado cada vez más por agricultores; *intensivo uso de fertilizantes químicos sintéticos*, los cuales han dado incrementos significativos para el rendimiento de los cultivos; la *irrigación*, ya que muchos riegos de cultivo se realizan con agua del subsuelo, reservas y ríos con cauces modificados; *uso de plaguicidas* para el control químico de plagas; la fuerte dependencia en el *uso de combustibles* derivados de *fósiles* como el diésel y la gasolina para la alimentación de motores que hagan el arado de suelo, el riego de los cultivos y todos los procesos que en adelante se experimentan (Zúniga, 2011).

Los efectos ambientales más sobresalientes causados por toda esa generación residual enunciados ya por muchas organizaciones mundiales, gobiernos, académicos, grupos ecologistas son (Zúñiga, 2011):

- Rápido incremento de la polución y la contaminación, que genera crecientes problemas de salud, degradación del patrimonio natural, destrucción de ecosistemas esenciales y degradación/degeneración de funciones críticas de la biosfera. Actuando tanto por aire, por medio de contaminantes atmosféricos; como por suelo, a través de los residuos, aguas residuales, productos químicos usados; como por agua, por la contaminación de cauces, acuíferos y mares.

- Respecto a la salud, la existencia de "basurales" cerca de localidades alienta la proliferación de vectores epidémicos, siendo los sectores sociales menos favorecidos los que más sufren estas enfermedades infecto-contagiosas (como el cólera). Además, la acumulación de basura sin ningún tratamiento o manejo técnico adecuado, provoca la proliferación de ratas, cucarachas y mosquitos, agentes todos estos, de graves enfermedades. Por ejemplo, en 1 m² de basura a cielo abierto, se producen 2.500.000 de moscas/semana.
- Emisión de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, NO₂) a causa de productos químicos utilizados que han causado cambios en la utilización del suelo y la propia producción agraria, quedando claro entonces, que la agricultura no solo es una víctima del cambio climático, sino que contribuye a él.
- Problemas fuertes de erosión y desertificación, producto de una práctica agrícola tradicional que es la quema de restos de cultivos en el campo, muy desaconsejable para la fertilidad de suelos.
- Destrucción, sobreexplotación, agotamiento y degradación de recursos estratégicos, como agua, suelo, ecosistemas básicos, paisajes emblemáticos, etc.
- Rápida disminución de la biodiversidad, con pérdida de patrimonio genético, creciente inestabilidad de los ecosistemas y riesgo para la cadena alimentaria.

Valorización de los residuos agroindustriales: biotecnología y energía

Los residuos agroindustriales como ya se mencionó presentan una característica común *la fracción orgánica*, ideal para su valorización en un sinnúmero de procesos dentro del mismo sector y/o en el flujo económico del país. Sin embargo, es necesaria la caracterización de los mismos para conocer la cantidad generada, composición química, cantidad y calidad de sus componentes, con el objetivo de seleccionar el proceso o sector donde puede ser aprovechado sin sufrir transformación, o las tecnologías apropiadas para su transformación y con ello lograr productos con alto valor añadido o la disposición final del mismo por no tener un valor comercial, es decir su disposición como desecho orgánico.

Los criterios de selección más generales y resaltantes para su valorización tienen que ver con:

1. La disponibilidad del residuo a nivel local
2. La estabilidad, es decir, no sufra descomposición rápida bajo condiciones climáticas del sitio de generación
3. El no requerir pretratamientos en la medida de lo posible y de ser necesario que sea sencillo y económico
4. La disposición de cantidades apreciables que permitan la planificación del proceso en el cual se va utilizar y la fabricación de un producto
5. No poseer aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover.

Lo deseable en toda gestión propuesta es que los residuos agroindustriales **no generen otros residuos**, sino que sean utilizados mediante las llamadas tecnologías limpias con la intención de reducir el impacto ambiental.

A continuación se describen dos formas de aprovechamiento de los residuos agroindustriales: la primera, la biotecnológica, como la más sólida en investigaciones y aplicaciones en diferentes sectores de la industria y la segunda, la valorización energética, debido a las políticas energéticas del país por compromisos adquiridos a nivel internacional respecto a la reducción de emisiones contaminantes para cambio climático global y en pro de un desarrollo sostenible.

Valorización biotecnológica

A través de la biotecnología es posible la bioconversión de los residuos agroindustriales mediante procesos de extracción directa o de transformación microbiana o química en productos comerciales de mayor valor añadido (pigmentos, antibióticos, enzimas, etc.) y con mayor impacto la intención de mejorar la calidad ambiental a través de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales.

De igual manera uno de los retos de esta área de la ciencia es la adquisición de materias primas de fácil adquisición y bajo costos que sirvan como sustratos fermentables, es decir, ricos en carbono y nitrógeno (Barragán, Téllez y Laguna, 2008) y la agroindustria a través de un gran número de subproductos puede proporcionarlos.

Existen muchos reportes científicos respecto al aprovechamiento de los residuos agroindustriales, se hará mención a algunos de ellos.

- En el jimado del Agave tequilana con el que se fabrica tequila se desechan una gran variedad de productos (hojas y sus fibras, pencas, cutículas). Tronc y colaboradores, reportaron en el 2007, la transformación de los residuos de fibras y extractos de hojas para la obtención de resinas termoplásticas y para la extracción de ligninas, celulosa, glucósidos y etanol. En el 2008, Laguna y colaboradores dan uso a las pencas desechadas para ser utilizadas en la elaboración de fibras.
- Desechos de la uva pomace se han utilizado como fuente nutritiva y exclusiva para la fermentación y producción de enzimas hidrolíticas (celulasas y pectinasas) con aplicación en la industria textil, química y de alimentos usando cepas de *Aspergillus awamori*. El precio bajo de este material lo hace potencialmente prometedor para tales usos. (Botella, 2005).
- Fanchini y colaboradores, 2010 utilizaron bagazo de caña, avena, salvado de trigo, residuos de cebada y cascaras de yuca como sustrato junto con una cepa de *Penicillium janczewskii* obtuvieron enzimas para ser utilizadas para la fabricación de pastas, harina de trigo como aditivo en alimentos de aves de corral y procesos de blanqueo en la industria química.
- Se reporta la producción de proteasas de *Aspergillus oryzae* en fermentación sólida de residuos provenientes de la extracción de aceite de *Jatropha curcas*; las cuales pueden ser de utilidad en la industria de alimentos, farmacéutica y de papel (Thanapimmentha y col., 2012).
- Se tiene también la producción de materias primas para la producción de bioplásticos y elastómeros a partir de la fermentación de suero de queso (Povolo, 2010) y a partir de suero de leche con lodos activados de aguas residuales de la industria lechera (Bosco y Chiampo, 2010).
- En procesos de remoción de metales se han utilizado desechos de bagazo de caña de azúcar como soporte junto a una fuente microbiana y nutrientes que aceleran la degradación de hidrocarburos (Rodríguez y col., 2007) no sólo debido a su microflora nativa, sino también debido a sus actividades enzimáticas.
- El grano verde de café ha sido utilizado como soporte y como fuente de nutrientes en la biodegradación de plaguicidas organoclorados (Barragán y col., 2007).
- Algunos productos agroindustriales son desechos debido a que presentan problemas serios de disposición y que son objeto de estudio para convertirlos en productos útiles, como por ejemplo, el aserrín, el cual ha sido objeto de diversos estudios para la remoción de contaminantes tales como colorantes, sales y metales pesados a partir de agua y efluentes acuosos.

Valorización energética

Los bioenergéticos se definen de acuerdo a la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México como “combustibles obtenidos de la biomasa proveniente de materia orgánica de las actividades agrícolas, pecuarias, silvícolas, acuícolas, pesqueras, domesticas, comerciales, industriales, de microorganismos y de enzimas, así como sus derivados producidos por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos que la Ley dispone”.

Por tanto subproductos y residuos provenientes de diferentes agroindustrias contienen cantidades importantes de biomasa rica en celulosa, hemicelulosa, lignina, glucósidos y ácidos grasos, todos sustratos potencialmente útiles cuando se les transforma mediante tratamientos químicos o microbiológicos para la producción de bioenergéticos. Al mismo tiempo, la combinación efectiva de necesidades y recursos naturales puede promover el desarrollo sostenible y mejorar la economía, la sociedad y el medio ambiente local.

La valorización energética de los residuos se realiza mediante numerosas tecnologías: incineración, gasificación, pirolisis, digestión anaerobia y compostaje, con un doble objetivo: otra forma eficiente de gestión de residuos y obtener una nueva fuente de abastecimiento energético que compita con los combustibles fósiles y que contribuya a reducir la dependencia con estos a nivel mundial (Arteaga, Cabrera, Rodríguez, Casas, 2014).

Los bioenergéticos reportados producto de las investigaciones científicas que se realizan a nivel mundial y apoyados por organizaciones mundiales como la FAO y la ONU que pueden obtenerse mediante biomasa natural y residual proveniente de la agroindustria son: bioalcoholes (principalmente bioetanol), biodiésel y biogás como los más desarrollados y con tecnologías establecidas y otros como biohidrógeno y pellets. La misma Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos solo define:

Biodiésel: Combustible que se obtiene por la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal

Biogás: Gas que se produce por la conversión biológica de la biomasa como resultado de su descomposición;

Etanol Anhidro: Tipo de alcohol etílico que se caracteriza por tener muy bajo contenido de agua.

Biogás

Establecimientos del sector pecuario mexicano (ganado bovino, porcino, avícola y otros) en su producción primaria, feed-lot, explotaciones avícolas, establecimientos de cría y engorde de cerdos generan diariamente cantidades importantes de residuos sólidos y semi-líquidos con significativa carga orgánica y bacteriana que generan un alto impacto ambiental (Instituto Internacional de Recursos Renovables, IRRI, 2014).

Todo ello se da por los tratamientos precarios realizados sobre los efluentes, los cuales sin proyectos sustentables de ingeniería ambiental, pueden contaminar acuíferos, emitir gases de efecto invernadero como el metano que impacta 21 veces más que el anhídrido carbónico y el no aprovechamiento de nutrientes.

A esto se suman los desechos de los centros de concentración y distribución de frutas, hortalizas, donde siempre alguna parte se deteriora y se descarta. También las plantas de procesamiento de la industria frigorífica (vacunos, cerdos, aves), conserveras, congelados, vitivinícola, descartan constantemente buena cantidad de residuos orgánicos.

La biodigestión anaeróbica permite lograr que la energía contenida en los residuos (con alta entropía, degradada y con poca utilidad en ese estado) pueda ser transformada, liberada y reciclada en un combustible gaseoso: metano, como principal componente de la mezcla de gases producida y como energía de alta calidad (IRRI, 2014). Consecuentemente puede utilizarse para generar energía eléctrica, vapor, agua caliente; en sistemas de co-generación de alta eficiencia. También es posible obtener abonos orgánicos que aportan materia orgánica y nutrientes a los campos de cultivo; contribuyendo a mantener su fertilidad y asimismo reducir el impacto económico que significa depender de fertilizantes industriales (IRRI, 2014).

La Tabla 1 muestra un resumen de los residuos agroindustriales que sirven como materia prima para la generación de biogás a través de biodigestión anaerobia.

Tipo de Residuo	Producción de Biogás Litros de Biogás por cada Kg. de Sólido Fresco	Contenido de Sólidos (% de S.T.)	Contenido de Materia Orgánica Volátil (% de S.V.)
Estiércol Vacuno y Feed-Lot	15 - 40	18,00 - 20,00	83,00
Estiércol Porcino	19 - 30	7,00 - 11,00	84,00
Estiércol Aviar Parrilleros	228 (promedio)	80,00	79,00
Estiércol Aviar Ponedoras	74 (promedio)	24,00	60,00
Desechos de Huerta	39 - 63	11,00	94,00
Residuos Amiláceos o Azucarados (Papas, Mandioca, Remolacha)	100 (promedio)	18,00	94,00
Residuos de Comida	75 - 120	19 - 20	92,00 - 94,00
Sorgo Granífero	550 (promedio)	96,00	98,00

Tabla 1 Residuos agroindustriales utilizados para la producción de biogás

Bioetanol (etanol anhidro) y biodiésel

Las tecnologías de producción de bioetanol y biodiesel son diferentes. El bioetanol se produce a través de un proceso biotecnológico en el que los polisacáridos son convertidos en sacáridos y los sacáridos por fermentación en etanol, siendo destilado finalmente para su forma anhidra (Börjesson, 2009). Mientras que, el biodiésel, es obtenido a través de una ruta química conocida como transesterificación (Börjesson y Tufvesson, 2011), por ser un éster metílico. A pesar de que su procesamiento es distinto, ambos se agrupan en la misma cadena de abastecimiento, compuesta de las mismas etapas principales: obtención de materias primas, proceso de producción y uso del biocombustible, como se muestra en la Figura 1.

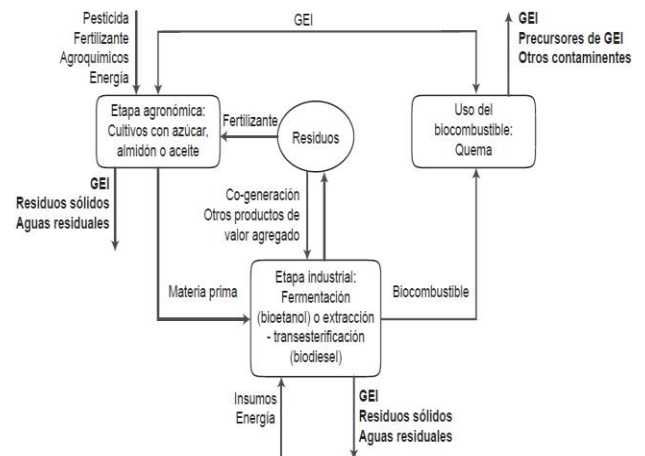


Figura 1 Gestión integral de bioetanol y biodiésel a través de la herramienta de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida, se refiere a un enfoque metodológico que se tiene para la evaluación de procesos químicos, biológicos, bioquímicos y biotecnológicos y su relación con su desempeño másico, energético y/o ambiental. Llevarlo a cabo implica la secuencia de cuatro etapas: definir el sistema, análisis de inventario, evaluación de impactos y la identificación de soluciones (Valencia y Cardona, 2013).

El bioetanol se produce principalmente a partir de cultivos agrícolas de caña de azúcar o maíz, cuyos sacáridos son fermentados a etanol por las levaduras del género *Saccharomyces* (Börjesson, 2009). De los dos, la caña de azúcar es la fuente más atractiva, ya que contiene mono y disacáridos fermentables directamente por las levaduras. El mayor inconveniente es que resulta cara como materia prima. Los cultivos como el maíz son ricos en almidón, polisacárido complejo que debe ser primero transformado en monosacáridos, proceso conocido como sacarificación (Arteaga, Cabrera, Rodríguez, Casas, 2014).

La producción también puede realizarse a partir de residuos agrícolas, forestales, industriales o municipales. Las materias primas ricas en celulosa, como los desechos agrícolas y forestales son las más abundantes y baratas, sin embargo la conversión de la celulosa en sacáridos fermentables es un proceso complejo y costoso que hace que la obtención de etanol por esta vía este en investigación por ahora, solo a escala laboratorio.

Es de resaltar que los autores de este artículo incentivan la producción de bioenergéticos a partir de biomasa residual agrícola y forestal, así como la de celulosa, más no apoyan la idea de plantaciones energéticas.

El biodiésel, se obtiene principalmente a partir de ácidos grasos contenidos por ejemplo en aceites vegetales como palma, soya, de frituras, usados y las grasas animales, a los que se aplican operaciones de esterificación y refinado (Castellar, Angulo, Cardozo, 2014).

El glicerol es un subproducto común para cualquier materia prima de primera generación. A diferencia de los subproductos de la producción de etanol cuyo principal uso está referido a sistemas de cogeneración energética, el glicerol puede ser empleado como materia prima en diferentes industrias como la farmacéutica, química, alimenticia y cosmética, entre otras (Valencia y Cardona, 2013).

El biodiesel puede utilizarse como un sustituto del diesel convencional, reduciendo la contaminación y alargando la vida del motor en los vehículos (Castellar, Angulo, Cardozo, 2014).

Como puede apreciarse la biomasa y su conversión a bioenergía a través de la producción de los diferentes biocombustibles, es una estrategia viable y competitiva que puede implementarse para el desarrollo local sostenible de México y de la región latinoamericana, a partir de toda la biomasa residual que se genera en la agricultura, la cual es razón suficiente para lanzar programas apoyados por el gobierno local, regional, nacional y académicos de Universidades y Centros de Investigación, que incentiven y motiven a pequeños agricultores, grandes productores y campesinos de zonas rurales o no a un máximo aprovechamiento de sus producciones para una mejora sustancial en la calidad de vida de los mismos, bien sea a partir de la producción de biogás para minorizar el uso de leña, producción de electricidad, calor, o para la producción de agrocombustibles para autoconsumo y en el mediano o largo plazo la comercialización con empresas del petróleo de la región, dado que estos son una fuente de combustible seguro y confiable, por lo que un uso más generalizado permitirá la disminución de costos, disminuyendo sus desventajas con el tiempo.

México está apto para la producción de todos ellos, es decir, biogás, biodiésel, bioetanol, pellets, combustibles de primera y segunda generación y biocombustibles sólidos, ya que el potencial técnico de bioenergía equivale a 3,569 PJ/a (PetaJoule por año), evaluado por Johnson, Alatorre, Romo y Liu, en el año 2009 y reportado por la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO) en el año 2011, tomando en cuenta solo las principales fuentes de bioenergía. Mientras que, el Plan Integral para el Desarrollo de las Energías Renovables en México 2013-2018, elaborado para la Secretaría de Energía por la empresa consultora PwC México, estimaron en 2013, que el potencial máximo teórico es de 3,700 MW (Mega Watts), considerando solo recursos biomásicos residuales de mayor viabilidad en el corto plazo (residuos agrícolas, ganaderos, forestales y urbanos). El desglose se muestra en la Tabla 2.

Conclusiones

Los desechos agroindustriales son de naturaleza orgánica y prácticamente están clasificados en origen, lo cual facilita su reciclaje transformando así **"un problema en una oportunidad"**; pudiéndose generar energía renovable a través de la producción de bioenergéticos.

De la revisión realizada, se puede decir que la mayor parte de los estudios para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales se queda a nivel de laboratorio, no se experimenta el escalamiento. Es muy importante considerar esta parte para visualizar un esquema completo del proceso que se pretenda desarrollar y con ello identificar los impactos ambientales de los residuos provenientes de cada parte de un proceso.

Una gestión ambiental adecuada sobre los residuos agroindustriales contribuye a mitigar el Cambio Climático, pudiéndose lograr en muchos casos proyectos de desarrollo limpio, con derecho a créditos de carbono, en el marco del Protocolo de Kyoto.

En el tema de bioenergéticos, es de importancia la necesidad de realizar análisis rigurosos como el análisis de ciclo de vida, para evitar con ello el error de utilizar cultivos con alta disponibilidad para el sector alimenticio, que demanden agua, que consuman energía y que generen más residuos.

Como investigadores en México, las investigaciones deben partir de los avances logrados a nivel mundial y no repitiendo experiencias sin éxito. Seguir sumando esfuerzos que convengan al gobierno que el mejor de los escenarios para la producción de biocombustibles debe ir dirigido a políticas de aprovechamiento de los residuos lignocelulosicos en general y residuos orgánicos urbanos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) y a la Universidad Politécnica de Sinaloa por el apoyo para la realización de este trabajo.

Tipo de biomasa y origen	Cantidad (MtMS/a)*	Producción estimada (PJ/a)	Porcentaje representativo (%)
Combustibles de madera			
Manejo de bosques y selvas nativos	101	1,515	42
Maderas de plantaciones de Eucalipto	26	345	10
Residuos industriales de la industria forestal	3	63	2
Combustibles agroindustriales			
Caña de azúcar para etanol	206	338	9
Sorgo grano para etanol	---	202	6
Aceite de palma aceitera para biodiesel	13	121	3
<i>Jatropha curcas</i> para biodiesel	4	57	2
Residuos agrícolas de cosechas	13	227	6
Residuos de cultivos alimenticios y forrajeros	15	114	3
Residuos agrícolas de cosechas de cultivos dedicados	8	86	2
Residuos industriales de cultivos dedicados (bagazo y otros)**	29	431	12
Residuos de ganado para biogás	35	35	1
Municipales			
Residuos sólidos municipales para biogás	---	35	1

Tabla 2 Potencial de producción sostenible de energía a partir de la biomasa

Referencias

Abarca, D. Martínez R., Muñoz J., Torres M., Vargas G. (2010). Residuos de café, cacao y cladodio de tuna: Fuentes promisorias de fibra dietaria. *Rev. Tec. ESPOL-RTE*, 23(2), 63-69.

Arteaga-Pérez, L., Cabrera-Hernández, J., Rodríguez-Machín, L., y Casas-Ledón, Y. (2014). Termoconversión de residuos sólidos de la industria azucarera para incrementar la sostenibilidad de los procesos. *Rev. Centro Azúcar*, 41, 1-11. ISSN: 2223-4861.

Barragán-Huerta, B., Téllez-Díaz, Y., Laguna, T. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Rev. Sistemas ambientales*, 2(8), 44-50.

Börjesson, P. (2009). "Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective- What determines this?". *Applied Energ*, 86(5), 589-594.

Börjesson, P. y Tufvesson, L. M. (2011). Agricultural crop-based biofuels-resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *J. of Cleaner Production*, 19 (2-3), 108-120.

Bosco, F. y Chiampo F. (2010). Production of polyhydroxyalcanoates (PHAs) using milk whey and dairy wastewater activated sludge. Production of bioplastics using dairy residues. *J. Biosci. Bioeng*, 109(4), 418-421.

Botella, C., Ory, I., Webb, C., Cantero, D. y Blandino, A. (2005) Hydrolytic enzyme production by *Aspergillus awamori* on grape pomace. *Biochem. Eng. J.* 26(2-3), 100-106.

Castellar-Ortega, G., Angulo-Mercado, E., Cardozo-Arrieta, B. (2014). Transesterification vegetable oils using heterogeneous catalysts. *Prospect.*, 12(2), 90-104.

Da Silva, C. A., Baker D., Shepherd A W Jenane Ch. y Miranda da Cruz S. (2013). *Agroindustrias para el desarrollo*. Roma: FAO. (2016).

El potencial y la diversificación de la caña de azúcar. Recuperado de www.zafranet.com/2016/01/entrevista-nriquez-poy/.

Escandón-Guichard, J. y Pineda-Domínguez, D. (2014). El comercio exterior agroindustrial mexicano y sus estrategias de exportación. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (200).

Fanchini, C. R., Temer, B., Teixeira, M. C. y Cano. E. (2010) Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii*. *Biores. Technol.* 101(11), 4139-4143.

FAO. (2007). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 1997*. N° 30. (pp. 221-2589). Roma: FAO. ISSN: 0251-1371.

Gavilanes Teran, Irene. (2016). Sostenibilidad del sector agroindustrial de Ecuador mediante el compostaje de sus residuos y el uso agrícola de los materiales obtenidos. Tesis doctoral Universidad Miguel Hernández (UMH) de Elcher.

Grass-Ramírez, J. F. (2011). El enfoque de sistemas agroindustriales. *Textual*. (56), 123-136.

Gumucio-Aguirre, M. A. (2016). Análisis macrosectorial. Recuperado de www.odepa.gob.cl. Pdf.

INEGI (2010). Censo general de población y vivienda, 2010. México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx>.

IRRI (2014). *Manual para la implementación de proyectos de captura de metano emitido por la agricultura y ganadería en México*.

Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. (2008). Diario Oficial de la Federación, 01 de febrero de 2008, 10 pp.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2007). Diario Oficial de la Federación, 08 de octubre de 2003, última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de junio de 2007, 42 pp.

Masera Cerutti, O., Coralli, F., García Bustamante, C., Riegelhaupt E., Arias Chalico, T., Vega Gregg, J., Cecotti L. (2011). *La Bioenergía en México Situación actual y perspectivas* (1a ed.). México: Red Mexicana de Bioenergía A.C.

Naciones Unidas (2015). *Transformar nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Documento A/70/L.1.

Povolo, S., Toffano, P., Basaglia, M. y Casella, S. (2010). Polyhydroxyalkanoates production by engineered *Cupriavidus necator* from waste material containing lactose. *Biores. Technol.* 101(20), 7902-7907.

ProMéxico Desarrollo sustentable y el crecimiento económico en México (2014). Recuperado de www.promexico.gob.mx/desarrollo-sustentable.

PwC, IMERE y WWF. (2013). *Plan integral para el desarrollo de las energías renovables en México 2013-2018: Propuestas de escenarios y acciones necesarias para su desarrollo*. México: PwC.

PwC México (2015). Agroindustria. Recuperado de: www.pwc.com/mx/es/industrias/agroindustria.html.

Ramos-Casselis, M. E. (2015). BUAP crea fibra, alimento y biocombustible de residuos frutales. Comunicación institucional BUAP. Recuperado de: http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd.

Rodríguez, O. V., y Hansen, H. (2007). Obtención de dextrano y fructosa, utilizando residuos agroindustriales con la cepa *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B512-F. *Rev. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*, 7, 159-172.

SAGARPA (2016). Aumenta PIB agroalimentario 3.3 al primer semestre de 2016. Comunicado de prensa publicado 30 de agosto de 2016. Recuperado de: www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/2016/agosto/Documents/JAC0368-30.PDF.

Saval, Susana (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16 (2).

Thanapimmentha, A., Luadsongkram, A., Titapiwatanakun, B. y Srinophakun, P. (2012) Value added waste of *Jatropha curcas* residue: Optimization of protease production in solid state fermentation by Taguchi DOE methodology. *Ind. Crops Prods.* 37(1): 1-5.

Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A. y Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14 (7), 2147-2153.

Valencia Botero, M. y Cardona Alzate, C. (2013). Evaluación ambiental para procesos que usan residuos de la industria de los biocombustibles como materias primas. *Revista EIA*, 10 (19), ISSN 1794-1237 (2013).

Zúñiga González C. A. (2011). *Texto básico de economía agrícola: Su importancia para el desarrollo local sostenible*. Nicaragua: Editorial Universitaria, UNAN-León. ISBN: 978-99964-0-049-0.