



Revista MICA.
Volumen 1, No. 1.
ISSN: En trámite
Periodo: Enero-Junio 2018
Tepic, Nayarit. México
Pp. 6-23
Recibido: 13 de febrero de 2018
Aprobado: 25 de febrero de 2018

Un estudio sobre el potencial del uso de residuos lignocelulósicos
An assessment over potential of the use of lignocellulosic waste

José Uriel Medina Morales
Universidad Autónoma de Nayarit
Mónica Leticia Sánchez Herrera
Universidad Autónoma de Nayarit
Antonio Hidalgo Millán
Universidad Autónoma de Nayarit
Edgar Iván Jiménez Ruíz
Universidad Autónoma de Nayarit
Teresa de Jesús Ruíz Sánchez
Universidad Autónoma de Nayarit
Miguel Ángel Espinosa Rodríguez
Universidad Autónoma de Nayarit
Raúl Delgado Delgado
Universidad Autónoma de Nayarit

Un estudio sobre el potencial del uso de residuos lignocelulósicos

An assessment over potential of the use of lignocellulosic waste

Resumen

En este trabajo, se presentan diversos estudios relacionados con el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para diversas aplicaciones, como la obtención de azúcares, combustibles, alcoholes, plásticos, entre otros. Además, se muestran diversos métodos para combatir la recalcitrancia generada por la lignina en los residuos lignocelulósicos, y las diferentes técnicas para el aprovechamiento de estos residuos.

Palabras clave: biomasa, residuos lignocelulósico, pretratamientos.

Abstrac

In this work, several studies related to the use of lignocellulosic waste for various applications, such as obtaining sugars, fuels, alcohols, plastics, among others, are presented. In addition, several methods are shown to combat the recalcitrance generated by lignin in lignocellulosic waste, and the different techniques for the use of these residues.

Keywords: biomass, lignocellulosic waste, pretreatment.

Introducción

El incremento en la explotación de los recursos fósiles, producto de la demanda tanto del sector energético como industrial, ha conducido a una disminución considerable de las reservas probadas que, aunado al cambio climático, nos ha llevado a considerar fuentes renovables y sustentables, de energía y de materias primas para las industrias de transformación.

Las fuentes renovables, como la biomasa lignocelulósica, representan un prolífico punto de partida para la producción de energía y bioproductos (No, 2014; Pérez-Rodríguez, et al., 2016; Rabelo, *et al.*, 2011). El aprovechamiento de estas fuentes puede percutir favorablemente en la bioindustria para lograr acoplarse a las demandas energéticas y de productos que tiene la sociedad, además esto podrá apoyar a una adaptación de la industria actual a un modelo más sustentable (Huang, *et al.*, 2016; Jahnavi, *et al.*, 2017).

El interés que ha despertado la biomasa lignocelulósica en el campo de la investigación reside en el carácter renovable de este recurso. De los productos obtenidos de esta fuente, los combustibles presentan menor producción de gases de efecto invernadero, esto, en comparación de combustibles fósiles. Además, el aprovechamiento de esta fuente no rivaliza con los productos alimenticios, ya que de esta fuente solo se emplean los residuos agrícolas, forestales y agroindustriales (Ali, *et al.*, 2012; Anwar, *et al.*, 2014; Hu, *et al.*, 2013; Zhou, *et al.*, 2013; Pandey, *et al.*, 2000).

Se calcula que mediante la fotosíntesis se producen aproximadamente doscientos mil millones de toneladas métricas de biomasa lignocelulósica, lo cual contiene un potencial energético de 3×10^{18} kJ/año, representa diez veces el consumo energético anual mundial; mostrando el gran potencial del recurso lignocelulósico para reducir la dependencia que se tiene de los recursos fósiles, y en un futuro, suplirla (Hu, *et al.*, 2013). Lo anterior, ha llevado a algunos países en desarrollo a buscar mejores estrategias para aprovechar sus tecnologías de producción para abrir nuevos mercados y apoyar la economía regional, como el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos como materia prima para la elaboración de productos de alto valor económico mediante diversos procesos de conversión. (Vallejos, *et al.*, 2016).

Los residuos lignocelulósicos están compuestos de celulosa (40-50 %), hemicelulosa (20-35 %) y lignina (10-15%) (Cuervo, *et al.*, 2009; Deutschmann & Dekker, 2012; Ormsby, *et al.*, 2012; Wang, *et al.*, 2017). La celulosa, es un biopolímero lineal con unidades de D-glucosa unidas entre sí mediante enlaces glucosídicos β -(1-4), estas cadenas se unen entre sí por puentes de hidrógeno formando una estructura cristalina (Adekunle, *et al.*, 2016; Anwar, *et al.*, 2014; Coseri, 2017; Maeda, *et al.*, 2013). La hemicelulosa, es un biopolímero formado por cadenas de xilosa unidas mediante enlaces glucosídicos β -(1-4), pero a diferencia de la celulosa, esta presenta ramificaciones con enlaces glucosídicos α -(1-3) con diversos monosacáridos. La lignina es el compuesto que da la recalcitrancia al material lignocelulósico, por lo que es el principal impedimento para el aprovechamiento de los azúcares estructurales de esta fuente (Azadian, *et al.*, 2017; Baral & Shah, 2017; Escamilla-Treviño, 2012; Ghosh, 2016; Hernández-Hernández, *et al.*, 2016; Palamae, *et al.*, 2017).

El aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos puede realizarse por diversos métodos (Moragues & Rapallini, 2003; Giordano, *et al.*, 2011), los cuales se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Métodos para el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos.

Proceso	Descripción del proceso	Producto
Combustión directa	Empleo de caldera o fogón.	Calor Vapor
Pirólisis	Combustión controlada en la cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa.	Líquidos piroleñosos Carbón vegetal Gas pobre Gas rico
Gasificación	Combustión controlada en presencia de oxígeno o aire.	Gas pobre Gas medio
Licuefacción Anaeróbicos	Hidrogenación indirecta. Se emplea un sistema cerrado (biodigestor).	Combustibles líquidos Biogás (producto) Abono (residuo)
Aeróbicos	El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación.	Etanol
Sacarificación	Hidrólisis (ácida o enzimática).	Azúcar

La mayoría de los procesos anteriormente mostrados se enfocan en el aprovechamiento con fines energéticos, pero en el caso de la sacarificación, en la obtención de los azúcares estructurales, estos productos se pueden emplear para diversos fines, ya que los azúcares son los intermediarios naturales de la conversión química y bioquímica de la biomasa. Estos carbohidratos estructurales pueden obtenerse de dos formas; la primera es mediante la técnica de hidrólisis ácida, en la cual se emplean ácidos que atacan los enlaces de las cadenas de los polisacáridos; el segundo método es la hidrólisis enzimática, en la

cual se emplean enzimas hidrolíticas que atacan selectivamente a los enlaces que unen a estas estructuras (Ali, *et al.*, 2012; Cuervo, *et al.*, 2009; Giordano, *et al.*, 2011). Para poder realizar este proceso, se debe reducir la concentración de lignina. Para esto, en la tabla 2 se muestran los métodos que se han desarrollado (Baral & Shah, 2017; Hernández-Hernández, *et al.*, 2016; Yamaguchi, *et al.*, 2015; Sharma & Horn, 2016).

Tabla 2. Pretratamientos para la reducción del contenido de lignina en los residuos lignocelulosa.

Tipo de método	Agente empleado
Químico	Se emplean bases o ácidos para reducir la recalcitrancia del material lignocelulósico.
Físico	Se emplean técnicas para incrementar la porosidad y tamaño del área de contacto de la partícula.
Bioquímico	Se emplean agentes que se alimentan de la lignina.

Residuo de caña de azúcar

El residuo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es generado a partir su aprovechamiento por la industria azucarera. Al extraer el jugo, rico en sacarosa, del tallo de la planta, se generan aproximadamente 270-280 kg de residuo por tonelada (Shomeili, *et al.*, 2011; Dewanti, *et al.*, 2016; Jain, *et al.*, 2016). El residuo de caña puede ser utilizado como materia prima para la generación de productos químicos, biocombustibles, alimento, papel, entre otros (Xu, *et al.*, 2006; Jutakrudsada, *et al.*, 2016; Vohra, *et al.*, 2014). En algunos ingenios azucareros siguen empleando la combustión del material lignocelulósico como combustible auxiliar, pero se realiza de forma ineficiente creando polución ambiental, además en ocasiones es necesario disponer de otros combustibles para poder utilizar este residuo como combustible (Monteiro, *et al.*, 2016; Pandey, *et al.*, 2000; Maryana, *et al.*, 2014).

La composición de la caña de azúcar es aproximadamente 43% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 21% de lignina; la celulosa y la hemicelulosa no son las únicas que pueden ser aprovechadas por la producción de azúcares; la lignina, en el caso de la caña de azúcar,

contiene, entre otros compuestos, ácido p-cumárico y ácido ferúlico que son antioxidantes que pueden ayudar contra enfermedades cardiovasculares y tratamiento contra el cáncer (Vallejos, *et al.*, 2016; Jain, *et al.*, 2016). En la tabla 3 se muestran algunos de los trabajos que se han realizado sobre el residuo de la caña de azúcar.

Tabla 3. Estudios sobre el residuo lignocelulósico prominentes de la caña de azúcar.

Descripción del trabajo	Referencia
Comparación de pretratamientos en residuos lignocelulósicos de caña de azúcar para producción de etanol.	(Suhardi, <i>et al.</i> , 2013)
Evaluación de la caña energética de la variedad L 79-1002 para producción de etanol.	(Shields & Boopathy, 2011)
Evaluación de levadura <i>Kluyveromyces marxianus</i> para empleo óptimo de los azúcares fermentables obtenidos de residuos lignocelulósicos para emplearse en biorefinerías.	(Dasgupta, <i>et al.</i> , 2017)
Comparación de pretratamiento con diferentes microorganismos y fermentación solida de los azúcares obtenidos a partir del residuo de la caña de azúcar pretratada.	(Abo-State, <i>et al.</i> , 2013)
Comparación de pretratamiento con diferentes microorganismos y fermentación solida de los azúcares obtenidos a partir del residuo de la caña de azúcar pretratada.	(Abo-State, <i>et al.</i> , 2013)
Producción de éster metílico empleando residuo de caña de azúcar como catalizador.	(Chin, <i>et al.</i> , 2012)

Residuo de maíz

El maíz ha logrado cubrir gran parte de la demanda mundial de biocombustibles; inicialmente se encontraba desventaja debido a que tenía competencia con el suministro de alimentos y seguía generando gases de efecto invernadero; por estos motivos, diversas naciones se encargaron de estudiar la generación de biocombustible a partir de material lignocelulósico de residuos agrícolas y forestales (Golecha & Gan, 2016). La hojarasca del maíz es un residuo lignocelulósico viable gracias a su disponibilidad inmediata; aunque también se debe realizar un pretratamiento para la eliminación de lignina que se encuentra en el tallo de la planta del maíz (Baral & Shah, 2017). Se ha reportado que el residuo de maíz contiene aproximadamente de 30 a 50 % de arabinosilano y de 15 a 20 % de celulosa, por lo que tiene potencial como fuente productora de azúcares (Baral & Shah, 2017; Leathers, *et al.*, 2016; Mandal, *et al.*, 2017; Vallejos, *et al.*, 2016). En la tabla 4 se presentan algunos de los trabajos en los cuales el residuo de maíz ha sido empleado.

Tabla 4. Estudios sobre el residuo lignocelulósico prominentes del maíz.

Descripción del trabajo	Referencias
Producción de pasta termomecánica a partir del residuo lignocelulósico del maíz.	(Theng, <i>et al.</i> , 2015)
Evaluación del desempeño del residuo de maíz como productor de xilitol mediante rutas químicas y termoquímicas.	(Irmak, <i>et al.</i> , 2017)
Producción de compuestos plásticos de fibra de maíz a partir de residuos de este.	(Luo, <i>et al.</i> , 2017)
Comparación de los pretratamientos con dióxido de carbono supercrítico, el método de ultrasonido y una combinación de ambas técnicas para el mejoramiento de la producción de azúcares reductores del residuo de maíz.	(Yin, <i>et al.</i> , 2014)
Capacidad antioxidante de los compuestos fenólicos producidos a partir de la autohidrólisis de los	(Egüés, <i>et al.</i> , 2012)

residuos de maíz.

Empleo de los residuos de maíz en Tailandia para (Kerdsuwan & Laohalidanond, producción de pellets. 2015)

Residuo de agave

El agave puede adaptarse a zonas con escasez de agua y, a partir de grandes cantidades de CO₂ que aprovecha del ambiente, genera material lignocelulósico (García-Moya, *et al.*, 2010; Ganduri, *et al.*, 2015; Hernández-Hernández, *et al.*, 2016; Escamilla-Treviño, 2012; González-López, *et al.*, 2015). De acuerdo con el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), durante el año 2015 se produjeron 1,846,345.07 toneladas de agave. El agave tiene diversos usos, de los cuales, los principales son la producción de bebidas alcohólicas y como alimento; la fibra también es utilizada para la producción de tejidos, papel y para absorber metales pesados (García-Moya, *et al.*, 2010; Hernández-Hernández, *et al.*, 2016; Ganduri, *et al.*, 2015; SIAP, 2014). El corazón del agave, al ser sometido a un tratamiento térmico que genera una reacción de hidrólisis, libera fructosa (80-86%) y glucosa (10-15%), principalmente; este fenómeno, aunque en menor medida, también ocurre en las hojas del agave (3.3 y 9.4% de producción de fructosa y glucosa, respectivamente), pudiendo considerarse como fuente adicional de azúcares. El residuo lignocelulósico, se puede seguir empleando para usos que se les otorga por las propiedades de su fibra (Escamilla-Treviño, 2012). Aproximadamente, el 46 % del peso total de la planta cosechada son hojas, las cuales pueden ser empleadas debido al material lignocelulósico que contienen. Se han realizado diversos estudios para el aprovechamiento total de la planta, lo que ha llevado a la creación de cultivos y a su comercialización en otros países (Hernández-Hernández, *et al.*, 2016; Ganduri, *et al.*, 2015). En la tabla 5 se muestra algunos de los trabajos en los que se han implementado el residuo lignocelulósico de la

Tabla 5. Estudios sobre el residuo lignocelulósico prominentes del agave.

<i>Descripción del trabajo</i>	<i>Referencia</i>
Comparación de la hidrólisis ácida y enzimática, y la fermentación con <i>saccharomyces cerevisiae</i> de los azúcares obtenidos del agave y el residuo de caña.	(Hernández-Salas, <i>et al.</i> , 2009)
Comparación de los pretratamientos con líquido iónico y con organosolv en el residuo de agave, para observar el efecto de sacarificación y, posteriormente, la fermentación de los azúcares obtenidos.	(Pérez-Pimienta, <i>et al.</i> , 2017)
Se analizó las diferencias de los tratamientos en el residuo del agave, en los que se incluyen la expansión de fibra de amoníaco, la autohidrólisis y líquido iónico, para evaluar la producción de azúcares.	(Perez-Pimienta, <i>et al.</i> , 2016)
Se realizó la evaluación de la hidrólisis ácida con ácido diluido para la obtención de azúcar del bagazo de agave cocido y no cocido; además se analizó la posibilidad para emplearlo como sustrato en la producción de metano en reactores anaerobios.	(Arreola-Vargas, <i>et al.</i> , 2014)
Caracterización del residuo de agave y de opuntia, para su aprovechamiento como materia prima de biocombustibles.	(Yang, <i>et al.</i> , 2015)
Estudio de los efectos de la temperatura, tiempo de residencia y las concentraciones de ácido y de etanol en el pretratamiento con etanolsolv y la hidrólisis enzimática.	(Caspeta, <i>et al.</i> , 2014)

Residuo de plátano

El plátano es cultivado en 120 países, principalmente de clima tropical. Los residuos generados del cultivo de plátano son elevados; se estima que por cada tonelada de fruto producido se generan aproximadamente 480 kg de hojas, 160 kg de tallo, 3 toneladas de pseudotallo y 440 kg de cáscara; el plátano muere después de dar su fruto, generando una nueva planta y provoca una gran cantidad de residuos. La cáscara del plátano puede ser empleada como fuente de azúcares debido a que tiene una alta cantidad de carbohidratos, y considerando que se desecha aproximadamente el 30% de producción de plátano. La cáscara de plátano contiene 28 % de celulosa, 25% de hemicelulosa y 10% de lignina (Aditiya, *et al.*, 2016; Baharin, *et al.*, 2016; Bello, *et al.*, 2014; Housagul, *et al.*, 2014; Suryaningsih & Pasaribu, 2015). Algunos de los trabajos en los que se han empleado los residuos lignocelulósicos provenientes del cultivo del plátano se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Estudios sobre el residuo lignocelulósico prominentes del plátano.

Descripción del trabajo	Referencia
Simulación en el software Aspen Plus v7.3 (Aspen Technology, Inc., USA) en el cual se diseñó el proceso en el cual se incluía en una biorrefinería y se analizaba el costo de producción de polihidroxibutirato (biopolímero biodegradable y biocompatible).	(Naranjo, <i>et al.</i> , 2014)
Se emplea la cascara de banana como sustrato, en el cual se realizó una hidrólisis ácida para la producción de azúcares y posterior se fermento con la levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para la producción de etanol.	(Gebregergs, <i>et al.</i> , 2016)
Se emplea los residuos agrícolas del plátano, a los cuales se evaluaron con dos pretratamientos diferentes, ácido y alcalino; enseguida se realizó una hirdólisis enzimática con celulasa ONOZUKA-R10;	(Gabhane, <i>et al.</i> , 2014)

aquí se evaluaron los pretratamientos en el autoclave, con tratamiento de microondas y ultrasoniación.

Análisis energético en la producción de etanol (Velásquez-Arredondo, *et al.*, 2010) anhidro producido a partir de plátano y su residuo; el trabajo considera el cultivo de plátano, transporte, los procesos de hidrólisis, fermentación, destilación, deshidratación, el tratamiento de residuos y plantas de utilidad.

Producción de etanol a partir de la cascara de plátano (Oberoi, *et al.*, 2011) mediante una sacarificación y fermentación simultánea.

Otros residuos lignocelulósicos

Existen diversos trabajos que emplean residuos lignocelulósicos prominentes de diferentes frutos. Uno de estos frutos es la jaca (*Artocarpus heterophyllus*), la cual se cultiva abundantemente en Tailandia, Indonesia, Myanmar, India, Filipinas y Malasia. Aproximadamente, el 40 % del fruto es residuo (Elevitch & Manner, 2006; Wahidin & Wuryantoro, 2015; Bhatnagar, *et al.*, 2015; Saxena & Bawa, 2011). Existen algunos trabajos sobre aprovechamiento del almidón de las semillas de jaca, pero son muy pocos los que tratan con su residuo lignocelulósico, que incluye la corteza exterior y la fibra de carpelo que mantiene intacta el bulbo del fruto (Angumeenal & Venkappayya, 2005). Uno de estos es el presentado por Wahidin & Wuryantoro (2015), quienes realizaron una hidrólisis ácida y enzimática para la obtención de azúcares reductores.

Yamaguchi, *et al.*, (2016) trabajaron con diferentes tipos de materiales lignocelulosicos, en los que destacan el cedro japonés, eucalipto, bagazo, cascara de frutas y de la paja de arroz. En el trabajo se presentó la composición de cada uno de estos residuos y se comparó la producción de los diferentes alcoholes de azúcares (polioles) como lo son el sorbitol, manitol, galactitol, xilitol y arabitól.

Conclusiones

Los residuos lignocelulósicos tienen potencial para apoyar el cumplimiento de la demanda mundial energética. Además, a partir de los residuos lignocelulósicos también se pueden obtener otros productos como los alcoholes, plásticos, sustrato para microorganismos, entre algunos otros productos. La biomasa lignocelulósica proviene de diversas fuentes, como cultivos, residuos forestales y de la agroindustria. La composición de la biomasa lignocelulósica difiere de una fuente a otra, por lo que no se puede emplear el mismo pretratamiento para todos los residuos. Las zonas agrícolas, presentan una gran oportunidad para el aprovechamiento de estos recursos, ya que el costo de recolección y transporte es relativamente bajo en comparación con zonas urbanas. Además, el aprovechamiento de estos recursos, como materias primas de las cadenas productivas, tendrá un efecto positivo sobre las economías regionales de las naciones.

Referencias

- Abo-State, M. A., Ragab, A. M. E., EL-Gendy, N., Farahat, L. A. y Madian, K. R., 2013. Effect of different pretreatments of egyptian sugar-cane bagasse saccharification and bioethanol production. *Egyptian Journal of Petroleum*, pp. 161-167.
- Adekunle, A., Orsat, V. y Raghavan, V., 2016. Lignocellulosic bioethanol: A review and design conceptualization study of production from cassava peels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 64.
- Aditiya, H. B. y Chong, W. T., Mahlia, T. M. I., Sebayang, A. H., Berawi, M. A. y Nur, H., 2016. Second generation bioethanol potential from selected Malaysia's biodiversity biomasses: A review. *Waste Management*, Volumen 47, pp. 46-61.
- Ali, H., Hashem, M., Shaker, N., Ramadan, M., El-Sadek, B., y Hady, M. A., 2012. Cellulase Enzyme in Bio-Finishing of Cotton-Based Fabrics: Effects of Process Parameters. *Research Journal of Textile and Apparel*, 16(3), pp. 57-65.
- Angumeenal, A. y Venkappayya, D., 2005. Artrocarpus heterophyllus - A potential substrate for citric acid biosynthesis using *Aspergillus niger*. *Food Science and Technology*, 38(1), pp. 89-93.
- Anwar, Z., Gulfraz, M. y Irshad, M., 2014. Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2).

- Arreola-Vargas, J. Ojeda-Castillo, V., Snell-Castro, R., Corona-González, R. I., Alatrístre-Mondragón, F. y Méndez-Acosta, H. O., 2014. Methane production from acid hydrolysates of Agave tequilana bagasse: Evaluation of hydrolysis conditions and methane yield. *Bioresource Technology*, Volumen 181, pp. 191-199.
- Aver, K. R., Scortegagna, A. Z., Fontana, R. C. y Camassala, 2014. Saccharification of ionic-liquid-pretreated sugar cane bagasse using *Penicillium echinulatum* enzymes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(5), pp. 2060-2067.
- Azadian, F., Badoei-Dalfard, A., Namaki-Shoushtari, A., Karami, Z. y Hassanshahian, M., 2017. Production and characterization of an acido-thermophilic, organic solvent stable cellulase from *Bacillus sonorensis* HSC7 by conversion of lignocellulosic wastes. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15(1).
- Baharin, A., Fattah, N., Bakar, A. y Ariff, Z., 2016. Production of Laminated Natural Fibre Board from Banana Tree Wastes. *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM)* y *2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP)*, Volumen 19, pp. 999-1006.
- Baral, N. y Shah, A., 2017. Comparative Techno-Economic Analysis of Steam Explosion, Dilute Sulfuric Acid, Ammonia Fiber Explosion and Biological Pretreatments of Corn Stover. *Bioresource Technology*, Volumen 232, p. 331–343.
- Bello, R. H., Linzmeyer, P., Franco, C. M., Souza, O., Sellin, N., Medeiros, S. H. y Marangoni, C., 2014. Pervaporation of ethanol produced from banana waste. *Waste Management*, 34(8), pp. 1501-1509.
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M. y Witek-Krowiak, A., 2015. Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification - A review. *Chemical Engineering Journal*, Issue 8, pp. 244-271.
- Bussamra, B. C., Freitas, S. y Carvalho da Costa, A., 2015. Improvement on sugar cane bagasse hydrolysis using enzymatic mixture designed cocktail. *Bioresource Technology*, Volumen 187, pp. 999-1006.
- Caspeta, L., Caro-Bermúdez, M., Ponce-Noyola, T. y Martínez, A., 2014. Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol. *Applied Energy*.
- Chin, L. H., Abdulla, A. Z. y Hameed, B. H., 2012. Sugar Cane Bagasse as Solid Catalyst for Synthesis of Methyl Esters from Palm Fatty Acid Distillate. *Chemical Engineering Journal*, pp. 104-107.
- Coseri, S., 2017. Cellulose: To depolymerize... or not to?. *Biotechnology Advances*, 35(2).
- Cuervo, L., Folch, J. y Quiroz, R., 2009. Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol.. *BioTecnología*, 13(3), pp. 11-25.

- Dasgupta, D., Ghosh, D., Bandhu, S. y Adhikari, D. K., 2017. Lignocellulosic sugar management for xylitol and ethanol fermentation with multiple cell recycling by *Kluyveromyces marxianus* IPE453. *Microbiological research*, pp. 64-72.
- Deutschmann, R. y Dekker, R., 2012. From plant biomass to bio-based chemicals: Latest developments in xylan research. *Biotechnology Advances*, 30(6), p. 1627–1640.
- Dewanti, P., Widuri, L. I., Alfian, F. N., Addy, H. S., Okviandari, P. y Sugiharto, B., 2016. Rapid Propagation of Virus-free Sugarcane (*Saccharum officinarum*) by Somatic Embryogenesis. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Volumen 9, pp. 456-461.
- Egüés, I., Sanchez, C., Mondragon, I. y Labidi, J., 2012. Antioxidant activity of phenolic compounds obtained by autohydrolysis of corn residues. *Industrial Crops and Products*, 36(1).
- Elevitch, C. y Manner, H., 2006. *Artocarpus heterophyllus* (jackfruit). *Species Profiles for Pacific Island Agroforestry*, pp. 1-17.
- Escamilla-Treviño, L. L., 2012. Potential of Plants from the Genus *Agave* as Bioenergy Crops. *BioEnergy Research*, 5(1).
- Gabhane, J., William, S. P., Gadhe, A., Rath, R., Vaidya, A. N. y Wate, S., 2014. Pretreatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. *Waste Management*, 34(2), pp. 498-503.
- Ganduri, L., Van der Merwe, A. F. y Matope, S., 2015. Economic Model for the Production of Spirit, Inulin and Syrup from the Locally Eco-friendly *Agave Americana*. *Procedia CIRP*, Volumen 28, pp. 173-178.
- García-Moya, E., Romero-MANzanas, A. y Nobel, P. S., 2010. Highlights for *Agave* Productivity. *Global Change Biology*, 3(1), pp. 4-14.
- Gebregergs, A., Gebresemati, M. y Sahu, O., 2016. Industrial ethanol from banana peels for developing countries: Response surface methodology. *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, 18(1), pp. 22-29.
- Ghosh, S. K., 2016. Biomass y Bio-waste Supply Chain Sustainability for Bio-energy and Bio-fuel Production. *Procedia Environmental Sciences*, Volumen 31.
- Giordano, P. C., Beccaria, A. J. y Goicoechea, H. C., 2011. Significant factors selection in the chemical and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic residues by a genetic algorithm analysis and comparison with the standard Plackett–Burman methodology. *Bioresource Technology*, 102(22).
- Golecha, R. y Gan, J., 2016. Cellulosic biorefinery portfolio and diversification: Strategies to mitigate cellulosic biorefinery risks in US Corn Belt. *Energy Strategy Reviews*, 13(14), pp. 147-153.

- González-López, J. R., Ramos-Lara, J. F., Zaldivar-Cadena, A. Z., Chávez-Guerrero, L., Magallanes-Rivera, R. X. y Burciaga-Díaz, O., 2015. Small addition effect of agave biomass ashes in cement mortars. *Fuel Processing Technology*, Volumen 133, pp. 35-42.
- Hernández-Hernández, H., Chanona-Pérez, J. J., Vega, A., Ligeró, P., Mendoza-Pérez, J. P., Calderón-Domínguez, G., Terrés, E. y Farrera-Rebollo, R. R., 2016. Acetosolv treatment of fibers from waste agave leaves: Influence of process variables and microstructural study. *Industrial Crops and Products*, Volumen 86.
- Hernández-Salas, J. M., Villa-Ramírez, M. S., Veloz-Rendón, J. S., N., Rivera-Hernández K., González-César, R. A., Plascencia-Espinosa, M. A. y Trejo-Estrada, S. R., 2009. Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. *Bioresource Technology*, Volumen 100, p. 1238–1245.
- Housagul, S., Sirisukpoka, U., Boonyawanich, S. y Pisutpaisal, N., 2014. Biomethane Production from Co-Digestion of Banana Peel and Waste Glycerol. *International Conference on Applied Energy*, Volumen 61, p. 2219–2223.
- Huang, Y., Chiueh, P. y Lo, S., 2016. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Sustainable Environment Research*, 26(3).
- Hu, L., Lin, L., Wu, Z., Zhou, S. y Liu, S., 2013. Cellulase Enzyme in Bio-finishing of Cotton-Based Fabrics: Effects of Process Parameters. *Research Journal of Textile and Apparel*, 12(3).
- Irmak, S., Canisag, H., Vokoun, C. y Meryemoglu, B., 2017. Xylitol Production from Lignocellulosics: Are Corn Biomass Residues Good Candidates?. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Volumen 11, pp. 220-223.
- Jahnavi, G., Prashanthi, G., Sravanthi, K. y Rao, L., 2017. Status of Availability of Lignocellulosic Feed Stocks in India: Biotechnological Strategies Involved in the Production of Bioethanol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 73, p. 798–820.
- Jain, A., Wei, Y. y Tietje, A., 2016. Biochemical conversion of sugarcane bagasse into bioproducts. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 93, pp. 227-242.
- Jutakradsada, P., Sriprasod, R., Patikarnmonthon, N. y Kamwilaisak, K., 2016. Comparison Study of Sugarcane Leaves and Corn Stover as a Potential Energy Source in Pyrolysis Process. *Energy procedia*, Volumen 100, pp. 26-29.
- Kerdsuwan, S. y Laohalidanond, K., 2015. Approach of using Corn Residue as Alternative Energy Source for Power Production: A Case Study of the Northern Plain Area of Thailand. *Energy Procedia*, 79(125-130).
- Leathers, T., Nunnally, M. S., Stanley, A. M. y Rich, J. O., 2016. Utilization of corn fiber for production of schizophyllan. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 95, pp. 132-136.

- Luo, Z. y otros, 2017. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk. *Industrial Crops and Products*, Volumen 95, pp. 521-527.
- Maeda, R. N., Barcelos, C. A., Anna, L. M. M. S. y Pereira, N., 2013. Cellulase production by *Penicillium funiculosum* and its application in the hydrolysis of sugar cane bagasse for second generation ethanol production by fed batch operation. *Journal of Biotechnology*, 163(1).
- Mandal, B. H., Rahman, Md. L., Yusoff, M. M., Chong, K. F. y Sarkar, S. M., 2017. Bio-waste corn-cob cellulose supported poly(hydroxamic acid) copper complex for Huisgen reaction: Waste to wealth approach. *Carbohydrate Polymers*, Volumen 156, pp. 175-181.
- Maryana, R., Márifatun, D., Wheni, A. I., Satriyo, K. W. y Risal, W. A., 2014. Alkaline Pretreatment on Sugarcane Bagasse for Bioethanol Production. *Energy Procedia*, Volumen 47, pp. 250-254.
- Monteiro, S. N., Candido, V. S., Braga, F. O., Bolz, L. T., Wever, R. P. y Drelich, J. W., 2016. Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. *European Polymer Journal*, Volumen 78, pp. 173-185.
- Moragues, J. A. y Rapallini, A. T., 2003. Energía de la biomasa. *Proyecto energía*, Issue 65, pp. 18-21.
- Naranjo, J. M., Cardona, C. A. y Higueta, J. C., 2014. Use of residual banana for polyhydroxybutyrate (PHB) production: Case of study in an integrated biorefinery. *Waste Management*, 34(12), pp. 2634-2640.
- No, S., 2014. Application of Bio-Oils from Lignocellulosic Biomass to Transportation, Heat and Power generation—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 40, p. 1108–1125.
- Oberoi, H. S., Vadlani, P. V., Saida, L., Bansal, S. y Hughes, J. D., 2011. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Management*, 31(7), pp. 1576-1584.
- Ormsby, R., Kastner, J. y Miller, J., 2012. Hemicellulose hydrolysis using solid acid catalysts generated from biochar. *Catalysis Today*, Volumen 192, p. 89– 97.
- Palamae, S. y otros, 2017. Cellulose and hemicellulose recovery from oil palm empty fruit bunch (EFB) fibers and production of sugars from the fibers. *Carbohydrate Polymers*.
- Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P. y Soccol, V. T., 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 74(1).

- Pérez-Pimienta, J. A., Vargas-Tah, A., López-Ortega, K. M., Medina-López, Y. N., Mendoza-Pérez, J. A., Avila, S., Singh, S., Simmons, B. A., Loaces, I. y Martínez, A., 2017. Sequential enzymatic saccharification and fermentation of ionic liquid and organosolv pretreated agave bagasse for ethanol production. *Bioresource Technology*, Volumen 225, pp. 191-198.
- Perez-Pimienta, J., Vargas-Tah, A., López-Ortega, K. M., Medina-López, Y. N., Mendoza-Pérez, J. A., Avila, S., Singh, S., Simmons, B. A., Loaces, I. y Martínez, A., 2016. Evaluation of agave bagasse recalcitrance using AFEX™, autohydrolysis, and ionic liquid pretreatments.. *Bioresource Technolgu*.
- Pérez-Rodríguez, N., García-Bernet, D. y Domínguez, J., 2016. Effects of enzymatic hydrolysis and ultrasounds pretreatments on corn cob and vine trimming shoots for biogas production. *Bioresource Technology*, Septiembre, Issue 221, p. 130–138.
- Rabelo, S., Carrere, H., Maciel Filho, R. y AC, C., 2011. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 102(17).
- Saxena, A. y Bawa, A. R. P. S., 2011. 12 – Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). *Food Science, Technology and Nutrition*, p. 275–298.
- Sharma, S. y Horn, S. J., 2016. Enzymatic saccharification of brown seaweed for production of fermentable sugars. *Bioresource Technology*, Volumen 213.
- Shields, S. y Boopathy, R., 2011. Ethanol Production from Lignocellulosic Biomass of Energy Cane. *International Biodeterioration y Biodegradation*, pp. 91-96.
- Shomeili, M., Nabipour, M., Maskarbashee, M. y Memari, H., 2011. Evaluation of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Somaclonals Tolerance to Salinity Via In Vitro and In Vivo. *HAYATI Journal of Biosciences*, 18(2), pp. 91-96.
- SIAP, 2014. *Cierre de Producción Agrícola por Cultivo*. [En línea] Available at: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> [Último acceso: 22 08 2016].
- Suhardi, V., Harjati, S., Prasai, B., Samaha, D. y Boopathy, R., 2013. Evaluation of Pretreatment Methods for Lignocellulosic Ethanol Production from Energy Cane Variety. *International Biodeterioration y Biodegradation*, Volumen 85.
- Suryaningsih, N. y Pasaribu, Y., 2015. Dewaka Banana as an Alternative Energy Source. *The First International Symposium on Food and Agro-Biodiversity Conducted by Indonesian Food Technologists Community*, Volumen 3, pp. 211-215.
- Theng, D., Arbat, G., Delgado-Aguilar, M., Vilaseca, F., Ngo, B. y Mutjé, P., 2015. All-lignocellulosic fiberboard from corn biomass and cellulose nanofibers. *Industrial Crops and Products*, Volumen 76, pp. 166-173.

- Vallejos, M., Chade, M., Mereles, E. B., Bengoechea, D. I., Brizuela, J. G. Felissia, F. E. y Area, M. C., 2016. Strategies of detoxification and fermentation for biotechnological production of xylitol from sugarcane bagasse. *Industrial crops and products*, Volumen 91, pp. 161-169.
- Velásquez-Arredondo, H. I., Ruiz-Colorado, A. A. y De Olivera junior, S., 2010. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. *Energy*, 35(7), pp. 3081-3087.
- Vohra, M. y otros, 2014. Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), pp. 573-584.
- Wahidin, N. y Wuryantoro, 2015. Ethanol Synthesis From Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) Stone Waste as Renewable Energy Source. *Energy Procedia*, p. 372 – 377.
- Wang, Y. Xiong, H., Wang, Z., Din, Z. y Chen, L., 2017. Effects of different durations of acid hydrolysis on the properties of starch-based wood adhesive. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Xu, F., Sun, J. X., Liu, C. F. y Sun, R. C., 2006. Comparative study of alkali- and acidic organic solvent-soluble hemicellulosic polysaccharides from sugarcane bagasse. *Carbohydrate Research*, 341(2), pp. 253-261.
- Yamaguchi, A., Sato, O., Mimura, N. y Shirai, M., 2016. Catalytic Production of Sugar Alcohols from Lignocellulosic Biomass. *Carbohydrate Research*, pp. 199-202.
- Yamaguchi, D., Watanabe, K. y Fukumi, S., 2015. Hydrolysis of Cellulose by a Mesoporous Carbon-Fe₂(SO₄)₃/γ-Fe₂O₃ Nanoparticle-Based Solid Acid Catalyst. *Scientific Reports*.
- Yang, L. Lu, M., Carl, S., Mayer, J. A., Cushman, J. C., Tian, E. y Lin, H., 2015. Biomass Characterization of Agave and Opuntia as Potential Biofuel Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 76, pp. 43-53.
- Yin, J., Hao, L., Yu, W., Wang, E., Zhao, M., Xu, Q.; y Liu, Y., 2014. Enzymatic hydrolysis enhancement of corn lignocellulose by supercritical CO₂ combined with ultrasound pretreatment. *Chinese Journal of Catalysis*, 35(5).
- Zhou, L., Shi, M., Cai, Q., Wua, L., Hua, X., Yang, X. y Chen, C., 2013. Hydrolysis of hemicellulose catalyzed by hierarchical H-USY zeolites – The role of acidity and pore structure. *Microporous and Mesoporous Materials*, Volumen 169, pp. 54-59.