

Residuos lignocelulósicos como materia prima de segunda generación en procesos de biorrefinación

Andrea Briones Muñoz^{1*}, María Antonieta Riera²

¹⁾ Maestría Profesional en Química, Mención Química Ambiental. Instituto de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador

²⁾ Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador

(*) gbriones2108@utm.edu.ec

Recibido: 17/10/2021

Revisado: 26/11/2021

Aceptado: 15/12/2021

Resumen

Existe interés mundial en reemplazar los combustibles fósiles por fuentes renovables. La primera generación de biorrefinerías se basó en la utilización de cultivos alimentarios, lo que generó un debate sobre alimentos contra combustible y una sostenibilidad cuestionable. Para superar esto, se propuso el uso de materias primas lignocelulósicas incluyendo desde cultivos no alimentarios hasta residuos y desechos agro-forestales. Atendiendo a esta premisa, se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de residuos lignocelulósicos de segunda generación para la producción de bioproductos. Se investigó acerca de los procesos de transformación empleados, los bioproductos obtenidos y la cantidad de residuos de este tipo que están disponibles en Latinoamérica para su uso. El aprovechamiento de este tipo de residuos brinda una oportunidad para el desarrollo de la región al utilizar materia prima de bajo costo para la obtención de productos con valor agregado.

Palabras claves: Biomasa; Bioproducto; Biorrefinerías; Residuos agrícolas.

Abstract

Lignocellulosic waste as a second generation raw material in biorefining processes. There is global interest in replacing fossil fuels with renewable sources. The first generation of biorefineries relied on the utilization of food crops, sparking a debate on food versus fuel and questionable sustainability. To overcome this, the use of lignocellulosic raw materials was proposed, ranging from non-food crops to agro-forestry residues and waste. Based on this premise, a bibliographic review was carried out on the use of second-generation lignocellulosic waste for the production of bioproducts. It was investigated about the transformation processes used, the bioproducts obtained and the amount of waste of this type that are available in Latin America for use. The exploitation of this type of waste provides an opportunity for the development of the region by using low-cost raw materials to obtain products with added value.

Keywords: Biomass; Bioproduct; Biorefinery; Agricultural waste.

Introducción

El petróleo es un recurso fósil que existe desde la antigüedad, con el cual se han obtenido combustibles, fertilizantes, telas, detergentes, pinturas, plásticos, entre otros, demandados por la sociedad. El proceso de extracción, refinación y procesamiento del petróleo, requerido para la producción de diversos productos, ha generado consecuencias desfavorables a lo largo de los años en la calidad del aire, agua y suelo, visible además en los efectos del cambio climático.

De acuerdo a Sarmiento¹, los compromisos ambientales como el convenio de Viena para la protección de la capa de ozono, el protocolo de Montreal, el protocolo de Kioto y el convenio marco de cambio climático, han impulsado en la actualidad medidas para sustituir las fuentes convencionales de producción de energía por otras de origen renovable, de modo que sean sustentables.

Una de ellas es la biomasa, presente en fuentes animales, vegetales, silvicultura e industrias conexas, así como en la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales². Es un recurso constituido por carbono e hidrógeno, a partir de los cuales se puede obtener energía, combustibles y productos químicos³.

La biomasa lignocelulósica está conformada principalmente por celulosa (38-50%), hemicelulosa (23-32 %) y lignina (15-25 %)⁴. Dentro de esta clasificación están los residuos agrícolas e industriales, entre los cuales están la cáscara de arroz⁵, bagazo de caña de azúcar⁶, rastrojo de maíz⁷, pseudotallo del plátano⁸, residuos de palma africana⁹, cáscara y semillas de naranja⁴. Otra parte de la biomasa lignocelulósica está presente en los residuos forestales, de la silvicultura, cultivos energéticos y algunos residuos sólidos. Estos tienden a ser una opción viable para la producción de energía, debido a que las materias primas lignocelulósicas no compiten con los cultivos

alimentarios y además tienen un precio más competitivo que las materias primas agrícolas convencionales¹⁰.

La biorrefinación de biomasa residual también permite obtener diferentes subproductos de calidad que se procesan en la actualidad en la industria química¹¹. Para ello, se han desarrollado nuevos procedimientos de síntesis orientados a una producción eficiente de bioproductos de segunda generación con un alto valor añadido.

Dentro de este contexto se desarrolló la presente revisión bibliográfica, con el propósito de conocer los residuos lignocelulósicos utilizados en la actualidad, los productos generados a partir de ella, las rutas de procesamiento existentes, además del potencial que tiene Latinoamérica (LA) como generadora de residuos de este tipo. Para tal fin se consultaron fuentes primarias y secundarias publicadas en los últimos años, seleccionando en primer lugar las de alto impacto. Se utilizó como motor de búsqueda Google Scholar, empleando como palabras clave: bioproductos, residuos lignocelulósicos y biorrefinería.

Materia prima de segunda generación

Se define como materia prima de segunda generación a las fuentes agrícolas y forestales que no son parte de la alimentación y que además, son eficientes para la obtención de energía verde o renovable, lo que reduce la generación de gases de efecto invernadero (GEI) en el ambiente y contribuye a la disminución de contaminantes atmosféricos considerando todo su ciclo de vida¹²⁻¹⁶. Es un tipo de biomasa constituida en primer lugar por celulosa, que se define como un polisacárido compuesto por un solo tipo de monosacárido¹⁷. La celulosa es un producto biosintético de plantas, algunos animales y bacterias. Es el polímero más abundante de la naturaleza y tiene una estructura similar a una larga cadena lineal compuesta de unidades de glucopiranosilo con enlaces β -D (1,4)¹⁸.

La hemicelulosa es otro de los componentes que forman una estructura polimérica compleja, ramificada y consiste en la unión de diferentes unidades de azúcares: pentosas, hexosas y ácidos de estos azúcares¹⁹. Además, la hemicelulosa es un heteropolisacárido ramificado que interactúa con cadenas de celulosa y a veces se puede encontrar como un material de reticulación entre celulosa y lignina, principalmente impartiendo estabilidad estructural mejorada a la pared celular²⁰. Finalmente está la lignina, que se encuentra unida a la celulosa y hemicelulosa. Su diversidad estructural, compuesta principalmente por tres tipos de fenilpropano (p-hidroxifenil, guaia-cil y siringil), unidos entre ellos por enlaces éter y carbono-carbono, además de su heterogenicidad química, dificultan su biodigestibilidad²¹. La composición de algunos residuos lignocelulósicos se presentan en la tabla 1.

Estos residuos no sólo son abundantes y económicos, sino que además son fuente de diversos azúcares poliméricos: glucosa (celulosa) y xilosa (hemicelulosa), que se pueden convertir por vía química o biotecnológica en productos de gran valor como azúcares, etanol, distintos productos químicos y enzimas³¹.

Tabla 1. Composición de residuos lignocelulósicos

Residuo	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Cáscara de plátano ²²	29,00 \pm 3,61	26,67 \pm 1,53	19,17 \pm 0,68
Cáscara de yuca ²²	28,67 \pm 1,53	6,67 \pm 2,08	19,75 \pm 0,64
Cáscara de limón ²³	21,60	6,00	8,90
Cáscara de mandarina ²³	20,20	7,80	9,10
Cáscara de naranja ²³	23,50	10,40	7,60
Paja de trigo ²⁴	38,70	30,00	12,40
Vaina de arveja ²⁴	44,90	28,40	15,10
Bagazo de maíz ²⁴	28,30	25,00	10,10
Raquis de palma africana ^{25,26}	46,14 \pm 1,05	2,28 \pm 0,22	26,31 \pm 2,81
Hojas de yuca ²⁷	40,90	15,63	ND
Tallos de yuca ^{27,28}	39,83	13,00	11,80
Bagazo de caña ²⁹	32,7 \pm 0,7	21,3 \pm 1,3	15,3 \pm 0,5
Cascarilla de arroz ²⁹	34,4 \pm 0,1	9,5 \pm 0,2	22,1 \pm 0,4
Asserín ²⁹	36,6 \pm 0,9	7,0 \pm 0,7	38,8 \pm 0,5
Residuos de poda ³⁰	35,52	ND	45,45

ND: No determinado

Productos biobasados y procesos de transformación

El desarrollo de productos biobasados se lleva a cabo bajo un modelo bioeconómico de producción piramidal o circuito de cascada, que busca el crecimiento económico a la vez que minimiza los impactos negativos en el ambiente y la sociedad. Este concepto se enfoca en la reducción de la cantidad de residuos para dar un valor más prolongado, mediante la creación de plantas de producción integradas que utilizan biomasa o materias primas derivadas de la biomasa y con ello producir una gama de productos de valor agregado y energía³².

Los productos de base biológica son diversos y entre ellos se encuentran: bioetanol, biobutanol, biohidrógeno, biodiesel, bioenergía, bioplástico, biometanol, bioaceite, biofertilizante, biogás y otros bioproductos, a partir de diferentes residuos lignocelulósicos (tabla 2).

Tabla 2. Productos obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos

Productos	Residuos agrícolas
Bioetanol	Corteza del cacao ³²
	Pasto mombaza ³⁴
	Cáscara de piña ³⁵
	Paja de arroz ³⁶
	Mazorcas de maíz ³⁷
Biobutanol	Tallo de yuca ³⁸
	Rastrojo de maíz ³⁹
Biohidrógeno	Bagazo de la caña de azúcar ⁴⁰
	Cáscara de naranja y plátano ⁴¹
	Rastrojo de maíz ⁴²
Biometanol	Residuos de frutas ⁴³
	Residuos de la palma de aceite ⁴⁴
Bioenergía	Residuos agroindustriales ⁴⁵
	Madera de eucalipto y residuos de cultivo de café ⁴⁶
	Residuo de arroz ⁴⁷
Bioplástico	Residuo de arroz ⁴⁷
	Cascarilla de cacao y bagazo de caña de azúcar ⁴⁸
	Residuo de la caña de azúcar ⁴⁹
	Pectina de fruta de pitahaya ⁵⁰
	Semilla de aguacate ⁵¹
Bioaceite	Cáscara de yuca ⁵²
	Cáscaras del plátano ⁵³
	Residuo del plátano ⁵⁴
Biofertilizante y Biogás	Residuos de semillas ⁵⁵
	Residuos de la piel de naranja ⁵⁶
Biofertilizante y Biogás	Residuos de alimentos ⁵⁷
	Residuos hortofrutícolas ⁵⁸
	Residuos agrícolas ⁵⁹

Representa una opción futurista para hacer frente a los desafíos globales, asociados con el desarrollo de una economía baja en carbono, para reducir el agotamiento de los recursos no renovables y el cambio climático³³.

Los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de biomasa lignocelulósica, que es la única fuente renovable que contiene carbono e hidrógeno y está disponible en grandes cantidades a un coste relativamente bajo⁶⁰. Su uso reduce los impactos ambientales y representa una fuente alterna al uso de hidrocarburos, para cumplir la demanda energética actual a nivel nacional y mundial^{61,62}.

El bioetanol se puede producir a partir de fermentación, por la acción de microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*⁶³. El biobutanol se produce a través de la fermentación anaeróbica con acetona-butanol-etanol (ABE)^{64,65}. En la actualidad, el biohidrógeno se obtiene por medio de procesos fotosintéticos y fermentativos, haciendo uso de biomasa y bacterias anaeróbicas. Es un proceso que se puede llevar a cabo a temperatura y presión ambiente, lo que lo hace idóneo para la producción a largo plazo^{64,66}. Estos biocombustibles, dada su biodegradabilidad, no toxicidad y estar libres de azufre y aromáticos, presentan ventajas frente al combustible convencional. Emiten menos contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero distintos de los óxidos de nitrógeno^{67,68}.

Los plásticos de base biológica (bioplásticos) son una alternativa a los plásticos derivados de la industria petroquímica debido a su potencial biodegradabilidad y su origen a partir de fuentes renovables⁶⁹. En la actualidad se producen mayoritariamente a partir de residuos industriales y urbanos con alta carga de materia orgánica, aunque también pueden producirse a partir de gases como el CO o el CO₂⁷⁰.

Los biofertilizantes son sustancias que contienen microorganismos vivos que, al ser aplicados a semillas, superficies de plantas o suelo, colonizan la rizósfera o el interior de la planta y promueve su crecimiento aumentando el suministro o la disponibilidad de nutrientes primarios⁷¹.

La producción de biogás es una tecnología bien establecida principalmente para la generación de energía renovable y también para la valorización de residuos orgánicos. El biogás es el producto final de un proceso biológico, la llamada digestión anaeróbica, en el que diferentes microorganismos siguen diversas vías metabólicas para descomponer la materia orgánica⁷².

En general la biomasa lignocelulosa presente en algunos residuos, puede transformarse usando diversas técnicas físicas, térmicas, fisicoquímicas, químicas y biológicas o sus combinaciones⁷³ (figura 1). Se incluyen en este caso procesos como la combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción⁷⁴.

Biorrefinerías de segunda generación

Las biorrefinerías son complejos industriales que usan la biomasa como insumo principal y tienen un concepto de fun-

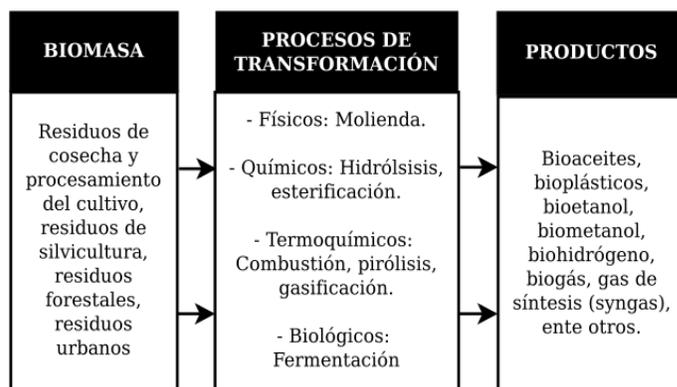


Fig. 1: Procesos de transformación de biomasa.

cionamiento similar a las refinerías de petróleo, donde se producen múltiples productos. Según los procesos separativos las biorrefinerías pueden ser de cuatro tipos: cultivo entero, insumos lignocelulósicos, verdes y plataforma syngas. Otra distinción señala la existencia de biorrefinerías de primera generación, segunda generación e integradas^{75,76}.

Una biorrefinería lignocelulósica es aquella instalación de ingeniería de procesos y biotecnología que se encarga del procesamiento de biomasa lignocelulósica, para la obtención de productos de base biológica⁷⁷. Los procesos de transformación incluyen la recolección y almacenamiento de la biomasa recolectada, pretratamiento y transporte de la biomasa procesada⁷⁸. La conversión bioquímica de biomasa lignocelulósica implica la hidrólisis de carbohidratos en azúcares solubles, seguida de fermentación microbiana o digestión anaeróbica directa con o sin fermentación, mientras que la ruta termoquímica implica combustión directa, pirólisis, gasificación o torrefacción⁷⁹.

Las biorrefinerías de segunda generación (2G) han mostrado gran potencial para convertir desechos lignocelulósicos en combustibles, energía y otros productos de valor agregado. Un ejemplo de ello es la brasileña GranBio, donde se emplean un conjunto de tecnologías (pre-tratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación), para la transformación de residuos de la caña de azúcar en etanol 2G⁸⁰. Por su parte la canadiense Iogen Corporation, utiliza residuos agrícolas para producir biogás como combustible del sector transporte⁸¹. Enerkem, en Canadá, transforma los residuos sólidos urbanos no reciclables y no compostables, a través de un proceso de preparación, gasificación, limpieza de gas de síntesis y conversión catalítica, en etanol para el sector transporte y metanol para aplicaciones químicas^{82,83}. Otro caso es el de Bioliq®, quien emplea biomasa residual (residuos de la agricultura, la silvicultura o el paisajismo), para obtener gas de síntesis y productos químicos, mediante pirólisis rápida y refinación a escala industrial^{82,84}.

Se necesitan procesos avanzados para la transformación de biomasa lignocelulósica en bioproductos, donde el material se fraccione mediante tecnologías respetuosas con el ambiente⁸⁵. Sin embargo, existen diversas barreras por superar y lograr una exitosa operación y rentabilidad⁸⁶.

Latinoamérica como generadora de residuos lignocelulósicos

Latinoamérica es una de las regiones con mayor diversidad biológica y disponibilidad de biomasa en el mundo. Debido a su privilegiada ubicación geográfica cuenta con buen suelo, clima adecuado, tierras disponibles y bajos costos laborales; siendo la combinación perfecta para la producción de bioproductos⁸⁷.

Cada año se generan en LA gran cantidad de productos agrícolas, residuos sólidos forestales y urbanos, con gran potencial de ser convertidos en productos con valor agregado⁸⁸. El proyecto S2Biom estimó que para el año 2030, se necesitará un total de 476 millones de toneladas de biomasa lignocelulósica, para cubrir la demanda de bioproductos requeridos por la sociedad⁷⁹. Aunque se desconoce de la existencia de un registro oficial de las cantidades de residuos disponibles por tipo y por nación, se pueden usar las estimaciones de la FAO para Centroamérica y Suramérica, concernientes a las cantidades de CH₄ que se generan por quema de residuos agrícolas (figura 2).

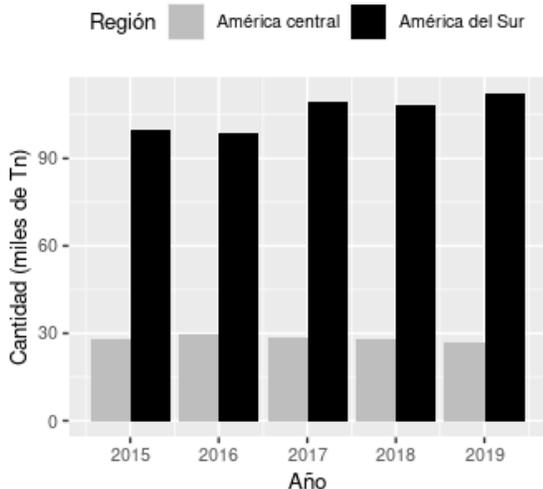


Fig. 2: Emisiones de CH₄ por quema de residuos. Elaborado con información reportada por la FAO⁸⁹

Toda esta biomasa que es quemada, podría ser útil en procesos de biorrefinación. Especialmente en la labor agrícola se generan residuos de diferentes partes del cultivo, que contienen propiedades aprovechables debidas a la presencia de nutrientes y materiales orgánicos en su composición¹⁷.

En los últimos años LA ha registrado un notable crecimiento en la labor agropecuaria, enfocada hacia la sostenibilidad en el ámbito ambiental y las desigualdades socioeconómicas⁸⁵. Así mismo la región registra un aumento en la superficie de tierra cultivable, pasando de 7,21% en el año 2014 a 7,72% en el 2018⁸⁶. Específicamente sudamericana se caracteriza por ser productor de caña de azúcar, arroz, maíz, papa, plátano, banana, naranja y yuca. Otros productos como el aceite de palma y la soya se obtienen solamente en 5 países del área. En el caso de la soya, Brasil y Argentina, son líderes mundiales en este rubro⁹⁰.

El potencial que contienen estos residuos, representa una alternativa prometedora para la producción de nuevos productos de manera sustentable. Sin embargo, un alto rendimiento de transformación de la materia prima y un mínimo costo del residuo, son requisitos básicos para el éxito de la utilización de la biomasa en las biorrefinerías⁹¹.

Pese a que los residuos lignocelulosos han jugado un papel importante en la implementación de una biorrefinería, en el contexto de la bioeconomía circular⁹², es necesaria una cantidad significativa de residuos para alcanzar altos volúmenes de productos en los procesos de producción²⁹. Aunque en LA se han desarrollado e implementado tecnologías de conversión de residuos lignocelulósicos, se necesitan más esfuerzos, tanto en la investigación como a nivel de política de Estado, para lograr tratar los grandes volúmenes de desechos generados en la región y con ello abastecer la demanda regional de bioproductos⁹³.

Conclusiones

Los residuos lignocelulósicos son biomásas constituidas principalmente por celulosa y hemicelulosa, las cuales son fuentes de azúcares capaces de ser transformadas a través de procesos químicos, biotecnológicos o una combinación de ellos, en una variedad de productos que comúnmente se obtienen a partir de recursos fósiles. En los últimos años se han desarrollado biorrefinerías lignocelulósicas y de segunda generación, como industria emergente para el procesamiento de este tipo de recursos. Existen algunos casos de éxito en el mundo, donde se emplean residuos de este tipo para la obtención de productos de 2G. Aunque Latinoamérica es una región privilegiada para la actividad agrícola y, por ende, hay una abundante generación de residuos lignocelulósicos, aún se requieren esfuerzos de investigación, inversión y políticos para su aprovechamiento. El uso adecuado de estos recursos representa una oportunidad para la región, no sólo desde el punto de vista ambiental sino también comercial y de generación de nuevos empleos, si se logra la implementación de biorrefinerías para la producción de productos a gran escala.

Referencias

1. J Sarmiento. Migration for climate change in Colombia: Between environmental refugees and economic migrants. **Rev. Derecho**, **15(2)**, 53–69 (2019).
2. SCot. Influencia de las condiciones de pretratamiento en la gasificación eficiente de biomasa vegetal producción de energía sostenible. Trabajo final de grado de Máster en Química Sostenible. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España (2017).
3. M Chávez, S Salvador, E Salvador. La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. **An. Quím.**, **115(5)**, 399–407 (2019).
4. A Otto, N Mira, E Prem, N Markt, P Illmer. Biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. **Energies**, **11(7)**, 1–14 (2018).
5. BA Goodman. Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. **Journal of Bioresources and Biopro-**

- ducts**, **5(3)**, 143-162 (2020). DOI: 10.1016/j.jobab.2020.07.001.
6. J Fernández-Rodríguez, JA Pérez-Hernández, F González-Águila. Obtención de biocombustible piroleñoso a partir del bagazo de caña de azúcar en una planta experimental cubana. **Rev. Inst. Cubano Deriv. Caña Azucar (ICIDCA)**, **46(2)**, 42-48 (2012).
 7. L Orlandi. Análisis de factibilidad económica de la producción de bioetanolligno-celulósico a partir de una fuente como el rastrojo de maíz y, eventualmente, de sorgo. Trabajo final de grado de Máster en Producción e Industrialización de Cereales y Oleaginosas. Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Lomas de Zamora, Argentina (2017).
 8. A Guarnizo-Franco, PN Martínez-Yepes, ML Pinzón-Bedoya. Azúcares del pseudotallo de plátano: una opción para la obtención de alcohol de segunda generación. **Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas**, **10(1)**, 39-51 (2012).
 9. A González, I Jiménez, M Rodríguez, S Restrepo, J Gómez. Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. **Rev. Ing.**, **1(28)**, 70 (2008).
 10. M Pineda. Dynamics of land use and land cover in a Mexican national park. **Madera y Bosques**, **23(3)**, 87-99 (2017).
 11. Y Vargas, L Pérez. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. **Rev. Fac. Ciencias Básicas**, **14(1)**, 59-72 (2018).
 12. J Vilaboa-Arroniz, J Lopez-Collado, D Platas-Rosado, I Vilaboa-Arroniz. El mito de los biocombustible en México. **Trop. Subtrop. Agroecosystems**, **22**, 431-441 (2019).
 13. C Andrade, A Corredor, L Buitrago, A Lache. Procesos bioquímicos utilizados para la producción de bioetanol, biodiésel y biogás y su estado en Colombia. **Semilleros Formación Investigativa**, **3(1)**, 101-117 (2017).
 14. S Subia, R Rubio. Evaluación de biomasa de microalgas de la laguna Limoncocha como materia prima para la obtención de biocombustibles. **Enfoque UTE**, **9(2)**, 106-116 (2018).
 15. RM Balán-Chan, I. Elizalde-Martínez. Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrottratamiento. **Rev. Int. Investig. Innov. Tecnol.**, **6 (31)**, 1-15 (2017).
 16. D Krasznai, R Champagne, H Roy, P Champagne, M Cunningham. Compositional analysis of lignocellulosic biomass: conventional methodologies and future outlook. **Crit. Rev. Biotechnol.**, **38(2)**, 199-217 (2018).
 17. J Galaz. Efecto de la Temperatura de Operación en Biorreactores de Biogás con Lactosa y Celulosa. Trabajo de grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile (2020).
 18. A Sharma, M Thakur, M Bhattacharya, T Mandal, S Goswami. Commercial application of cellulose nano-composites – A review. **Biotechnology Reports**, **21**, e00316 (2019). DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00316.
 19. J Cai, Y He, X Yu, SW Banks, Y Yang, X Zhang, *et al.* Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **76(1)**, 309-322 (2017).
 20. R Naveda, P Montalvo, L Pinto L,V Figueroa .Remoción de lignina en el pretratamiento de cascarilla de arroz por explosión con vapor. **Rev. Soc. Quim. Perú**, **85 (3)**, 352-361 (2019).
 21. SS Hassan, GA Williams, AKJaiswal. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource-Technology**, **262**, 310-318 (2018). DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.099.
 22. J Vera, R Zambrano. Evaluación físico-química de los residuos del procesamiento de yuca (*Manihotesculenta*) y plátano (*Musa paradisiaca*) para la obtención de bioplástico. Trabajo de grado. Unversidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador (2021).
 23. L Tejada, W Marimón, M Medina. Evaluación del potencial de las cáscaras de frutas en la obtención de bioetanol. **Hechos Microbiol.**, **5(1)**, 4-9 (2014)
 24. I Ramos. Caracterización química de tres residuos lignocelulósicos generados en la región del Cantón Alausí. **Rev. Inst. Investig. Fac. Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas**, **20(40)**, 80-85 (2017)
 25. LV Valle Alvarez, J Kreiker, B Raggiotti, F Cadena. Aprovechamiento de desechos lignocelulósicos derivados de la producción industrial de aceite de palma en el desarrollo de materiales compuestos. En: AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN V Jornada de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorados en Ingeniería. 2019. DOI: 10.33414/ajea.4.393.2019 Consultado: 10/12/2021
 26. I Chico. Caracterización del material compuesto Raquis-Cemento. Trabajo de grado. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia (2015).
 27. L Niño López, A Acosta Cardenas, R Gelves Zambrano. Evaluación de pre-tratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (*Manihote sculentaCrantz*). **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, **69**, 317-326 (2013)
 28. JG Reales, HI Castaño, JE Zapata. Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico sobre la Deslignificación de Tallos de Yuca. **Información tecnológica**, **27(3)**, 11-22 (2016).
 29. D Torres Jaramillo, SP Morales Vélez, JC Quintero Díaz. Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**, **25(4)**, 733-743 (2017).
 30. C Natagaima. Obtención de celulosa a partir de residuos de la poda de pasto común por medio de líquido iónico (cloruro de 1-butil-3-metilimidazolio). Trabajo de grado. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia (2018).
 31. R Potumarthi, RR Baadhe, S Bhattacharya S. Fermentable Sugars from Lignocellulosic Biomass: Technical Challenges. En: *Biofuel Technologies*. Eds. V Gupta y M Tuohy. Springer, Berlin. (2013). DOI: 10.1007/978-3-642-34519-7_1
 32. J Sigüencia, J Delgado, F Posso, J Sánchez. Estimación del potencial de producción de bioetanol para los residuos de la corteza del cacao en Ecuador. **Rev. Cienc. Tecnol. Agropec.**, **21(3)**, 1-20 (2020).
 33. S Dahiya, R Katakajwala, S Ramakrishna, S Venkata. Bio-based products and life cycle assessment in the context of circular economy and sustainability. **Mater. Circ. Econ.**, **2, 7** (2020). DOI: 10.1007/s42824-020-00007-x

34. J Ventura, MA Santiago, IC Barrera, P Álvarez, P Carrillo, JA Honorato. Caracterización del pasto mombaza como materia prima para producir bioetanol. **Rev. Mex. Ciencias Agric.**, **12(2)**, 235-246 (2021).
35. A Segura, A Manriquez, D Santos, E Ambriz, P Casas, A Serafín. Obtención de bioetanol a partir de residuos de cáscara de piña (*Ananas comosus*). **Jóvenes en la Ciencia**, **8**, 1–8 (2020).
36. S Prasad, S Kumar, K Kumar, J Choudhry, H Kamyab, QV Bach, *et al.* Screening and evaluation of cellulytic fungal strains for saccharification and bioethanol production from rice residue. **Energy**, **190**, 116422 (2020).
37. A Arumugam, V Malolan, V Ponnusami. Contemporary Pretreatment Strategies for Bioethanol Production from Corn-cobs: A Comprehensive Review. **Waste and Biomass Valor**, **12**, 577–612 (2021).
38. S Sivamani, R Baskar, APChandrasekaran. Response surface optimization of acid pretreatment of cassava stem for bioethanol production. **Environ. Prog. Sustain. Energy**, **39**, e13335 (2020).
39. X Lin, Y Liu, X Zheng, N Qureshi. High-efficient cellulosic butanol production from deep eutectic solvent pretreated corn stover without detoxification. **Ind. Crops Prod.**, **162**, 113258 (2021).
40. P Narueworanon, L Laopaiboon, P Laopaiboon. Capability of immobilized *Clostridium beijerinckii* TISTR 1461 on lotus stalk pieces to produce butanol from sugarcane molasses. **Processes**, **9(4)**, 573 (2021). DOI: [10.3390/pr9040573](https://doi.org/10.3390/pr9040573)
41. PM Melero-Carrizosa, RB García-Reyes, MM Atilano-Camino, A García-González. Obtención de biohidrógeno a partir de cáscaras de naranja y plátano mediante fermentación oscura con *Clostridium beijerinckii*. En: *VII Simposio Nacional de Ciencias Farmacéuticas y Biomedicina y el V Simposio Nacional de Microbiología Aplicada*. 2020. Disponible en: <https://rcfb.uanl.mx/index.php/rcfb/article/view/350> Consultado: 10/12/2021
42. F Nadeem, D Jiang, N Tahir, M Alam, Z Zhang, W Yi, *et al.* Defect engineering in SnO₂ nanomaterials: Pathway to enhance the biohydrogen production from agricultural residue of corn stover. **Appl. Mater. Today**, **21**, 100850 (2020).
43. R Mahato, D Kumar, G Rajagopalan. Biohydrogen production from fruit waste by *Clostridium* strain BOH3. **Renew. Energy**, **153**, 1368–1377 (2020).
44. K Im-Orb, ANPhan, AArpornwichanop. Bio-methanol production from oil palm residues: A thermodynamic analysis. **Energy Conversion Management**, **226**, 113493 (2020).
45. SR Naqvi, I Ali, S Nasir, SA Ammar, AE Atabani, WH Chen. Assessment of agro-industrial residues for bioenergy potential by investigating thermo-kinetic behavior in a slow pyrolysis process. **Fuel**, **278**, 118259 (2020).
46. HJPL de Souza, MD Chaves, G Baptista, CR Andrade, AC Oliveira, DPL de Souza, *et al.* Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. **Renew. Energy**, **149**, 128–140 (2020).
47. KH Chang, KR Lou, CH Ko. Potential of bioenergy production from biomass wastes of rice paddies and forest sectors in Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, **206**, 460-476 (2019).
48. SNHM Azmin, NABM Hayat, MS Mat. Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, **5(4)**, 248–255 (2020). DOI: [10.1016/j.jobab.2020.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.10.003)
49. LC de Azevedo, R Suzimara, S Jonnatan, D Djalma, N Sandi, O Fábio, *et al.* Biodegradable Films Derived from Corn and Potato Starch and Study of the Effect of Silicate Extracted from Sugarcane Waste Ash. **ACS Appl. Polym. Mater.**, **2(6)**, 2160–2169 (2020). DOI: [10.1021/acsapm.0c00124](https://doi.org/10.1021/acsapm.0c00124). s001
50. R Listyarini, P Susilawati, E Nukung, M Yua. Bioplastic from Pectin of Dragon Fruit (*Hylocereus polyrhizus*) Peel. **J. Kim. Sains dan Apl.**, **23(6)**, 203–208 (2020).
51. H Sánchez, W Ponce, B Brito, W Viera, R Baquerizo, M Riera. Biofilms Production from Avocado Waste. **Ingeniería y Universidad**, **25**, 1-16 (2021).
52. Maulida, M Siagian, P Tarigan. Production of Starch Based Bioplastic from Cassava Peel Reinforced with Microcrystalline Cellulose Avicel PH101 Using Sorbitol as Plasticizer. **J. Phys. Conf. Ser.**, **710**, 012012 (2016). DOI: [10.1088/1742-6596/710/1/012012](https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012012)
53. N Azieyanti, AAmirul, S Othman, H Misran. Mechanical and Morphology Studies of Bioplastic-Based Banana Peels. **J. Phys. Conf. Ser.**, **1529(3)**, 32–50 (2020).
54. AGAdeniyi, JOIghalo, MKAmosa. Modelling and simulation of banana (*Musa spp.*) waste pyrolysis for bio-oil production. **Biofuels**, **12(7)**, 879-883 (2019).
55. M Oladipupo, A Achazhiyath, K Rambabu, G Bharath, F Banat, GS Nirmala, *et al.* Extraction, characterization and optimization of high quality bio-oil derived from waste date seeds. **Chemical Engineering Communications**, **208(6)**, 801–811 (2021).
56. D Aboagye, N Banadda, N Kiggundu, I Kabenge. Assessment of orange peel waste availability in Ghana and potential bio-oil yield using fast pyrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **70(C)**, 814–821 (2017).
57. Y Ma, Y Yin, Y Liu. New insights into co-digestion of activated sludge and food waste: Biogas versus biofertilizer. **Bioresour. Technol.**, **241**, 448–453 (2017).
58. I Chakravarty, SAMandavgane. Valorization of fruit and vegetable waste for biofertilizer and biogas. **J. Food Process Eng.**, **44**, e13512 (2021).
59. S Achinas, GJWEuverink. Elevated biogas production from the anaerobic co-digestion of farmhouse waste: Insight into the process performance and kinetics. **Waste Manag. Res.**, **37(12)**, 1240–1249 (2019).
60. JM Campos-Martín, A Chica, ME Domine, T García, B Pawelec, JL Pinilla, *et al.* Biocombustibles. **Boletín del Grupo Español del Carbón**, **58**, 38–44 (2020).
61. L Santos, F Ramos. Analytical strategies for the detection and quantification of antibiotic residues in aquaculture fishes: A review. **Trends in Food Science and Technology**, **52**, 16–30

- (2016).
62. M Garrido. Biocombustibles y producción de biohidrógeno. **MoleQla: Rev. de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide**, **38**, 26-30 (2020).
 63. M Balat, H Balat, C Öz. Progress in bioethanol processing. **Prog. Energy Combust. Sci.**, **34(5)**, 551–573 (2008).
 64. M Ibrahim, N Ramli, E Kamal, S Abd-Aziz. Cellulosic biobutanol by Clostridia: Challenges and improvements. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, **79**, 1241–1254 (2017).
 65. TY Tsai, YC Loa, CD Dong, D Nagarajan, JS Chang, DJ Lee. Biobutanol production from lignocellulosic biomass using immobilized Clostridium acetobutylicum. **Appl. Energy**, **277(1)**, 1115531 (2020).
 66. Preethi, TM Mohamed, J Rajesh, M Gunasekaran, G Kumar. Biohydrogen production from industrial wastewater: An overview. **Bioresour. Technol. Reports**, **7**, 100287 (2019).
 67. SN Gebremariam, JM Marchetti. Economics of biodiesel production: Review. **Energy Convers. Manag.**, **168**, 74–84 (2018).
 68. ST Keera, SM El Sabagh, AR Taman. Castor oil biodiesel production and optimization. **Egypt. J. Pet.**, **27(4)**, 979–984 (2018).
 69. A Prieto. Los bioplásticos, ¿qué son? ¿cuántos hay? ¿cómo se producen? **Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB)** (2020). DOI: 10.18567/sebbmdiv_ANC.2020.08.1
 70. M Alcaide, C Collado, J Sancho. Bioplástico degradable. **Ingeniería Materiales**, **2**, 9–13 (2020). Disponible en: http://polired.upm.es/index.php/ingenia_materiales/article/view/4424/4599
 71. M Quiroga, D Agüero, R Zapata, H Busilacchi, M Bueno. Acti- vadores de crecimiento y biofertilizante como alternativa al uso de fertilizantes químicos en cultivo de chíá (*Salvia hispanica* L.). **Energías Renovables y Medio Ambiente**, **35(1)**, 31–40 (2020).
 72. N Scarlat, JFDallemand, F Fahl. Biogas: developments and perspectives in Europe. **Renew. Energy**, **129(A)**, 457–472 (2018).
 73. L Mezule, B Dalecka, T Juhna. Fermentable Sugar Production from Lignocellulosic Waste. **Chemical Engineering Transactions**, **43**, 619-624 (2015).
 74. A Parra, ES Cajiao, AR Cerón, HS Villada. Efecto del método de pre-gelatinización de harina de yuca sobre propiedades mecánicas de matrices moldeada. **Agronomía Colombiana**, **34(1)**, S89-S91 (2020).
 75. E Trigo, M Regúnaga, M Aquaroni, F Giménez, J Peña. Biorrefinerías en la República Argentina: análisis del mercado potencial para las principales cadenas de valor. MINCYT, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina (2012).
 76. R Salazar, G Cárdenas. La bioeconomía y las biorrefinerías. **Avance Agroindustrial**, **34(3)**, 3134 (2013).
 77. MS Romano, V Corne, R Azario, MC García. Aprovechamiento de residuos lignocelulosico para la remoción de cadmio. **Avances en Ciencias e Ingeniería**, **11(3)**, 11-22 (2020).
 78. SS Hassan, GA Williams, AKJaiswal. Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects. **Trends in Biotechnology**, **37(3)**, 231–234 (2019).
 79. SS Hassan, GA Williams, AKJaiswal. Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **101**, 590–599 (2019).
 80. <http://www.granbio.com.br/en/conteudos/biofuels/> Consultado: 11/12/2021
 81. <https://www.iogen.ca/iogen-technology>. Consultado: 11/12/2021
 82. F Gírio, S Marques, F Pinto, AC Oliveira, P Costa, A Reis, et al. Biorefineries in the World. En: *Biorefineries*. Eds. M Rabaçal, A Ferreira, C Silva, M Costa. Lecture Notes in Energy, vol 57. Springer, Cham. (2017) DOI: 10.1007/978-3-319-48288-0_9
 83. <https://enerkem.com/company/facilities-projects/> Consultado: 11/12/2021
 84. <https://www.bioliq.de/english/55.php> Consultado: 11/12/2021
 85. M Rizo. Agricultura, desarrollo sostenible, medioambiente, saber campesino y universidad. **Ciencia en su PC**, **2**, 106–120 (2017).
 86. Banco Mundial. Tierras cultivables (% del área de tierra) – Latin America & Caribbean (2021). Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.ARBL.ZS?locations=ZJ> Consultado: 06/12/2021
 87. RJanssen, DDRutz. Sustainability of biofuels in Latin America: Risks and opportunities. **Energy Policy**, **39(10)**, 5717-5725 (2011). DOI: 10.1016/j.enpol.2011.01.047
 88. RD Silva-Martínez, ASanches-Pereira. Organic waste to energy in Latin America and the Caribbean (Lac); state-of-the-art literature review. En: *26th European Biomass Conference and Exhibition*. 2018:14-17. Disponible en: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/171299> Consultado: 11/12/2021
 89. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/GT> Consultado: 11/12/2021
 90. M Stojanovic. Biomimicry in Agriculture: Is the Ecological System-Design Model the Future Agricultural Paradigm? **J. Agric. Environ. Ethics**, **32**, 789–804 (2019).
 91. AK Chandel, VK Garlapati, AK Singh, FAF Antunes, SS da Silva. The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. **Biore-source Technology**, **264**, 370–381 (2018).
 92. MA Osejos-Merino, JJ Jaramillo-Véliz, MV Merino-Conforme, AJ Quimis-Gómez, JL Alcívar-Cobena. Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la Granja EMAVIMA Jipijapa – Ecuador. **Dominio de Ciencia**, **4(1)**, 709–733 (2018).
 93. RD Silva-Martínez, A Sanches-Pereira, W Ortiz, MF Gómez, S Teixeira. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. **Renewable Energy**, **156**, 509-525 (2020).