

ALTERNATIVAS AMBIENTALES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE PALMA ACEITERA (*ELAEIS GUINEENSIS*) EN PROCESOS INDUSTRIALES Y AGRÍCOLAS

ENVIRONMENTAL ALTERNATIVES FOR THE USE OF RESIDUAL OIL PALM BIOMASS (*ELAEIS GUINEENSIS*) IN INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL PROCESSES



¹Andrés Leonardo Vanegas Escudero

Ingeniería Ambiental, Fundación Universidad Autónoma de Colombia, Bogotá Colombia

Recibido: 3/09/2018 Aprobado 22/10/2018

RESUMEN

Colombia se posiciona como el primer productor de aceite de palma en América Latina y el cuarto a nivel mundial. Durante la extracción del aceite de palma se genera biomasa residual lignocelulósica como los racimos de fruta vacía (RFV), fibras de mesocarpio, cuesco de palma; además, de producirse emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y efluentes con alta carga orgánica (POME); que al no ser procesados, tratados o dispuestos adecuadamente, representan causales de contaminación ambiental. No obstante, los residuos lignocelulósicos y el POME presentan características atractivas con fines de aprovechamiento mediante la transformación de la biomasa en procesos termoquímicos, físicos y biológicos; tal es el caso de la producción de compostaje y energías alternativas como los biocombustibles de segunda generación. Este artículo tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica de los efectos ambientales de la inadecuada gestión de los residuos provenientes de la extracción del aceite de palma e identificar las alternativas de aprovechamiento de esta biomasa para la aplicación en procesos agrícolas e industriales. Como resultado de esta revisión se identificó contaminación en fuentes hídricas, afectación de ecosistemas acuáticos y emisiones de GEI. Finalmente se identificó la viabilidad de emplear la biomasa residual de la industria palmera como materia prima en la producción de compostaje, biochar, biogás, bioaceite y bioetanol.

Palabras clave: biomasa lignocelulósica, biocombustibles, compostaje, extracción, POME.

ABSTRACT

Colombia is positioned as the first producer of palm oil in Latin America and the fourth worldwide. During the extraction of palm oil, lignocellulosic residual biomass is generated such as empty fruit clusters (RFV), Mesocarp fibers, Palm kernel; In addition, there are emissions of greenhouse gases (GHG) and effluents with high organic load

¹ andres.vanegas@fuac.edu.co, orcid.org/0000-0001-5782-6354

(POME); which, when not processed, treated or properly disposed, represent causes of environmental pollution. However, lignocellulosic residues and POME have attractive characteristics for exploitation purposes through the transformation of biomass into thermal, physical and biological processes; such is the case of the production of composting and alternative energies such as second generation biofuels. This article aims to carry out a bibliographic review of the environmental effects of the inadequate management of waste from palm oil extraction and identify the alternatives for using this biomass for application in agricultural and industrial processes. As a result of this review, contamination in water sources, involvement of aquatic ecosystems and GHG emissions were identified. Finally, the viability of using the residual biomass of the palm industry as a raw material in the production of composting, biochar, biogas, bio-oil and bioethanol was identified.

Keywords: *biofuels, composting, extraction, lignocellulosic biomass, POME.*



1. INTRODUCCIÓN

Colombia se posiciona como el primer productor de aceite de palma en América Latina, seguido por Ecuador, Honduras, Guatemala y Brasil (González, 2016); y en el contexto internacional, se ubica en el cuarto puesto después de Indonesia, Malasia y Tailandia. (Fedepalma, 2016). Se estima que a nivel nacional cerca de 500.000 hectáreas han sido utilizadas para la siembra de palma alrededor de departamentos como: Meta, Santander, Cesar, Magdalena, Casanare, Bolívar, Norte de Santander, Nariño, Sucre, La Guajira, Córdoba, Antioquia, y Atlántico (ICA, 2016). Durante el 2017, Colombia alcanzó un rendimiento de 3.8 toneladas de aceite por hectárea, una cifra importante al considerar que supera el promedio mundial (Fedepalma, 2018).

Según Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2001), para la obtención del aceite de palma se genera cerca de 2.1 toneladas de residuos sólidos/ tonelada de aceite producido de un racimo de fruta fresca (RFF) distribuido en 24% de tusa, 21% aceite, 14% de fibras y 6% de cascaras; residuos que por su alto contenido orgánico, representan una fuente con gran potencial de ser transformados y aprovechados como materia prima en la elaboración de productos con valor agregado en la agricultura y otras industrias. Adicional a estos residuos, se producen efluentes del molino de aceite de palma (POME) (Nasution *et al.*, 2018); caracterizado por las altas concentraciones de demanda bioquímica

de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) (Chin *et al.*, 2013); además de contener partículas orgánicas e inorgánicas coloidales voluminosas (Hossain *et al.*, 2019); condiciones que afectan a los ecosistemas acuáticos al realizarse vertimientos directamente a las masas de aguas superficiales, limitando la calidad del agua y favoreciendo la eutrofización.

Este artículo tiene como finalidad realizar una revisión bibliográfica para identificar las posibles alternativas de aprovechamiento de la biomasa residual derivada de la extracción de aceite de palma africana; para ser aplicadas en procesos agrícolas e industriales.

2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA

El proceso de extracción del aceite de palma inicia con la llegada de los racimos cortados del campo y llevados a la planta extractora (Fig.1), donde se pesa y se realizan los respectivos controles de calidad para luego ser almacenados en tolvas y transportados al área de esterilización (Nieto & Caballero, 2013). Esta se lleva a cabo con vapor de agua saturada a baja presión durante 60 a 90 minutos (dependiendo de la madurez del fruto), el objetivo de este proceso es evitar la acidificación del aceite extraído y acelerar el desprendimiento

de los frutos del racimo; además de facilitar el desprendimiento parcial de la almendra de la cáscara (Estupiñán & Guayana, 2009; González & Alvarado, 2017). Durante el desfrutamiento se separa el fruto del raquis. El fruto es enviado al digestor, donde es macerado en un cilindro vertical precalentado que trabaja a temperaturas entre 85-100°C durante 20 minutos, con el fin de romper las células oleíferas y liberar el aceite contenido en ellas (González & Alvarado, 2017). El fruto macerado pasa a ser una masa homogénea de aceite liberado con subproductos de la fruta, como la nuez y la fibra (Bermúdez & Camero, 2015).

Una vez obtenida la masa, ingresa a las prensas de tornillo sinfín, del cual se obtiene el licor de prensa, que contiene aceite, agua, lodos livianos (pectinas y gomas) y lodos pesados (tierra, arena y otras impurezas) y la torta conformada por fibras y nueces (Nieto & Caballero, 2013). La torta (fibra y nueces) es sometida a un proceso de secado y separación, parte en la que se distribuyen las nueces al área de palmistería y las fibras son utilizadas como combustible en la caldera que genera el vapor de agua (González & Alvarado, 2017).

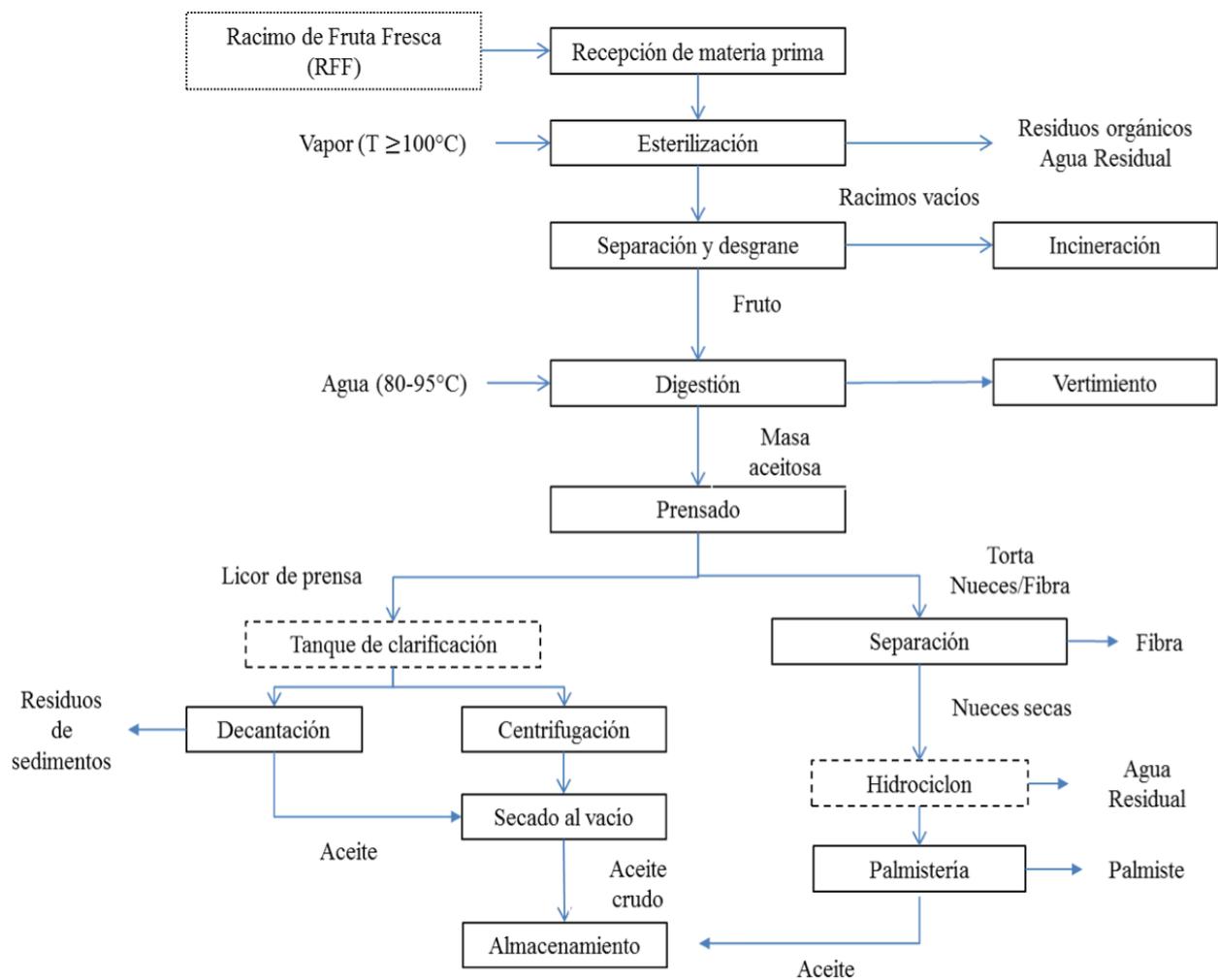


Fig. 1. Proceso de extracción de aceite de palma y residuos generados.

Fuente: adaptado de Lorestani (como se citó en Singh, Ibrahim, Esa & Iliyana, 2010); Sethupathi (como se citó en Parveen, Rajeev, Hakimi, & Norizan, 2010).

Finalmente, se realiza un proceso de clarificación del licor de prensa con el fin de eliminar impurezas y purificar el aceite (Estupiñán & Guayana, 2009). La clarificación se puede realizar mediante clarificación estática (decantación) o por clarificación dinámica (centrifugación) (Nieto & Caballero, 2013). El primer método se basa en la separación por diferencias de densidades entre el aceite y la mezcla líquida extraída de la prensa

(Nieto & Caballero, 2013); mientras que la clarificación por centrifugación aplica la separación mecánica por medio de fuerza centrífuga acelerando el proceso de separación, resultando en ambos casos un aceite más liviano, el cual es sometido a un proceso de secado, con la finalidad de eliminar humedad e impurezas (Alvarado, 2017).

3. RESULTADOS

3.1 Implicaciones ambientales

La producción de aceite de palma genera gran cantidad de biomasa lignocelulosa; en forma de hojas y troncos provenientes del sitio de cultivo de la oleaginosa (Singh, Sulaiman, & Hashim, 2013). Asimismo, durante la extracción y procesamiento del aceite de palma, se producen subproductos y residuos como racimos vacíos, fibra, cuesco, entre otros (ver Fig.2) que al no ser procesados y dispuestos adecuadamente, terminan siendo causales de contaminación ambiental (Sridhar & AdeOluwa, 2009).

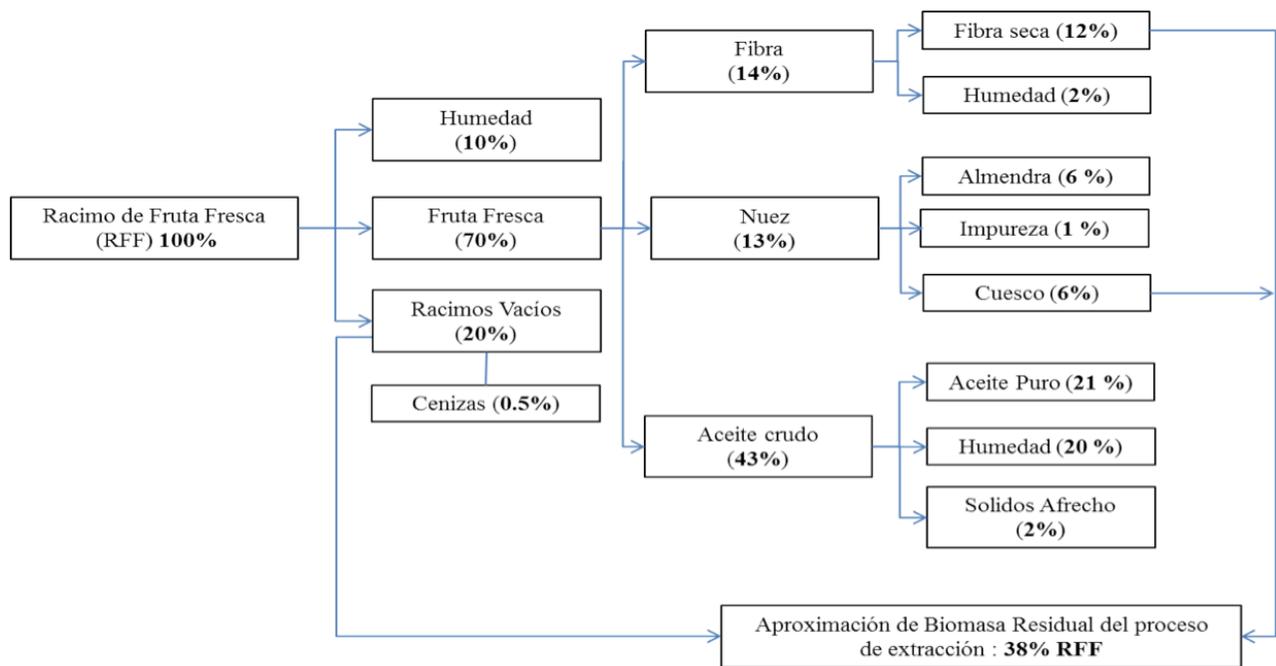


Fig. 2. Balance de masa en el proceso de extracción de aceite de palma.

Fuente: adaptado de Lorestani (como se citó en Singh, Ibrahim, Esa & Iliyana. 2010); Rincón, Gómez & Klose (2011).

En la Fig. 2 se identifica que durante la extracción de aceite de palma se genera cerca de un 38% de biomasa residual de un racimo de fruta fresca (RFF). En lo que respecta de la fibra, esta es empleada como combustible en las calderas generadoras de vapor de agua;

mientras que la almendra es triturada para la extracción de aceite; en tanto la torta es sometida a trituración con el objetivo de obtener harinas promotoras de alimento para aves de corral y ganado (Van, 2016).

las concentraciones del oxígeno disuelto en las fuentes hídricas puede llegar a ocasionar la desaparición de diferentes especies piscícolas superiores y a su vez la proliferación de olores y sabores desagradables en el agua, como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica por bacterias anaeróbicas que generan gases CH_4 y H_2S (Fig. 3) (Chapa & Guerrero, 2010; Abella & Martínez, 2012).

Por otra parte, se ha reportado la presencia de metales pesados como zinc, cobre, cadmio, cromo, hierro, entre otros; además de microorganismos como bacterias lipolíticas y metanógenos y hongos. También señalan Tan & Lim, (2019), que estos efluentes provenientes de la clarificación y esterilizado presentan alta concentración en cuanto a la demanda química de oxígeno (DQO), alcanzando concentraciones de 54.000 mg/L; demanda biológica de oxígeno (DBO) 25.000 mg/L y sólidos en suspensión total (SST) de 44.000 mg / L. Según Khalid & Wan Mustafa, 1992; Igwe & Onyegbado; 2007 (como se citó en Alade *et al.*, 2011) estos vertimientos resultado de la extracción del aceite de palma durante esterilización, condensación e hidrocliclinación, presentan un alto potencial de agotamiento del oxígeno, siendo este 100 veces mayor en relación a las aguas residuales domésticas. De acuerdo a la resolución 0631 de 2015, los valores límites máximos permisibles en los parámetros DBO es 600 mg/L, DQO5 1500mg/L y STT 400 mg/, mientras que en pH el rango oscila entre 6-9 (Fedepalma, 2015). Lo anterior, permite identificar una importante diferencia entre los valores reportados de los efluentes de la industria palmera en contraste a lo estipulado en la normatividad, condición que hace indispensable el adecuado tratamiento de las aguas residuales con el objetivo de minimizar y reducir las posibles perturbaciones a los ecosistemas acuáticos, contaminación de los cuerpos de agua, pérdida de la biodiversidad y posibles efectos sobre la salud de la población.

3.2 Alternativas de aprovechamiento

La industria palmera aporta gran cantidad de biomasa lignocelulosa durante la extracción del aceite, residuos que por sus características son susceptibles de aprovechamiento a partir de la elaboración de productos con valor agregado. No obstante, la industria palmera, incurre a incinerar estos residuos, ya sea con el fin de reincorporarlos como fuente de combustibles para generar vapor de agua en las calderas, o quemarlos a cielo abierto, con la finalidad de reducir los volúmenes de los mismos; lo cierto, es que, en el primer caso, aunque se están reincorporando los residuos como el endocarpio (cáscara de la almendra), fibras del mesocarpio y los racimos de fruta vacía (RFV), se está perdiendo biomasa que puede ser tratada y transformada para obtener productos con mayor eficiencia; en el segundo, al ser quemados a cielo abierto se pierde el potencial energético de la biomasa y se producen efectos adversos al medio ambiente y la salubridad de la población, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado (MP).

Otras industrias palmeras, optan por verter los residuos lignocelulosos al medio, para que actúen como fertilizante orgánico y eventualmente ser descompuestos de forma natural (Abnisa *et al.*, 2013). Sin embargo estudios como el de Nafissa *et al.*, (2008) indican que la descarga no sistemática de la biomasa residual de la palma africana puede causar emisiones adicionales de metano a la atmósfera.

Los ejemplos anteriores reflejan un escenario poco favorable con lo que respecta a las condiciones ambientales, pese a lo anterior, se han explorado, investigado e implementado alternativas de aprovechamiento de la biomasa palmera, empleándolas como materia prima en la producción de productos como biocombustibles de segunda generación o compostaje (Fig.4.) con el objetivo de dar una adecuada disposición a este tipo de residuos y prevenir posibles efectos de contaminación ambiental (Kong, *et al.*, 2014).

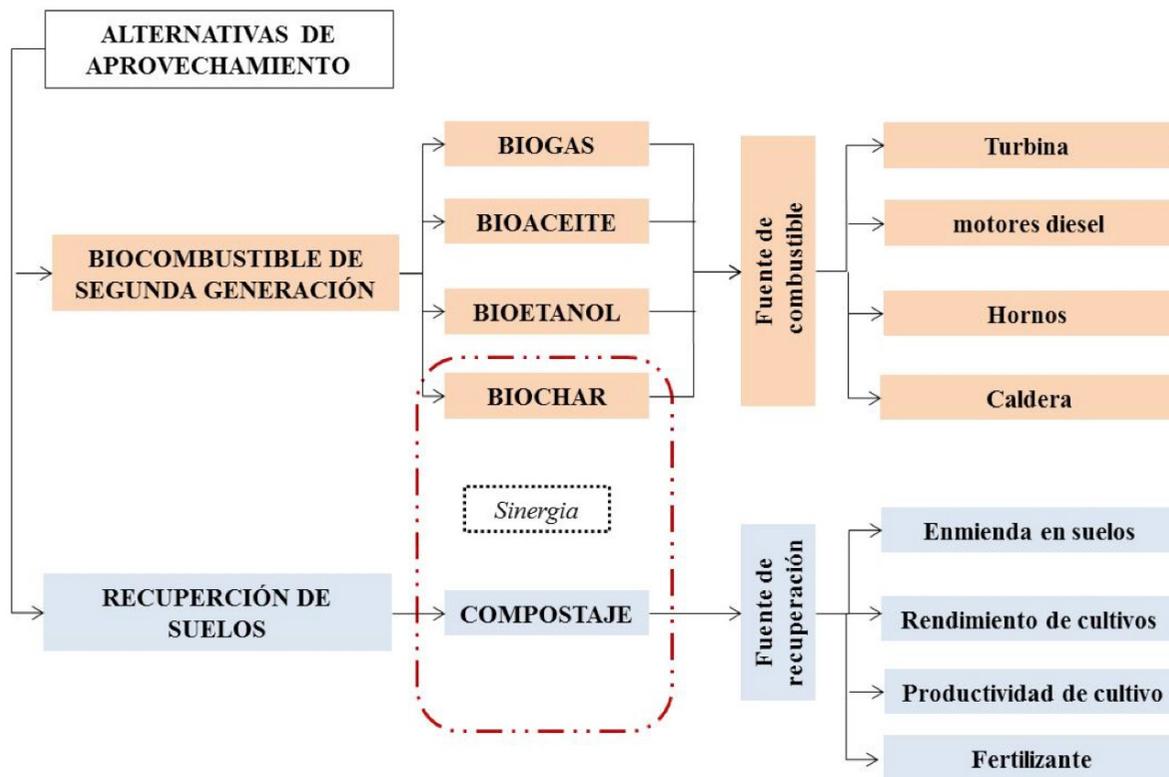


Fig. 4. Alternativas de aprovechamiento de la biomasa residual de la industria palmera.

Fuente: adaptado de Soh, (2016) Gómez *et al.* (2016).

Ahora bien, los residuos de palma aceitera pueden llegar a representar una fuente significativa de energía renovable en las industrias, al ser estos empleados como materia prima promotora de biocombustibles de segunda generación mediante procesos físicos, térmicos, químicos, biológicos, mecánicos o las posibles combinaciones entre estos procesos; favoreciendo, no solo la producción de diferentes formas de energía, sino también, la elaboración de productos no energéticos (Soh, 2016; Kim *et al.*, 2011).

En la Fig.4 se observan las posibles alternativas de aprovechamiento de la biomasa residual provenientes de la industria palmera. Una de las alternativas es la producción de biocombustibles de segunda generación. Según Soh, (2016) los biocombustibles se dividen en biomasa sólida, como biochar, briquetas y pellets; biomasa líquida, como el bioetanol y biodiesel; y biomasa gaseosa como el biogás y son el resultado de someter los residuos lignocelulósicos en procesos físico-mecánico,

termoquímicos y/o bioquímicos (Kim, 2010), con la finalidad de emplearlos como fuente de energía renovable para la generación de calor, electricidad o vapor. Estas fuentes de combustibles pueden llegar a sustituir a los combustibles fósiles y ser aplicados en turbinas, motores diesel, hornos o calderas. Por otra parte, los biocombustibles representan una fuente neutral de GEI (Thomsen, Kádár & Schmidt, 2014). Otra de las alternativas de emplear los residuos de palma es en el compostaje como forma de recuperar los suelos degradados y aumentar el rendimiento de los cultivos. También, es posible obtener sinergia entre el biochar y el compost con la finalidad de mejorar las características de este último.

3.2.1 Biochar

El biochar es el resultado de la transformación de la biomasa de palma aceitera, mediante procesos térmicos como la pirólisis. La pirólisis es el proceso de degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno para

deshidratar y eliminar el contenido volátil, siendo sometido a rangos de temperaturas entre 300°C y 600°C (Romero, Cruz & Sierra, 2016; Agudelo, 2017). Durante este proceso, el material se fracciona como resultado de la ruptura de los enlaces menos estables (puente metileno entre anillos aromáticos, éter, tioéter, etc.), dando lugar a numerosos radicales libres muy reactivos, parte de los cuales se estabilizan y reaccionan con el hidrógeno formando la compuestos volátiles, mientras que los otros radicales libres originan residuos sólidos carbonizados a partir de reacciones de polimerización y condensación (Martín, 1995). Esta técnica de degradación de la materia orgánica, es considerada ecológica, debido que no genera residuos que impliquen degradación ambiental (Abnisa *et al.*, 2013).

De acuerdo a Kong, *et al.* (2014). El biochar mejora la fertilidad de los suelos y el rendimiento de los cultivos; asimismo se caracteriza por su capacidad de retención de agua y su función adsorbente de metales pesados como cadmio, plomo, arsénico y cromo en el tratamiento de aguas residuales (Abnisa *et al.*, 2013). Adicionalmente, favorece la reducción de gases de efecto invernadero, debido a que actúa como sumidero de carbón en el suelo. De tal forma, el biochar beneficiaría a la agricultura al ser empleado como enmienda en los suelos degradados, aumentando la producción y el rendimiento de los cultivos (Gómez, *et al.*, 2016). En cuanto a la industria, el biochar es empleado como precursor de carbón activado para el tratamiento de efluentes con elevada carga contaminante y metales pesados. Asimismo, es empleado como fuente de combustible en la alimentación de calderas.

3.2.2 Bioaceite (BIO-OIL)

Según Choi, Oh, Lee & Kim, (2015) el bioaceite es una mezcla compleja de compuestos orgánicos como anhídrido- azúcares, alcoholes, cetonas, ácidos carboxílicos y fenoles. Este tipo de combustible se deriva de someter biomasa residual lignocelulosa a procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis, ya sea lenta o rápida. Sin embargo, la pirólisis rápida representa un mayor interés en comparación a la pirólisis lenta, debido al alto rendimiento en conservación de líquidos (Arteaga *et al.*, 2012).

Durante la pirólisis lenta, el principal producto es el bioaceite (bio-oil); no obstante, de este proceso también se desprenden productos sólidos y gaseosos que por sus características pueden ser utilizados con otros fines. La pirólisis rápida consiste en descomponer la biomasa residual en material volátil y luego ser condensados obteniendo el bio-oil, para ello se requiere emplear elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno, simulando una atmósfera inerte (Arteaga *et al.*, 2012).

Los bioaceites pueden ser aplicados como reemplazo de combustibles fósiles en calderas industriales, motores diesel, hornos y turbinas, ya sea para producir vapor, electricidad o calor. También pueden ser precursores de otros compuestos químicos como los fenoles (Choi, *et al.*, 2015; Arteaga *et al.*, 2012).

Investigaciones como la de Choio *et al.*, 2015, usaron residuos de palma, sometiéndolos a pirolisis rápida en un reactor de lecho fluidizado con un sistema de separación de bioaceite. En mencionada investigación, obtuvieron bioaceite con un rendimiento del 47% en peso a una temperatura de 515°C; que al ser caracterizado se identificaron compuestos como ácido acético, la hidroxiacetona, el fenol y los compuestos fenólicos como el cresol, el xilenol y el pirocateco.

En el artículo de Onifade *et al.* (2017) se utilizaron residuos lignocelulósicos tal como fibra de fruto de palma (*Elaeis guineensis*) y cáscara de nuez física (*Jatropha curcas*), y se pirolizaron a baja temperatura y presión. Como resultado se obtuvo que el pH del bioaceite se incrementaba con el aumento de las temperaturas. En cuanto a la densidad, la viscosidad y el valor calorífico del aceite de palma y residuos físicos fueron de 831.99 y 947.5 kg / m³, 0.695 y 1.58 cPa a temperatura ambiente, 22.33 y 14.169 kJ / g, respectivamente. Asimismo, al caracterizar el biocombustible se identificaron compuestos aromáticos.

Lo anterior permite reconocer la viabilidad de conversión de los residuos de palma en productos útiles en las industrias, es el caso de la producción de bio-aceite como suministro de energía a partir de la

transformación de residuos lignocelulósicos con fines de producción de energía, reducción de gases de efecto invernadero, conservación ambiental.

3.2.3. Biogas

Residuos como efluentes del molino de aceite de palma (POME), procedentes de la extracción del aceite, presenta alto contenido de compuestos orgánicos, propicios en la producción de biogás mediante procesos de digestión anaeróbica (Chin *et al.*, 2013). Este proceso bioquímico en ausencia de oxígeno, involucra la síntesis microbiana que degradan la materia orgánica en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Trisakti, Manalu, Taslim & Turmuzi, 2015).

Se logra obtener este tipo de biocombustible utilizando biorreactor deflector anaeróbico modificado (MABB), filtración anaeróbica, sistema anaeróbico de membrana ultrasónica (UMAS), entre otros; además, el biogás resultante de la degradación anaeróbica del POME está compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y en menor proporción, Hidrógeno (Ohimain & Izah, 2017); por las características atribuidas a este residuo, hace viable la aplicación del mismo en calderas de alta presión en reemplazo del diesel (Ohimain & Izah, 2017), y a su vez, puede ser utilizado en motores a gas, para generar energía alternativa en la alimentación de los molinos dentro de la propia industria palmera (Rettenmaier, Keller, & Reinhardt, 2014).

Al implementarse esta alternativa de aprovechamiento y transformación de la biomasa residual, permite a las industrias ser partícipes en la producción de energías alternas e impulsa el desarrollo sostenible; y a su vez, se generan iniciativas de impacto benéfico sobre el medio ambiente, reduciendo posibles contaminantes, patógenos y toxicidad en los ecosistemas acuáticos.

3.2.4 Bioetanol

Residuos lignocelulósicos, como el racimo de fruta vacía, el cuesco de palma y fibras, presentan alto contenido de celulosa y hemicelulosa (Castillo, 2016), que al ser sometidos por métodos de conversión enzimática

se obtiene glucosa; posteriormente, mediante hidrólisis enzimática se producen azúcares monoméricos (Samudin & Don, 2015); que por vías fermentativas y procesos de destilación se consigue el etanol (Herrera & Arias, 2014). El bioetanol es un combustible de segunda generación, empleado como energía alternativa, que puede llegar a reemplazar los combustibles fósiles; sin embargo, también es empleado como potenciador de la gasolina en las industrias y en la agricultura, favoreciendo una mejor oxidación de los hidrocarburos de la gasolina y en consecuencia, se lograría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Castro & Bernal, 2012).

Señalan Botero, Castaño & Naranjo, (2011) que “el bioetanol en Colombia reemplaza 8% del consumo de combustible para transporte y representa cerca de 263.340 galones al día”, dato que refleja el crecimiento y la importancia adquirida de este tipo de biocombustible, con viabilidad de ser utilizada en procesos industriales como fuente de energía en hornos turbinas o motores. También, el bioetanol puede tener participación en la agroindustria al usarse como combustible en el transporte de mercancía. Adicionalmente, indican que el bioetanol tiene efectos positivos sobre el medio ambiente, puesto que reduce la emisión de gases tóxicos y gases de efecto invernadero; además, de minimizar la sobre-explotación de los combustibles fósiles contaminantes (Kafarov, Ojeda & Sánchez, 2007).

3.2.5. Compostaje

Como se ha mencionado, los residuos de palma africana presentan un alto contenido de materia orgánica y elementos minerales (Singh, Ibrahim & Iliayana, 2010); características que los hace valiosos en la producción de nuevos productos, como el caso del compost.

El compostaje implica la descomposición aeróbica controlada de la materia orgánica, mediada por procesos microbiológicos (bacterias, actinomicetos y hongos), dando como resultado un producto similar al humus; rico en carbono, nutrientes vegetales; libre de patógenos y semillas de maleza (Pergola *et al.*, 2018; Singh, Ibrahim & Iliayana, 2010). Esta alternativa de

reciclaje, tratamiento, eliminación y/o conversión de los residuos orgánicos de origen vegetal a compost, permite disminuir la biomasa voluminosa desde su generación hasta su disposición final; y en consecuencia, reducir las posibles afectaciones ambientales que acarrea la degradación de los ecosistemas, emisiones de gases de efecto invernadero por quema de fibra, cuesco y mesocarpio; que se atribuyen principalmente a la inadecuada gestión de los residuos (Shafawati & Siddiquee, 2013). Otros de los beneficios asociados al compost, es el mejoramiento de las propiedades físico-químicas y microbiológicas del suelo (Sánchez, Ospina & Montoya, 2017), posibilitando recuperar suelos degradados y restaurar la fertilidad del mismo (Mohammad *et al.*, 2012, Pergola, *et al.*, 2018); aminorando costos al limitar la aplicación de insumos como pesticidas y fertilizantes (Pergola, *et al.*, 2018).

Por otra parte, señala Singh, Ibrahim & Iliayana, (2010) que el compostaje es empleado para estabilizar varios desechos industriales tales como los producidos en fábricas de papel, o en azúcar, oleo químicos, entre otros y a su vez reducir la relación volumen/peso del lodo. Del mismo modo, se logra eliminar patógenos por el calor metabólico emanado durante la fase termofílica (Sánchez, Ospina & Montoya, 2017), resultando un material provechoso en el mejoramiento de la estructura del suelo y el rendimiento de los cultivos (Anyaoha *et al.*, 2018).

Los residuos de palma como el endocarpio (cáscara de la almendra), fibras del mesocarpio y los racimos de fruta fresca (RFF) pueden ser empleados como materia prima en la producción de compost; no obstante, estos materiales lignocelulósicos, presentan estructuras complejas de lignina, hemicelulosa y celulosa (Rojas, Piñeros & Velásquez, 2011) que afecta la biotransformación y biodegradación natural de la biomasa palmera, lo que supone periodos largos de tiempo en la obtención del compost (Shafiqzaman, Saili & Laila, 2017; Bohacz, 2017). Sin embargo, se han implementado métodos que reducen los tiempos de la biodegradación de materiales lignocelulósicos, uno de ellos, es la inoculación y adición de microorganismos específicos durante el compostaje (Sánchez *et al.*, 2017).

3.2.6. Sinergia compost-biochar

Otra alternativa en la agricultura, son los procesos sinérgicos entre el compost y el biochar. De acuerdo a Sanchez *et al.*, 2018, el biochar es un material que presenta propiedades como la porosidad, área superficial y alta capacidad de intercambio catiónico, condiciones que favorecen la humificación de la materia orgánica, el crecimiento de microorganismos, reducción de pérdidas de N y reducción de gases de efecto invernadero como el CH₄ y NH₃ emitidos en el compostaje (Sanchez *et al.*, 2018; Oldfield *et al.*, 2018). Por otra parte, la interacción del compost y el biochar, reduce el estrés por déficit hídrico. Según el estudio realizado por Sajid *et al.*, 2017 se evidenció que la combinación entre biochar, compost y microorganismos, mitigó el estrés por déficit hídrico, además del aumento significativo en la longitud del brote, la biomasa del brote, la longitud de la raíz y la biomasa de la raíz, que alcanzaron 88, 77, 89 y 74%, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

La biomasa residual generada de la extracción del aceite de palma africana tiene impactos adversos o beneficiosos, según la disposición, tratamiento y/o aprovechamiento que prescinda darse a estos residuos. De los impactos adversos, se tiene la contaminación de fuentes hídricas debido a procesos de eutrofización que surgen por el vertimiento directo de POME en los cuerpos de agua receptoras; también se generan afectaciones al equilibrio radiactivo en la atmósfera como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado (MP) por la quema a cielo abierto de residuos como el racimo de fruta vacía, fibras de mesocarpio y, cáscara de la almendra. Finalmente se presentan perturbaciones a los ecosistemas y afectaciones sobre la salubridad de la población.

Los residuos de palma africana pueden ser empleados como materia prima en la elaboración de productos con valor agregado en la agricultura y en las industrias. De las alternativas de aprovechamiento se reconocen los biocombustibles de segunda generación;

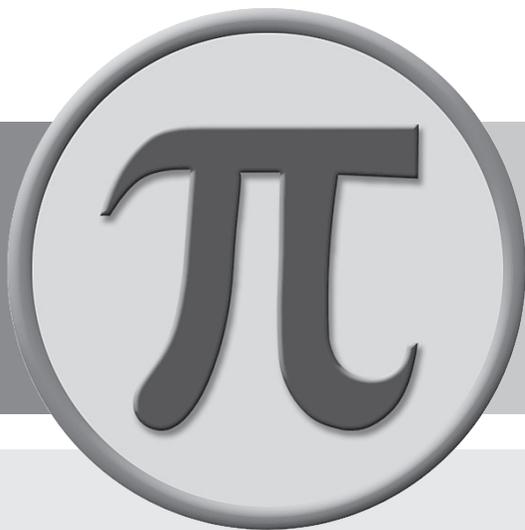
entre ellos se identifica el biochar, bioaceite, bioetanol, biogás, que son fuentes alternativas de energía renovable, conocidas por su incipiente impacto sobre el medio ambiente. Por otra parte, el compost, por sus propiedades, proporciona a suelos degradados condiciones favorables para su recuperación. Adicionalmente, se pueden llevar a cabo sinergias entre el compost y el biochar que contribuye a la humificación de la materia orgánica, el crecimiento de microorganismos, reducción de pérdidas de N y reducción del estrés por déficit hídrico y gases de efecto invernadero como el CH₄ y NH₃.

REFERENCIAS

- Abella, J., & Martínez, M. (2012). Contribución de un afluente tributario a la eutrofización del lago de Tota (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Química*, 41(2), 243-262. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/39372/41998>.
- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Wan Daud, W. M. A., Sahu, J. N., & Noor, I. M. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 76, 1073-1082.
- Agudelo, B. (2017). *Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial* (Tesis pregrado). Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6583/1/6112759-2017-2-IQ.pdf>
- Ahmad, A. L., Sumathi, S., & Hameed, B. H. (2006). Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. *Chemical Engineering Journal*, 118(1), 99-105.
- Alade, A. O., Jameel, A. T., Muyibi, S. A., Abdul Karim, M. I., & Alam, M. Z. (2011). Application of semifluidized bed bioreactor as novel bioreactor system for the treatment of palm oil mill effluent (POME). *African Journal of Biotechnology*, 10(81), 18642-18648.
- Anyaoha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation & Recycling*, 136, 399-409.
- Arteaga V., Juan C., Arenas C., Erika, López R., David A., Sánchez L., Carlos M., & Zapata B., Zulamita. (2012). Obtención de biocombustibles producto de la pirolisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 144-151. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n2/v10n2a17.pdf>.
- Bermúdez, D., & Camero, S. (2015). Elaboración de un plan de negocio para creación de una empresa de diseño y producción de maquinaria en el sector agropecuario. (Tesis pregrado). Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/472/elaboracion%20de%20un%20plan%20de%20negocios%20para%20creacion%20de%20una%20empresa%20de%20diseño%20y%20producción%20de%20maquinaria%20en%20el%20sector%20agropecuario%20colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Bohacz, J. (2017). Lignocellulose- degrading enzymes, free-radical transformations during composting of lignocellulosic waste and biothermal phases in small-scale reactors. *Science of the Total Environment*, 580, 744-754.
- Botero Agudelo, J., Castaño Peláez, H. & Naranjo Merino, C. (2011). Life Cycle Assessment for bioethanol produced from cassava in Colombia. *Producción + Limpia*, 6(2), 69-77. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v6n2/v6n2a07.pdf>.
- Carrillo, A., & González, D. (2008). Inventario de emisiones de la zona minera del Cesar. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/221>.
- Castillo, E. (2016). Producción de etanol celulósico a partir de las tusas de palma: perspectiva de Ecopetrol. Palmas, 37 (Especial Tomo II), pp. 115-118. Recuperado de: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/11927/11920/>.
- Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., & Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética. *Ra Ximhai*, 8(3b), 93-100. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177010.pdf>.
- Chapa, C. & Guerrero. (2010). Eutrofización abundancia que mata. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/n/236649916_Eutrofizacion_Abundancia_que_mata.
- Chin, M. J., Poh, P. E., Tey, B. T., Chan, E. S., & Chin, K. L. (2013). Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 717- 726.
- Choi, G.-G., Oh, S.-J., Lee, S.-J., & Kim, J.-S. (2015). Production of bio-based phenolic resin and activated carbon from bio-oil and biochar derived from fast pyrolysis of palm kernel shells. *Bioresource Technology*, 178, 99-107.
- Choong, Y. Y., Chou, K. W., & Norli, I. (2018). Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(Part 3), 2993-3006. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731403X>.
- Farid, M. A. A., Roslan, A. M., Hassan, M. A., Ujang, F.A., Mohamad, Z., Hasan, M. Y., & Yoshihito, S. (2019). Convective sludge drying by rotary drum dryer using waste steam for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, 240(10), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117986>.

- Estupiñán, J., & Guayana, J. (2009). Análisis de los aspectos cualitativos que afectan la cadena de abastecimiento agroindustrial de la palma de aceite. Tesis pregrado, Universidad Javeriana. Recuperado de: <https://javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/Tesis240.pdf>
- Fedepalma, (2018). El palmicultor. Recuperado de: <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/semanario-palmero/publicaciones/Boletin-El-Palmicultor-de-febrero-de-2018.pdf>
- Fedepalma, (2016). La Palma de aceite en Colombia. Recuperado de: <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Infografi%CC%81a%20Genera%20de%20COLOMBIA.pdf>
- Fedepalma (2015)). Rutas tecnológicas para el manejo integral de aguas residuales en las plantas de beneficio del sector palmero. Recuperado de: <http://web.fedepalma.org/sites/all/themes/rsop/publicaciones/ambientales/Rutas-tecnologicas-para-el-manejo-integral-de-aguas-residuales-en-las-plantas-de-beneficio-del-sector-palmero.pdf>
- Gómez, L. A., Cruz-Domínguez, A., Jiménez-Madrid, D., Ocampo-Duran, A., & Parra-González, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-42262016000200011.
- González, A. (2016). La agroindustria de la palma de aceite en América. *Revista Palmas*, 37(2), 215-228. Recuperado de: http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Memorias%20de%20la%20XVIII%20Conferencia%20Internacional%20sobre%20Palma%20de%20aceite/M_3_3_%20La%20agroindustria%20en%20America.pdf
- González, B., & Alvarado, P. (2017). Análisis de la producción de aceite de palma africana en el Ecuador. (Tesis pregrado). Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/23544/1/Tesis%20An%C3%A1lisis%20del%20aceite%20de%20Palma%20Africana.pdf>
- Herrera-Ruales, F. C., & Arias-Zabala, M. (2014). Producción de bioetanol por fermentación de hidrolizados hemicelulósicos de residuos de palma africana usando una cepa de *Scheffersomyces stipitis* adaptada / Bioethanol production by fermentation of hemicellulosic hydrolysates of african palm residues using an adapted strain of *Scheffersomyces stipitis*. *DYNA*, 81(185), 204-210. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v81n185/v81n185a28.pdf>
- Hossain, M. S., Omar, F., Asis, A., Jaril, Bachmann, R. T., Islam Sarker, M. Z., & Ab Kadir, M. O. (2019). Effective treatment of palm oil mill effluent using FeSO₄.7H₂O waste from titanium oxide industry: Coagulation adsorption isotherm and kinetics studies. *Journal of Cleaner Production*, 219(10), 86-98. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619304548>
- ICA (2016). Por segunda vez, el ICA amplía el plazo para registrar los predios de palma de aceite. Recuperado de: <https://www.ica.gov.co/Noticias/Todas/2016/Porsegunda-vez,-el-ICA-amplia-el-plazo-para-regis.aspx>
- Izah, S. C., Angaye, T. C., & Ohimain, E. (2016). Environmental Impacts of Oil Palm Processing in Nigeria. *Biotechnological Research*, 2(3), 132-141. Recuperado de: https://pdfs.semanticscholar.org/b4ac/7215adfb61c0aebfda2773111b51c709b8cc.pdf?_ga=2.49100326.1030956506.1581703101-1826683947.1581703101
- Kafarov, V., Ojeda, K., & Sánchez, E. (2007). Diseño de producción conjunta biodiesel – bioetanol. *Revista Energía y Computación*, 15(1), 9-14. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1463/1/V.15No.1-p.9-14.pdf>
- Kim, J., Realf, M.J., Lee, J.H., Whittaker, C., Furtner, L., 2011. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass & Bioenergy* 35, 853- 871.
- Kong, S.-H., Loh, S.-K., Bachmann, R. T., Rahim, S. A., & Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729–739. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005590>
- Mohammad, N., Alam, M. Z., Kabbashi, N. A., & Ahsan, A. (2012). Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 58, 69-78. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911002205>
- Nadeem, S. M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M. Y., Ahmad, M., Zahir, Z. A., & Crowley, D.E. (2017). Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. *Journal of the science of food and agriculture*, 91(15), 5139-5145. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28436040>
- Nafissa, A., Tabi, M., Zakil, F. A., Fauzan, W. N., Fauzai, M., Ali, N. Hassan, O. (2008.). The Usage of Empty Fruit Bunch (EfB) and Palm Pressed Fibre (Ppf) as Substrates for the Cultivation of *Pleurotus Ostreatus*. *Jurnal Teknologi*, F. 49, 189–196.
- Nasution, M. A., Wibawa, D. S., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2018). Comparative environmental impact evaluation of palm oil mill effluent treatment using a life cycle assessment approach: A case study based on composting and a combination for biogas technologies in North Sumatera of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 184(20), 1028–1040. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306371>
- Nieto, D., & Caballero, S. (2013). Estudio de prefactibilidad para el diseño y montaje de una planta extractor de aceite de palma en el municipio de Pivijay (Magdalena). Tesis posgrado Universidad Industrial de Santander. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/150543.pdf>
- Ohimain, E. I., & Izah, S. C. (2017). A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 242–253. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116309893>

- Onifade, T. B., Wandiga, S. O., Bello, I. A., Jekanyinfa, S. O., & Harvey, P. J. (2017). Conversion of lignocellulose from palm (*Elaeis guineensis*) fruit fibre and physic (*Jatropha curcas*) nut shell into bio-oil. *African Journal of Biotechnology*, 16(46), 2167-2180. DOI: 10.5897/AJB2017.16004.
- Oldfield, T. L., Sikirica, N., Mondini, C., López, G., Kuikman, P. J., & Holden, N. M. (2018). Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of Environmental Management*, 218, 465-476. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29709815>.
- Pergola, M., Persiani, A., Palese, A. M., Di Meo, V., Pastore, V., D, A. C., & Celano, G. (2018). Composting: The way for a sustainable agriculture. *Applied Soil Ecology*, 123, 744-750. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139316306928>.
- Rettenmaier, N., Keller, H., & Reinhardt, G. A. (2014). Life cycle greenhouse gas emissions of furniture and bioenergy production from oil palm trunks. *GCB Bioenergy*, 6(5), 509-520. DOI: 10.1111/gcbb.12085.
- Rincón, S. Gómez, A. & Klose, W. (2011). Gasificación de la biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Recuperado de: <http://www.unikassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-950-4.volltext.frei.pdf>.
- Rojas Pérez, L. C., Piñeros-Castro, Y., & Velásquez Lozano, M. E. (2011). Producción de azúcares fermentables a partir de fibra prensada de palma de aceite pretratada biológicamente por *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium*. *Revista ION*, 24(2), 29-35. Recuperado de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/2380/2720>.
- Romero Millán, L. M., Cruz Domínguez, M. A., & Sierra Vargas, F. E. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cusco de palma. *Revista Tecnura*, 20(48), 89-99. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06 Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6371491>.
- Rupani, P.F., Singh, R.P., Ibrahim, M.H. & Esa, N. (2010.). Review of Current Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Methods: Vermicomposting as a Sustainable Practice. *World Applied Sciences Journal*, 11(1), 70-81. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.390.5998&rep=rep1&type=pdf>.
- Ruiz, D. (2017). Métodos de estimación de sólidos suspendidos totales como indicador de la calidad del agua mediante imágenes satélites. Tesis maestría Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/57367/1/2949594699.2017.pdf>.
- Samsudin, M. D. M., & Don, M. M. (2015.). Assessment of bioethanol yield by *S. cerevisiae* grown on oil palm residues: Monte Carlo simulation and sensitivity analysis. *Bioresource Technology*, 175, 417-423. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241401548X>.
- Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., & Bolan, N. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247, 1155-1164. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417317698>.
- Sánchez, Ó.J.; Ospina, D.A.; Montoya, S. 2017. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management* 69: 136-153. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17305846>.
- Shafawati, S. N., & Siddiquee, S. (2013). Composting of oil palm fibres and *Trichoderma* spp. as the biological control agent: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 243-253. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830513003004>.
- Singh, R. P., Ibrahim, M. H., Esa, N., & Iliyana, M. S. (2010). Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 9(4), 331-344. DOI:10.1007/s11157-010-9199-2.
- Singh, R. P., Ibrahim, M. H., Esa, N., & Iliyana, M. S. (2010). Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 4, 331. Recuperado de: https://www.academia.edu/2471920/Composting_of_waste_from_palm_oil_mill_a_sustainable_waste_management_practice.
- Singh, P., Sulaiman, O., Hashim, R., Peng, L. C., & Singh, R. P. (2013). Using biomass residues from oil palm industry as a raw material for pulp and paper industry: potential benefits and threat to the environment. *Environment, Development and Sustainability*, 15(2), 367-383. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-012-9390-4>.
- Soh, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. Palmas, 37(Especial Tomo II), pp. 137-148. Recuperado de: http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Memorias%20de%20la%20XVIII%20Conferencia%20Internacional%20sobre%20Palma%20de%20aceite/M_2_14_%20Biocombustibles%20de%20segunda.pdf.
- Sridhar, M. K. C. & AdeOluwa, O. O. 2009. Palm Oil Industry En: Nigam, P. S and Pandey, A. (Eds.). *Residue. Biotechnology for Agro-industrial Residues Utilisation*, (pp 341-355). Springer Science. DOI: 10.1007/978-1-4020-9942-7_18.
- Tan, Y. D., & Lim, J. S. (2019). Feasibility of palm oil mill effluent elimination towards sustainable Malaysian palm oil industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 597-522.
- Thomsen, S. T., Kádár, Z., & Schmidt, J. E. (2014). Compositional analysis and projected biofuel potentials from common West African agricultural residues. *Biomass and Bioenergy*, 63, 210-217. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414000555>.



**Revista Especializada
en Tecnología
e Ingeniería**

