



Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles

Evaluation of agro-industrial waste for biofuel potential

Silvia Johana Delgado Alvarado¹, Glenda Jelissa Zambrano Maldonado²,
Gabriel Alfonso Burgos Briones³, Carlos A. Moreira-Mendoza⁴

¹ Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Ecuador. sdelgado3499@utm.edu.ec <https://orcid.org/0009-0009-4882-0618>

² Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Ecuador. gzambrano0770@utm.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-9069-2703>

³ Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Ecuador. gabriel.burgos@utm.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-1291-4083>

⁴ Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Ecuador. carlos.moreira@utm.edu.ec <https://orcid.org/0000-0001-5980-0713>

DOI <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4140>

Recibido: 3 de diciembre de 2022

Aceptado: 21 de junio de 2023

Resumen

La generación de residuos agroindustriales en los diferentes procesos y etapas se ha vuelto una problemática a nivel mundial debido a que en la mayoría de los casos no son procesados o manipulados de manera adecuada. Estos poseen un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos o ya sea para aportar valor agregado a los productos originales. Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre evaluación de los residuos agroindustriales de distintas naturalezas para su potencial uso como materia prima en la elaboración de biocombustibles por medio de tratamientos termoquímicos. La investigación es de carácter exploratoria descriptiva mediante recopilación de literatura científica de revistas indexadas de calidad y confiabilidad. La búsqueda incluyó publicaciones acerca del uso dado a los residuos de origen agroindustrial en la prevención e intervención de posibles impactos negativos y tratamientos termoquímicos como la pirólisis, gasificación, combustión e hidrolícuefacción. El objetivo es fundamentar que los residuos agroindustriales tienen excelentes

propiedades para la producción de biodiesel. Se identificó como una de las categorías más importantes a la obtención de bioenergéticos (bioetanol, biodiesel, biogás, biomasa energética), El aprovechamiento de estos residuos, se ha convertido en un tema de gran interés por los diversos beneficios ambientales y económicos obtenidos, que promueve un desarrollo sostenible.

Palabras clave: Biocombustible; biomasa agroindustriales; pirólisis; hidrolícuación; gasificación.

Abstract

The amount of agro-industrial waste generated during various stages and processes has become a global problem because it is often not processed or appropriately handled. However, these residues have great potential to be used in other processes, such as creating new products or adding value to existing ones. This article reviews various publications evaluating agro-industrial waste for use as raw materials in producing biofuels using thermochemical treatments. This is a descriptive-exploratory study of scientific literature review sourced by reliable and high-quality journals. The review covers topics such as preventing and mitigating adverse impacts and using pyrolysis, gasification, combustion, and hydro-liquefaction. The objective is to demonstrate that agro-industrial waste has excellent properties for biodiesel production. Among the most important categories identified in the literature review was bioenergy production, including bioethanol, biodiesel, biogas, and biomass energy. Utilizing these wastes has become an area of great interest due to the environmental and economic benefits that promote sustainable development.

Keywords: Biofuel; agroindustrial biomasses; pyrolysis; hydro-liquefaction; gasification.

Introducción

La bioenergía se define como la manera de generar energía a partir de biomasa: materia viva o derivada de seres vivos es generada por los biocombustibles. Algunos residuos agroindustriales presentan un gran potencial para producir bioenergía a partir de biocombustibles como la biomasa energética, el bioetanol, el biodiesel, entre otros, e incluyen un rango amplio de productos que a su vez se han dividido en diferentes tipos de combustible. Los residuos agrícolas y pecuarios, la leña y residuos municipales son biomasa sólidas, que se gasifican para producir calor y electricidad. Los líquidos que utilizan cultivos energéticos (caña de azúcar, oleaginosas, higuera, palma de aceite y coco) sirven para producir etanol y biodiesel (González Ávila, 2009). En este sentido, los biocombustibles (bioenergéticos) son combustibles renovables producidos directa o indirectamente a partir de biomasa, es decir, materiales no fósiles de origen biológico, como la leña, el abono animal, el carbón vegetal, el biogás, el biohidrógeno, el bioalcohol, la biomasa microbiana, los desechos agrícolas y forestales y sus subproductos, los cultivos energéticos y otros (FAO, 2013).

La biomasa de origen agroindustrial es una fuente de energía renovable que se obtiene a partir de residuos de la producción agrícola y de la industria alimentaria. Algunos ejemplos de biomasa de origen agroindustrial incluyen:

- Residuos de la producción de alimentos: estos incluyen cáscaras de frutas y verduras, cascara de arroz, bagazo de caña de azúcar, etc.
- Residuos de la industria alimentaria: estos incluyen cáscara de huevos, huesos, grasa y aceites usados, etc.
- Residuos de la producción de productos de papel y cartón: estos incluyen pulpa de madera, papel y cartón usados, etc.
- Residuos de la producción de productos textiles: estos incluyen fibras naturales como algodón, lana, etc.

La biomasa de origen agroindustrial es una fuente de energía alternativa interesante porque se puede obtener a partir de residuos que de otra manera podrían ir a parar a vertederos o ser quemados, lo que contribuye a reducir la cantidad de basura y a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, algunos tipos de biomasa de origen agroindustrial, como el bagazo de caña de azúcar, pueden ser cultivados específicamente para uso energético, lo que puede tener beneficios económicos para los productores agrícolas. Actualmente casi la totalidad de la energía es proporcionada por fuentes fósiles que incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global y cambio climático, estas emisiones se pueden reducir con el uso de energía renovable (Rivas Lucero et al., 2012).

A nivel mundial existe una capacidad instalada de 100,879 (MW) para generar energía eléctrica a partir de biomasa, donde Estados Unidos, Brasil, China y Alemania concentran el 48% del total mundial. Creutzig et al. (2015) estimaron que el potencial energético de la biomasa con fines energéticos se sitúa entre los 100 y 300 Exajoules·año⁻¹. De acuerdo con lo reportado por Demirbas (2008), la energía de la biomasa contribuirá con la mitad de la energía demandada en países en desarrollo en 2050.

A principios de 2015, como ejemplo del uso de energías limpias México contó con 16,67 MW de capacidad instalada de generación eléctrica basada en energías sustentables, donde la bioenergía tenía una capacidad instalada en operación de 647 MW, de los cuales 586 MW provenientes de bagazo de caña y 61 MW de biogás. La energía de biomasa tiene un potencial de 2635 a 3771 PJ·año⁻¹, donde el potencial para biogás es de 35 a 305 PJ·año⁻¹ en residuos municipales y de 148-190 PJ año⁻¹ en residuos ganaderos, sin embargo, el potencial de este tipo de energía no se ha explotado en su totalidad (Alemán-Nava et al., 2014).

Los biocombustibles más usados son biodiesel, bioetanol, biogás. El biogás es un combustible de densidad de 1,133 kg/m³ y de mediano contenido energético (22 MJ/m³ de biogás), esto significa una producción aproximada de 6,35 kWh de corriente eléctrica por metro cúbico; este gas se compone aproximadamente de 55% metano (CH₄) y 45% dióxido de carbono(CO₂), además, trazas de otros contaminantes (León et al., 2019).

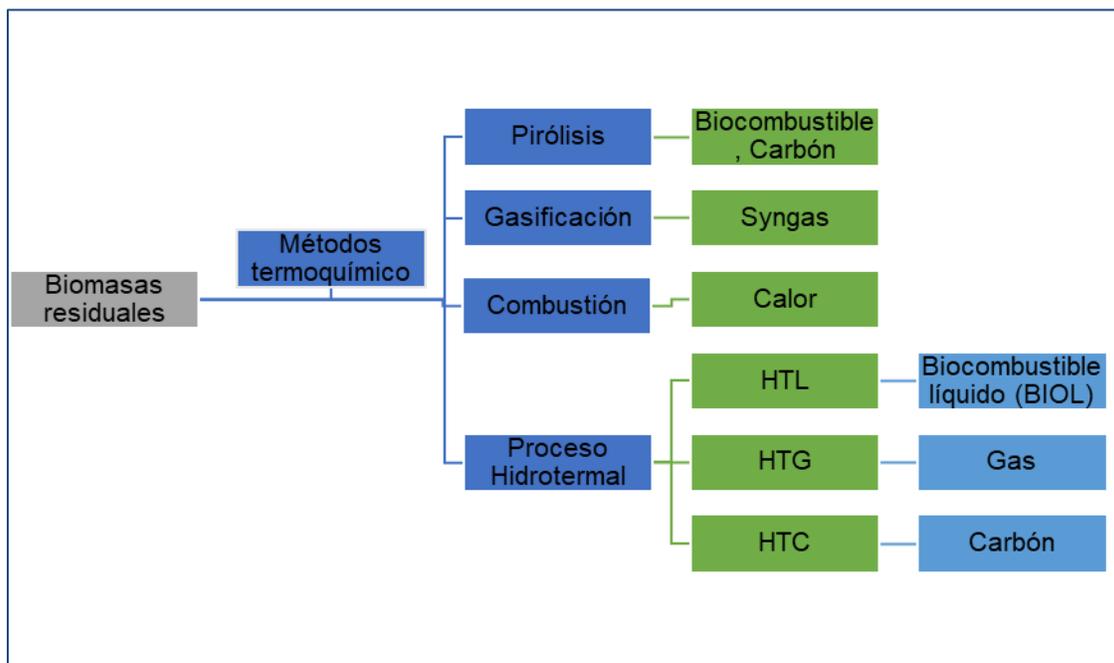
El biodiésel tiene un menor contenido energético que el diésel fósil, lo cual implica que se requiere un mayor volumen de biodiésel para recorrer la misma distancia. Algunos estudios han reportado que empleando mezclas con un máximo de 10% en volumen de biodiésel no se observa una modificación importante en el desempeño del motor (Gutiérrez-Antonio et al., 2017).

Por medio del proceso de índole documental se basó en brindar un análisis las biomásas con un potencial uso como biocombustible, desde el punto de vista global en base a la disponibilidad de los recursos fósiles y la emisión de los contaminantes, surge un problema enfocado sobre la falta de aprovechamiento de los residuos agroindustriales en la producción de biocompuestos con alto potencial energético. Para lo cual se estableció como objetivo el evaluar los residuos agroindustriales con alto potencial para biocombustibles, por medio de la realización de un estudio documental dentro del cual se justifica el estudio donde se evidenció las potencialidades de los diversos residuos de origen agroindustriales para la producción de biocombustibles por medio de procesos térmicos.

En la Figura 1, se representan varias técnicas convencionales y modernas utilizadas para convertir diferentes biomásas en combustibles o productos de valor añadido como lo es la conversión termoquímica de biomasa utilizando calor que implican la conversión de biomasa en productos gaseosos, residuos sólidos y biocrudos. Los métodos termoquímicos pueden ser proceso seco o proceso húmedo. En el proceso húmedo, la biomasa de algas no secada o la suspensión de cultivo se utilizan para evitar el proceso de secado que consume mucha energía, mientras que, en el proceso seco, se utiliza polvo de algas deshidratado o seco. El proceso seco incluye torrefacción, pirólisis, gasificación y el proceso húmedo incluye HTG, HTC y HTL (López, y otros, 2016).

Figura 1

Procesos termoquímicos para tratamiento de biomásas



Metodología

La investigación es de carácter analítico-descriptivo y se centra en describir las tecnologías para la conversión de los residuos y desechos de biomasa en biocombustibles, concretamente en sus conceptos tecnológicos y resultados obtenidos de investigaciones previas. Se detallan las técnicas de conversión termoquímica (gasificación, licuefacción, pirólisis y combustión). Se discute la transesterificación, que parece ser la ruta más simple y económica para producir biodiesel en grandes cantidades.

Se identificaron estudios elaborados con las palabras claves: “procesos hidrotermales de biomásas”, “biomásas de origen agroindustrial”, “pirólisis”, “gasificación” y “combustión”. Luego de la búsqueda, se identificaron 35 artículos científicos publicados entre los años 2005 a 2023, tal como se muestran en la Tabla 1, y que estuviesen en al menos una de las siguientes bases de datos multidisciplinares o especializadas: Scopus, ScienceDirect, Science Gate, Latindex o Google

Scholar. Se tomó en cuenta que los autores hayan publicado como parte de sus resultados el rendimiento y los factores que influyen en los procesos termoquímicos para la producción de biocrudos.

Tabla 1

Número de publicaciones seleccionadas por rango de años

Rango	2005-2009	2010-2013	2014-2018	2019-2023	Total
Número de publicaciones consultados	5	6	15	9	35

De las publicaciones consultadas, 27 artículos fueron publicados en revista indexadas en Scopus, y 8 artículos en revistas en las bases de datos de ScienceDirect, Science Gate, Latindex o Google Scholar.

Resultados

Residuos utilizados en la producción de biocombustibles

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 (Mejías-Brizuela et al., 2016).

La agroindustria tiene la capacidad de fomentar el desarrollo económico, social y ambiental global, siempre y cuando mantenga el equilibrio entre la actividad desarrollada y la protección del medio ambiente en cada uno de sus procesos, desde la manipulación de la materia prima hasta la distribución y disposición final de los subproductos o residuos generados.

Una parte de la biomasa residual, como la paja de trigo y lino, rastrojo de maíz, tallos de algodón y hojas de caña de azúcar, debe ser incorporada al suelo para mantener las condiciones de fertilidad y textura en niveles adecuados. Otra parte puede ser destinada a su utilización energética, aunque debido a que la explotación agrícola tradicional en nuestro país es de tipo extensivo, la recolección de los residuos se encarece demasiado, quitándole valor económico. Además, su densidad es muy baja, lo que obliga a movilizar grandes volúmenes, y recurrir a procesos de densificación para su posterior conversión en energía útil (Avérous, Naceur Belgacem, & Gandini, 2008).

Por lo general las materias primas de origen lignocelulósico contienen elevadas concentraciones de Carbono (C) y Oxígeno (O) , y una baja concentración de Hidrogeno (H), algunas biomazas como las algas y biomazas de origen lipídicos contienen elevadas concentraciones de Nitrógeno (N) y Azufre (S) lo cual constituye grandes desafíos la eliminación de estos compuestos en el tratamiento térmico para la obtención de biocombustibles. En la Tabla 2, se representan algunos valores de los análisis elementales realizado a varias biomazas por diferentes autores.

Entre los principales biocombustibles se encuentran el bioetanol, biodiesel y biogás, que contribuyen significativamente en la disminución de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), ya que el CO₂ producido durante la obtención de los biocombustibles es teóricamente consumido por la biomasa durante su crecimiento.

Tabla 2

Análisis elemental biomásas agroindustriales

Materias Primas	C (% wt)	H (% wt)	O (% wt)	N (% wt)	Referencia
Algas de agua de estanques	46.09	6.22	37.35	9.70	(Nautiyal et al., 2014)
Tallo de maíz	46.9	6.2	41.9	1.2	(Oliveira et al., 2013)
Estiércol de aves de corral	46.8	6.3	30.1	1.3	(Oliveira et al., 2013)
Paja seca	46.8	6.0	42	0.4	(Oliveira et al., 2013)
Astillas de madera	46.2	5.6	37.6	0.7	(Oliveira et al., 2013)
Bagazo de caña de azúcar	44.9	5.9	48.97	0.94	(Varma & Mondal, 2017)
Cáscara de arroz	45.09	6.62	47.78	0.50	(Fermanelli et al., 2020a)
Cáscara de maní	46.09	6.86	41.32	1.18	(Fermanelli et al., 2020a)
Paja de trigo	46.9	7.28	47.02	2.50	(Fermanelli et al., 2020a)

Como materiales en estado sólido o líquido obtenidos a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero sí se pueden aprovechar o transformar para obtener otro producto con valor económico, comercial o social. Cada subsector de la agroindustria genera residuos específicos. En su mayoría, estos presentan características óptimas para su aprovechamiento en otra cadena de producción o como alternativa de tratamiento o recuperación de algún medio contaminado (Rivas Lucero et al., 2012).

Para evaluar el uso de los residuos agroindustriales como combustible, es preciso conocer, particularmente, las propiedades de esta fuente de energía, cabe resaltar que, desde el punto de vista energético, una de las principales características de los biocombustibles es el HHV MJ·kg⁻¹, las características o composición química y biológica de los residuos agroindustriales dependen del proceso de transformación y de la materia prima utilizada. Sin embargo, los residuos agroindustriales son materiales lignocelulósicos; es decir, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina representan sus mayores porcentajes de composición (Ramirez-Cortina et al., 2012). El biodiesel es el producto de la transesterificación que se da a partir de la reacción química entre los ácidos grasos provenientes de una gran variedad de cultivos oleaginosos, así como de grasas

animales y de aceites y grasas recicladas. Sin embargo, se obtiene principalmente de alcoholes como el metanol o el etanol y aceites vegetales (J-Montoya & R-Ximhai, 2010).

Tratamientos termoquímicos de biomasas

Pirólisis

La pirólisis es uno de los procesos termoquímicos que ha recibido la mayor atención porque ofrece un método prometedor para convertir diversas formas de biomasa en combustibles y productos químicos a través de la degradación térmica de moléculas orgánicas en ausencia de oxígeno. Los materiales orgánicos se pirolizan para producir tres productos principales: carbono sólido (biochar), Biocombustible líquido (biol) y volátiles no condensables (syngas). El proceso se basa en varios factores, como la temperatura, el tiempo de reacción, la velocidad de calentamiento, la presión, la composición de la materia prima y el contenido de humedad, lo que afecta la eficiencia de las reacciones y el rendimiento de distribución del producto. La degradación de los componentes críticos de la biomasa, como los enlaces de hidrógeno y oxígeno, se produce dentro de un rango de temperatura de 350-800 °C (Osman et al., 2023).

En el proceso de pirólisis de biomasas agroindustriales de cáscara de arroz, cáscara de maní y paja de trigo fue estudiado por (Fermanelli et al., 2020b), quienes evaluaron el efecto de la temperatura de pirólisis sobre los rendimientos en peso de fracciones sólidas (biocarbón), líquidas (bioaceite) y gas (biogás) para cada biomasa, en el rango de 350-650 °C. El rendimiento máximo de bio-oil lo obtuvo a 550 °C para la cáscara de arroz (45 % en peso) y la paja de trigo (58 % en peso), y a 500 °C para las cáscaras de cacahuete (51 % en peso). Los valores de HHV 3890-7250-5580 kcal·kg⁻¹ respectivamente. Los rendimientos de los bioaceites de copirólisis variaron entre 41 y 46 % en peso para todas las mezclas. El contenido de agua de Biol disminuyó hasta un 15% para la cáscara de arroz mezclada con cáscara de maní o paja de trigo. Además, se detectó 5-HMF en todos los bioaceites, y la selectividad furfural fue superior al 5% en las tres mezclas investigadas.

Gasificación

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en el que la biomasa sólida se trata con una cantidad limitada de medio gasificante para convertirla en gases valiosos como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2) y un residuo sólido denominado carbón. Los gases se pueden convertir en combustibles líquidos a través del proceso Fischer-Tropsch o calor y energía para unidades de generación de energía (Okolie et al., 2019),(Molino et al., 2018). El medio gasificante podría ser un gas como el aire, el oxígeno o el agua supercrítica (SCW). El principal obstáculo enfrentado en el proceso de gasificación es la formación de alquitrán, que es difícil de purificar y disminuye el rendimiento de H_2 (Mishra & Upadhyay, 2021). Se utilizó plasma térmico extremadamente caliente para la gasificación de biomasa (aserrín de abeto, pellets de madera) y residuos (residuos plásticos, aceite de pirólisis).

Hlina et al (2014) estudiaron cuatro biomásas diferentes (aserrín de madera, pellets de madera, plástico de desecho y aceite de pirólisis de neumáticos de desecho) en un plasma de arco eléctrico DC, con una potencia de entrada de antorcha de 100-110 kW y una pequeña cantidad de argón con H_2 . El vapor de Oxígeno se utilizó como gas de plasma con CO_2 o H_2O vapor como medio oxidante. Gas de síntesis de alta calidad comprende 90 % volumen entre el H_2 y CO para los cuatro tipos de biomásas. A pesar de tener un alto contenido de calor de los gases de salida registrados para todos los conjuntos de datos, la eficiencia del proceso es baja debido a la alta entrada de electricidad, que es en gran medida el factor limitante de esta tecnología (Sikarwar et al., 2016).

Combustión

La combustión generalmente se considera el enfoque más rentable para la utilización de biomasa por parte de la industria eléctrica. Originalmente, la co-combustión (combustión combinada de varios combustibles, generalmente carbón y biomasa en una misma caldera) se introdujo como un medio para que las empresas de servicios públicos logaran los siguientes

objetivos de apoyar el desarrollo económico de los productos madereros y las industrias agrícolas en una zona de servicio determinada, reducir las emisiones de CO₂ fósil y reducir otras emisiones en el aire, incluidos los óxidos de nitrógeno (NO_x) y metales traza, proporcionar un medio para la transición a una base más amplia de suministros de biocombustibles mediante el desarrollo de apoyo infraestructural para el suministro y la entrega de combustible (Tillman, 2000).

Hidrolícuefacción

La hidrolícuefacción de biomásas residuales es una técnica de transformación de residuos orgánicos en biocombustibles líquidos. Se trata de un proceso de conversión térmica que implica la hidrólisis de la biomasa residual y la posterior licuefacción de los productos resultantes con el fin de obtener una solución líquida que pueda ser utilizada como biocombustible (Elliott et al., 2015).

La hidrolícuefacción tiene varias ventajas sobre otros procesos de producción de biocombustibles a partir de biomásas residuales (Hao et al., 2021). En primer lugar es un proceso más eficiente en términos de energía, ya que permite obtener un mayor rendimiento energético a partir de la biomasa residual. Además, el biocombustible obtenido mediante hidrolícuefacción es más limpio y menos contaminante que otros combustibles fósiles, ya que su producción genera menos emisiones de gases de efecto invernadero.

Otra ventaja de la hidrolícuefacción es que permite la utilización de una amplia gama de biomásas residuales como materia prima, incluyendo residuos agrícolas, forestales y urbanos. Esto es especialmente importante dado que la producción de biocombustibles a partir de biomásas residuales puede contribuir a reducir la cantidad de residuos orgánicos que se envían a vertedero y a promover un uso más sostenible de los recursos naturales.

No obstante, la hidrolícuefacción también presenta algunos desafíos. Uno de ellos es el alto costo de instalación y operación de las plantas de producción de biocombustibles mediante este proceso. Además, la obtención de biocombustibles mediante hidrolícuefacción puede requerir la

adición de ciertos productos químicos durante el proceso, lo que puede aumentar el costo y la complejidad del proceso.

Yuan et al. (2017) investigaron la producción de bio-aceite a partir de la licuefacción de la paja de arroz en presencia de etanol-agua y mezcla de 2-propanol-agua, Alcanzando un rendimiento máximo de bio-oil del 39,7% en peso utilizando 2-propanol con una relación v/v de agua de 5:5 a 300 °C. Cao et al. (2016) informaron que el rendimiento del bio-aceite aumentó notablemente cuando se usó agua de glicerol como cosolvente durante la licuefacción hidrotérmica de la paja de arroz. Como resultado, se produjo un 50,31% en peso de bioaceite y un 26,65% en peso de residuos sólidos. De acuerdo a lo establecido por (D. Chen et al., 2018), aunque el HTL en el sistema codisolvente agua-alcohol puede considerarse como un método eficaz y alternativo para mejorar la conversión de biomasa y el rendimiento de bio-aceite, el rendimiento de bio-aceite obtenido de HTL de biomasa sigue siendo insatisfactorio hasta la fecha. Por lo tanto, los catalizadores deben usarse en HTL de biomasa en un sistema cosolvente para un mayor rendimiento de bio-aceite.

Producción de biocombustibles

Entre las pocas investigaciones a escala industrial que se han publicado sobre biocombustibles está la producción de acetona-butanol, que llevó a cabo el Instituto Francés del Petróleo como parte del programa para Sustitución de Combustibles mediante un proceso que involucra un pretratamiento por explosión con vapor del residuo lignocelulósico que en este caso fueron mazorcas y olotes (Ben Chaabane & Marchal, 2013). En el trabajo de investigación de Faba et al. (2014), se realizó una revisión de las posibilidades para obtener biocombustibles de segunda generación mediante procesos químicos hidrolíticos, que implica varios pasos: pretratamiento de la biomasa (que puede ser físico o químico), hidrólisis de la biomasa, deshidratación de los azúcares, condensación aldólica e hidrogenación/deshidratación completa para obtener los alcanos lineales (biodiesel).

Para aiz-Saldaña et al. (2019), se sintetizó biodiésel por transesterificación alcalina del aceite extraído de la “almendra” del zapote mamey. Dichas almendras tuvieron en promedio un contenido de aceite de 37,5 %, mejor en relación con la cantidad promedio de aceite de la mayoría de las semillas oleaginosas, lo que hace de este residuo un material potencialmente rentable para la obtención de biocombustibles como el biodiésel. Por otra parte, García (2008) afirma que los compuestos lignocelulósicos tienen alto contenido de material fermentable, pero que el acceso a los componentes fermentables (pectina, hemicelulosa y celulosa) por hongos o enzimas constituye la principal limitante de la tecnología de fermentación, y por consiguiente, de la producción de biodiesel.

A su vez en la ciudad de Lambayeque se ha efectuado el análisis de un estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta piloto de producción de biodiesel a partir de los residuos sólidos de café, donde los residuos de café molido contienen una cantidad aproximadamente del 15% (p/p) en aceites (Deligiannis et al., 2011), los cuales pueden ser convertidos en ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) vía reacción de transesterificación.

Proceso para la producción de biocombustibles

El biodiésel es obtenido por transesterificación de triglicéridos, constituyentes principales de los aceites vegetales y grasas animales, con un alcohol de cadena corta (metanol, principalmente), en presencia de un catalizador adecuado. Los catalizadores alcalinos como el hidróxido de potasio o de sodio y los metóxidos de potasio y sodio, son los catalizadores más comúnmente utilizados en la producción de biodiesel (Predojević, 2008). La transesterificación consiste en tres reacciones consecutivas reversibles donde los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, los diglicéridos a monoglicéridos y estos a glicerol (subproducto principal de la reacción). En cada etapa se usan tres moléculas de alcohol por molécula de triglicérido. Estequiométricamente se producen tres moles de éster por cada mol de triglicérido (Sharma et al., 2008).

El biodiesel se prepara usualmente por transesterificación de triacilglicéridos con metanol o etanol, ácidos grasos de ésteres metílicos (FAMEs) y glicerol (Krohn, et al., 2008). Para eliminar la resistencia a la transferencia de masa entre el reactivo miscible del petróleo y el alcohol, acortando el período del proceso y con menor consumo de energía, se han propuesto varias tecnologías de intensificación, por ejemplo, la condición supercrítica, microondas, ultrasonido, la cavitación hidrodinámica, giro de disco (K. J. Chen & Chen, 2014).

Algunos de los inconvenientes del método convencional se pueden superar con la cavitación hidrodinámica. La cavitación hidrodinámica es un proceso de cambio de fase de líquido a vapor que ocurre siempre que la presión local es menor que la presión de vapor. Las burbujas de vapor que se forman se mueven con el líquido hasta llegar a una región de alta presión, donde colapsan en forma súbita. La sobrepresión, consecuencia de este fenómeno, se propaga en el seno del fluido provocando la condensación de la burbuja siguiente y el fenómeno se repite sucesivamente. La cavitación hidrodinámica puede ser producida haciendo pasar fluido a través de una constricción, por ejemplo, una válvula de estrangulamiento, una placa de orificio o un Venturi (Agudelo-Valencia et al., 2022). Cuando la presión local cae por debajo de la presión de vapor del líquido se crean cavidades de alta intensidad de turbulencia a nivel micro, esto es muy eficaz para eliminar la resistencia de transferencia de masa durante la reacción (Lizardi, 2016).

Conclusiones

Los desechos o residuos agroindustriales son ricos en composición de nutrientes y compuestos bioactivos. Tales desechos comprenden la variabilidad en su composición y poder calorífico, deben considerarse como "materia prima" en lugar de "desechos" para otros procesos industriales. De las materias primas consultadas se pueden apreciar que tienen excelentes condiciones para realizar conversiones termoquímicas para obtener biocombustibles.

Las localidades de la provincia de Manabí-Ecuador generan grandes cantidades de residuos agroindustriales, los cuales, en la actualidad no han sido revalorizados energéticamente. Estos



residuos agroindustriales se pueden utilizar como soporte sólido en la producción de combustibles tanto sólidos como líquidos. El uso de desechos agrícolas y agroindustriales como materias primas puede ayudar a reducir el costo de producción y contribuir en el reciclaje de desechos, así como a hacer que el medio ambiente sea respetuoso con el medio ambiente.

Conflicto de interés

Los autores se declaran que no existe conflicto de interés en este artículo.

Participación de los autores

SD y JZ prepararon el borrador del manuscrito, diseño del instrumento, búsqueda y revisión bibliográfica. GB y CM seleccionaron la bibliografía, establecieron los resultados y discusión. Todos los coautores revisaron y aprobaron el manuscrito.

Referencias

- Agudelo-Valencia, R., Camargo-Vargas, G. de J., Rojas-Molado, H. F., Garcés-Polo, S., Arias-Sierra, S., & Agudelo-Carrascal, I. C. (2022). Ultrasonic cavitation for wastewater treatment. A Review. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2), 1–26. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11661>
- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J. F., & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>



- Ben Chaabane, F., & Marchal, R. (2013). Valorisation de la fraction hémicellulosique de la biomasse en biocarburants. *Oil and Gas Science and Technology*, 68(4), 663–680. <https://doi.org/10.2516/ogst/2012093>
- Cao, L., Zhang, C., Hao, S., Luo, G., Zhang, S., & Chen, J. (2016). Effect of glycerol as co-solvent on yields of bio-oil from rice straw through hydrothermal liquefaction. *Bioresource Technology*, 220, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.110>
- Chen, D., Ma, Q., Wei, L., Li, N., Shen, Q., Tian, W., Zhou, J., & Long, J. (2018). Catalytic hydroliquefaction of rice straw for bio-oil production using Ni/CeO₂ catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 130(January), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.01.012>
- Chen, K. J., & Chen, Y. S. (2014). Intensified production of biodiesel using a spinning disk reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 78, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.02.009>
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., ... Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- Deligiannis, A., Papazafeiropoulou, A., Anastopoulos, G., & Zannikos, F. (2011). Waste Coffee Grounds as an Energy Feedstock. *Proceeding of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference, March 2016*, 617–622. https://www.mendeley.com/research/waste-coffee-grounds-energy-feedstock/?utm_source=desktop&utm_medium=1.13.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B54b970a5-bd4d-4e4d-a154-ec395765f49d%7D%5Cnhttp://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15731

- Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106–2116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>
- Elliott, D. C., Biller, P., Ross, A. B., Schmidt, A. J., & Jones, S. B. (2015). Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. *Bioresource Technology*, 178, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.132>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y Bosques*, 20(3), 11–24. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203148>
- Fermanelli, C. S., Córdoba, A., Pierella, L. B., & Saux, C. (2020a). Pyrolysis and copyrolysis of three lignocellulosic biomass residues from the agro-food industry: A comparative study. *Waste Management*, 102, 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.057>
- Fermanelli, C. S., Córdoba, A., Pierella, L. B., & Saux, C. (2020b). Pyrolysis and copyrolysis of three lignocellulosic biomass residues from the agro-food industry: A comparative study. *Waste Management*, 102, 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.057>
- García, M. C. (2008). Producción de biodiesel mediante fermentación en estado sólido de compuestos lignocelulósicos derivados del bagazo de remolacha. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 9(1), 66–72. https://doi.org/10.21930/rcta.vol9_num1_art:106
- González Ávila, M.E. (2009). Producción de bioenergía en el norte de México: Tan lejos y tan cerca... In *Frontera Norte* (Vol. 21, Issue 41).
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F. I., de Lira-Flores, J. A., & Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(October 2016), 709–729. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>

- Hao, B., Xu, D., Jiang, G., Sabri, T. A., Jing, Z., & Guo, Y. (2021). Chemical reactions in the hydrothermal liquefaction of biomass and in the catalytic hydrogenation upgrading of biocrude. *Green Chemistry*, 23(4), 1562–1583. <https://doi.org/10.1039/d0gc02893b>
- Hlina, M., Hrabovsky, M., Kavka, T., & Konrad, M. (2014). Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste. *Waste Management*, 34(1), 63–66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.018>
- J-Montoya, & R-Ximhai. (2010). Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. *Ra Ximhai*, 6(1), 57–62. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46112896008%0ACómo>
- León, C., Rodríguez, N., Mendoza, G., Bardales, C., Cabos, J., & Barrera, M. (2019). Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol. *Arnaldoa*, 26(3), 1017–1032. <https://doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311>
- Lizardi. (2016). Producción de biodiesel por cavitación hidrodinámica. *Revista de Sistemas Experimentales*, 3(9), 16–23. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num9/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N9_3.pdf
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E., & Galáan-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27–41. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num6/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N6_4.pdf
- Mishra, S., & Upadhyay, R. K. (2021). Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.08.009>
- Molino, A., Larocca, V., Chianese, S., & Musmarra, D. (2018). Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, 11(4), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en11040811>
- Nautiyal, P., Subramanian, K. A., & Dastidar, M. G. (2014). Production and characterization of

- biodiesel from algae. *Fuel Processing Technology*, 120, 79–88.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.12.003>
- Okolie, J. A., Rana, R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2019). Supercritical water gasification of biomass: A state-of-the-art review of process parameters, reaction mechanisms and catalysis. *Sustainable Energy and Fuels*, 3(3), 578–598.
<https://doi.org/10.1039/c8se00565f>
- Oliveira, I., Blöhse, D., & Ramke, H. G. (2013). Hydrothermal carbonization of agricultural residues. *Bioresource Technology*, 142, 138–146.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.125>
- Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., & Mehta, N. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. In *Environmental Chemistry Letters*
<https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7>
- Predojević, Z. J. (2008). The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps. *Fuel*, 87(17–18), 3522–3528.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.07.003>
- Ramirez-Cortina, C. R., Alonso-Gutierrez, M. S., & Rigal, L. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de ruminantes. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(3), 449–457. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.059>
- Rivas Lucero, B. A., Zuñiga Avila, G., Saez Solis, J. I., Guerrero Morales, S., Segovia Lerma, A., & Morales Morales, H. A. (2012). Perspectivas de obtención de energía renovable de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región Centro-Sur de Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 30, 872–885.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14123097009>



- Sharma, Y. C., Singh, B., & Upadhyay, S. N. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87(12), 2355–2373. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.014>
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Shah, N., Anthony, E. J., & Fennell, P. S. (2016). An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, 9(10), 2939–2977. <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
- Tillman, D. A. (2000). Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy*, 19(6), 365–384. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00049-0)
- Varma, A. K., & Mondal, P. (2017). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. In *Industrial Crops and Products* (Vol. 95, pp. 704–717). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>