

Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma

New Concepts for Palm Oil Mill Biorefineries



Manuel García Pérez

Ingeniería de Sistemas Biológicos,
Washington State University,
Pullman, WA 99164, USA
mgarcia-perez@wsu.edu

**Jesús Alberto
García Nuñez**

Ingeniería de Sistemas Biológicos,
Washington State University,
Pullman, WA 99164, USA.
CENIPALMA, Centro de
Investigación
en Palma de Aceite,
Bogotá D.C., Colombia

Palabras CLAVE

Planta de beneficio, aceite de palma,
biorrefinería, biomasa residual, pirólisis,
digestores anaeróbicos,
carbón vegetal.

Palm Oil Mills, oil palm, biorefineries,
waste biomass, pyrolysis, anaerobic
digester, production of biochar

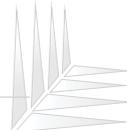
Traducido por Fedepalma

Versión original en inglés
en el Centro de Información
de Fedepalma



Resumen

Plantas de beneficio de aceite de palma producen casi 1,6 toneladas de biomasa húmeda sólida concentrada por tonelada de producto básico comercializado (aceite y palmiste). Además se obtienen 0,7 m³ de efluente líquido por tonelada de racimos de fruta fresca (RFF). Algunas de estas corrientes de residuos son considerados contaminantes por normas ambientales colombianas. Los procesos de las plantas de beneficio de aceite de palma no se han modificado significativamente en los últimos 50 años, y las tecnologías existentes no son capaces de cumplir con las nuevas y más estrictas regulaciones ambientales que se introducirán en los próximos años. Este artículo revisa los usos actuales de biomasa residual generada en las extractoras de aceite de palma en Colombia y evalúa posibles alternativas para la utilización de la biomasa residual como combustible y la producción de bio-producto. Varias alternativas para convertir las plantas de beneficio de aceite de palma existentes (POM) en bio-refinerías son revisados. La viabilidad de la adición de una unidad de pirólisis y digestores anaerobios a las extracotras de aceite de palma para la producción de carbón vegetal, el calor y el metano se discute en más detalle.



Abstract

Palm Oil Mills produce almost 1.6 tons of concentrated solid wet biomass per ton of primary product commercialized (oil and kernel). Additionally 0.7 m³ of liquid effluent per ton of fresh fruit bunches (FFB) is obtained. Some of these waste streams are considered pollutants by Colombian Environmental regulations. Palm oil mill processes have not been significantly modified in the last 50 years, and existing technologies are not able to comply with new and more stringent environmental regulations to be introduced in the next years. This paper reviews current uses of waste biomass generated in Colombian Palm Oil Mills and assess potential alternatives for utilizing this residual biomass for fuel and bio-product production. Several alternatives to convert existing palm oil mills (POM) into biorefineries are reviewed. The viability of adding a pyrolysis unit and anaerobic digesters to palm oil mills for the production of biochar, heat and methane is discussed in more details.



Introducción

La industria de la palma de aceite es un negocio agrícola importante en países en desarrollo como Malasia, Indonesia, Tailandia, Nigeria y Colombia. El aceite de palma es el aceite vegetal más producido en el mundo. En 2010 la producción de aceite de palma fue de 45,26 millones de toneladas, mientras que la del aceite de soya fue de 35,75 millones de toneladas (Fedepalma, 2010). En Colombia se considera al aceite de palma como un sustituto de cultivos ilícitos (Nathanial Gronewold, 2011). El aceite de palma y sus fracciones se utilizan primordialmente en productos alimenticios tales como aceites de cocina, productos de panadería, margarina y manteca. Entre los usos no comestibles del aceite se encuentran la producción de biodiésel y diversos compuestos oleoquímicos tales como ésteres metilo sulfonados, polioles y poliuretanos (Corley y Tinker, 2003).

Las plantas de beneficio de aceite de palma (POM por su sigla en inglés) producen casi 1,6 veces la cantidad de biomasa sólida comparada con los productos primarios que son el aceite crudo y la almendra de la palma. El rendimiento del aceite y la almendra a partir de los racimos de frutos frescos (RFF) está alrededor

del 20 y 4,5% (con base en la masa húmeda) mientras que los residuos del procesamiento de la biomasa sólida incluyen los racimos vacíos (RV), la fibra y la cáscara de la palma que representan 21, 13 y 5% (con base en la masa húmeda) respectivamente. Adicionalmente se obtienen 0,7 m³ t⁻¹ de RFF como efluente líquido. Una sola planta con capacidad de 60 t RFF h⁻¹ puede producir anualmente hasta 54.000 t de RV, 35.100 t de fibra, 10.800 t de cáscara y 141.750 t de efluentes líquidos.

Los procesos en las plantas de beneficio de aceite de palma no han mejorado significativamente durante los últimos cincuenta años (Sivasothy *et al.*, 2006). Las tecnologías existentes en las plantas colombianas no tienen la capacidad de cumplir con las nuevas y más exigentes normas ambientales. Las altas inversiones que se requieren para cumplir con esas normas están haciendo que el sector palmero sea menos viable económicamente. Por ejemplo, una práctica universal es la de tratar la biomasa sólida que producen las plantas de beneficio en las plantaciones, con el fin de reciclar los nutrientes y mejorar las condiciones del suelo. Sin embargo, en algunas regiones palmicultoras de Colombia, las autoridades

locales han prohibido dichas prácticas. Más aún, las nuevas normas han limitado en forma restrictiva la cantidad de material particulado en el gas de combustión que sale por las chimeneas de las calderas de combustión a partir de la biomasa. Estas normas son difíciles de cumplir debido a la tecnología desactualizada que utilizan la mayoría de plantas. De igual manera, es posible que en el futuro cercano se introduzcan normas más exigentes sobre el manejo de las aguas residuales. Las prácticas actuales para el tratamiento de aguas residuales mediante el uso de estanques anaeróbicos remueven más del 96% de la demanda química de oxígeno (COD por su sigla en inglés) y de la demanda bioquímica de oxígeno (BOD por su sigla en inglés). Sin embargo, las nuevas normas exigirán que la eficiencia de los sistemas aumente y que sea al menos 99,5%. Además de la reglamentación sobre COD, BOD, pH, los sólidos totales, aceites y grasas, se han adicionado a las normas nuevos criterios como los relacionados con compuestos fenólicos y los herbicidas.

El costo total de la producción de aceite de palma en Colombia (US\$ 450/t aceite de palma crudo (APC)) es mayor que el de Indonesia (US\$ 275/T APC) y el de Malasia (US\$ 350/t APC), los productores más grandes del mundo (Corredor, 2011). Esto se atribuye principalmente a los altos costos de la extracción, que son de US\$ 100/t APC en Colombia comparados con US\$ 50/t APC de Malasia e Indonesia (Corredor, 2011). Tales costos dependen en gran parte de la escala de las plantas, los costos de la mano de obra y el acero. Además de estos problemas competitivos, el sector de la palma de aceite en Colombia enfrenta un gran problema fitosanitario. En los últimos tres años (2009 - 2011) la Pudrición del cogollo ha destruido más de 45.000 hectáreas de palma de aceite. La conversión de las POM existentes a biorrefinerías podría ayudar a mejorar la competitividad de esta industria.

Una biorrefinería representa una diversificación dentro de las agroindustrias existentes o el uso alternativo de la materia prima biológica a partir de las tecnologías que actualmente se usan con los recursos fósiles para obtener

combustibles, productos químicos o la energía a partir de materiales derivados biológicamente (NREL, 2008). Una estrategia para desarrollar las biorrefinerías en una industria existente consiste en la adición gradual de módulos o tecnologías (con base en agentes de conversión térmicos, químicos, biológicos o mecánicos) para diversificar productos a partir de la biomasa. El desarrollo de una biorrefinería exige la integración de varios módulos tecnológicos dentro de una estrategia clara para diversificar los productos, reducir el impacto ambiental, así como los costos en los sistemas existentes.

Se ha identificado que las plantas de beneficio de aceite son uno de los sectores agroindustriales potenciales en los que se pueden implementar las biorrefinerías (Vijayendran, 2010). Actualmente se obtiene biodiésel y otros productos oleoquímicos a partir de los aceites de palma y de palmiste, a la vez que se investiga sobre bioetanol, productos químicos y otros tipos de biocombustibles (Vijayendran, 2010). También se pueden producir químicos de alto valor y biogás a partir de los efluentes de las plantas de beneficio (POME por su sigla en inglés) (Vijayendran, 2010). En la agroindustria del aceite, el uso potencial y anual de esta biomasa con ubicación específica y las sinergias que se obtienen con la infraestructura de la planta de beneficio son oportunidades ambientales, económicas y sociales que se deben analizar en una mayor medida.

Los estudios anteriores que se realizaron acerca del uso de las corrientes residuales en las POM permiten la visualización de nuevos conceptos en las biorrefinerías POM. Por ejemplo, ya se han implementado algunos procesos en las POM que incluyen la producción de biodiésel a partir del aceite de palma, los procesos de cogeneración a partir de biomasa en las POM (Arrieta *et al.*, 2007; Beck-Larsen, 2004; Lacrosse, 2010) y la captura de CO₂ en las POME (Conil, 2007; Tantiham *et al.*, 2007). Estas operaciones unitarias pueden hacerse parte de un concepto más amplio de una biorrefinería. Se han implementado otros estudios sobre la obtención de productos a partir de la biomasa en las POM y POME a escala de laboratorio y en plantas piloto (Wu *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*,



2009; Goh y Lee, 2010; Goh *et al.*, 2010; Chew y Bhatia 2008; Fan *et al.*, 2011). En otros se reportan metodologías para comparar diferentes alternativas y productos a partir de las biorrefinerías potenciales (Bridgewater, 2011; Chong, 20011, Mansoornejad *et al.*, 2010). En Brasil hay un esfuerzo continuo para desarrollar una herramienta que compare la sostenibilidad de las diferentes alternativas tecnológicas al aplicar los conceptos de la biorrefinación en la industria azucarera (Bonomi, 2011). Hasta donde sabemos no se ha realizado esfuerzo alguno para comparar los diferentes escenarios de las POM biorrefinerías (POMB).

La integración de los procesos térmicos como la pirólisis acelerada, lenta y la gasificación en las POM está generando interés debido a la capacidad que tienen estos procesos para convertir materiales de desecho en productos útiles. La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa con una ausencia o limitación severa del oxígeno. Es una tecnología prometedora que puede producir combustibles pirolíticos líquidos, combustibles gaseosos, químicos orgánicos y carbón vegetal. Ya se han reportado estudios sobre la POM con pirólisis incorporada (Chew y Bhatia, 2008; Das *et al.*, 2007; García Núñez *et al.*, 2008; Venderbosch *et al.*, 2007).

Se ha identificado al carbón vegetal, uno de los productos que se obtienen durante la pirólisis, como enmienda para el suelo y como herramienta para el secuestro de carbono (Woolf *et al.*, 2010). También se han identificado algunos usos en las plantaciones de palma de aceite para el carbón vegetal producido a partir de la biomasa en las POM. Por ejemplo, se puede utilizar el carbón vegetal en los viveros para mejorar el crecimiento de las plantas. El carbón vegetal puede ayudar a reducir la acidez del suelo presente en algunas áreas en las que se cultiva la palma de aceite en Colombia como medida de enmienda. Otro uso potencial sería el de mejorar la calidad de los efluentes de las plantas de beneficio (POME) después de que salen del sistema de tratamiento de las aguas residuales. Un sistema de filtrado con base en el carbón vegetal ubicado al final del tratamiento de aguas residuales POME podría mejorar la

calidad del agua y capturar nutrientes en esos efluentes. Se ha visto al carbón vegetal como un absorbente de alta eficiencia y costo-efectivo para la remoción de contaminantes (Chen *et al.*, 2011)MOP400, MOP700. La calidad y las características de un carbón vegetal dependen no solo de la materia prima que se utiliza para producirlo, sino también de la manera en que se produce (García Pérez 2011). Hasta donde tenemos conocimiento, no se han encontrado informes sobre las características del carbón vegetal a partir de la biomasa de POM que se puedan utilizar en las aplicaciones para el suelo. No se ha identificado una metodología sistemática para la producción de carbones vegetales a partir de los residuos de las POM destinados a los servicios ambientales.

La conversión de una POM en una planta de beneficio con biorrefinería sería una nueva alternativa amigable con el medio ambiente y rentable para utilizar mejor las corrientes de desechos en las POM y cumplir con las normas ambientales más exigentes. El tener una metodología para comparar diversas biorrefinerías ayudará al sector de la palma de aceite a identificar e implementar los conceptos más prometedores.

Alternativas para los usos de biomasa residual asociada con las plantas de beneficio de aceite de palma en Colombia

García Núñez *et al.* (2010) reportaron los usos de biomasa proveniente de 29 plantas de beneficio en Colombia. Este estudio representa 77% de los racimos (RFF) procesados durante 2008. La Tabla 1 muestra los principales usos de la biomasa de palma en ese año.

Aunque en la mayoría de Colombia se utilizan racimos vacíos, principalmente en los campos, en la Zona Oriental éste se agrupa en áreas provisionales de almacenamiento y no se aplica directamente al suelo. Esta práctica se realiza debido a normas con respecto a la presencia de las moscas *Stomoxys calcitrans* (insecto que afecta al ganado). Por este motivo el uso de los RV en la producción de los

Tabla 1. Usos principales de biomasa proveniente de plantas de beneficio en Colombia (García Nuñez *et al.*, 2010).

Biomasa de planta de beneficio	Caldera %	Al campo %	Compost %	Otros usos %
Racimos vacíos	2	83	15	
Fibra	80	14	6	
Cáscara	67	5	5	23*

* 70% de esta cantidad se vende a usuarios externos

materiales de compostaje se está convirtiendo en una alternativa popular en la Zona Oriental.

La fibra (el mesocarpio del fruto de la palma de aceite) es el principal material que se utiliza para la generación de vapor. Se sabe que la cantidad de fibra que se produce en una planta de beneficio de aceite de palma es más que suficiente para producir el vapor que se necesita en ella. Con las nuevas normas colombianas sobre el material particulado en las chimeneas ($< 300 \text{ mg/m}^3$), las plantas de beneficio deben reducir el uso de la fibra al mínimo. Por tanto, la utilización de la fibra para producir vapor se vuelve limitada ante la aprobación de las normas ambientales más exigentes. Este hecho podría llevar a un aumento en las fibras disponibles de las extractoras. La cáscara (el endocarpio del fruto) se utiliza como materia prima complementaria en las calderas. El 70% del endocarpio disponible se vende a otras industrias.

Una manera de aumentar el uso de la biomasa es mediante la cogeneración de energía. Si no se implementan sistemas de cogeneración y si las calderas existentes reducen el uso de la fibra (debido a las limitaciones ambientales) y solo consumen una fracción de lo que se utiliza actualmente para generar el vapor, habrá mayores cantidades de biomasa para la producción de combustibles y productos biológicos.

Conceptos de biorrefinería para plantas de beneficio de palma de aceite

El Informe Mongana conceptualizó la definición tecnológica actual para la extracción de aceite de palma a partir de los racimos de fruto frescos (RFF) durante los estudios realizados en la

República del Congo en la década de los 50 (Cooperative des Producteurs et Exportateurs de Huile de Palme du Congo Belga, 1952). Desde entonces no se ha presentado un avance significativo en cuanto a la conceptualización de las plantas de beneficio (Sivasothy *et al.*, 2006). Los procesos actuales de la extracción comercial del aceite (Corley y Tinker, 2003) solo involucran principios físicos y mecánicos para extraer el aceite y la almendra de los RFF. Se han implementado mejoras graduales en los procesos de plantas POM para reducir las pérdidas de aceite de palma y de palmiste, de energía o del consumo de agua y vapor (Sivasothy *et al.*, 2006; García Nuñez *et al.*, 2007; Halim *et al.*, 2009; Sivasothy, 2009; Subramaniam *et al.*, 2011; Yanez Angarita y García Nuñez, 2009).

Una sola POM con capacidad promedio (60 t RFF/h) puede producir anualmente hasta 54.000 t de racimos vacíos (tusas) (RV), 35.100 t de fibra, 10.800 t de cáscara y 141.750 t de efluentes líquidos. La Figura 1 muestra un escenario de referencia general para una POM corriente en Colombia.

Las plantaciones de palma de aceite asociadas con las plantas de beneficio son buenos ejemplos de cultivos agrícolas en los que se pueden aplicar los conceptos de la biorrefinería, al igual que en el sector de la caña de azúcar, el etanol de maíz y la silvicultura para la producción de pulpa y papel. El hecho de que la biomasa se encuentre en la planta de beneficio donde ya hay instalaciones y en la cual se obtiene biomasa todo el año, facilita la implementación de los conceptos de biorrefinería asociados con la producción del aceite de palma. Otra ventaja de convertir las plantas de beneficio en biorrefinerías es que el costo

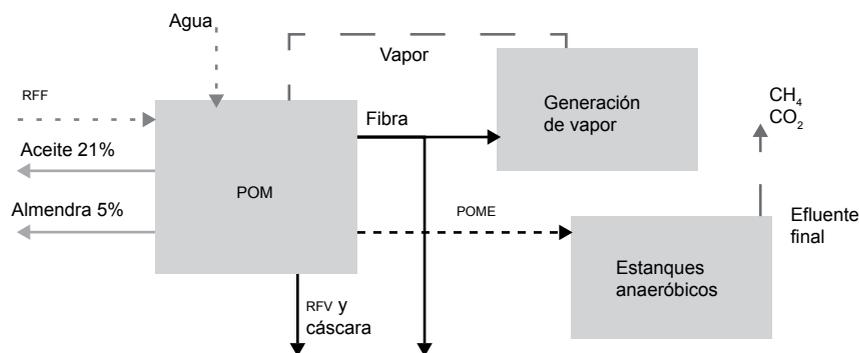


Figura 1. Escenario general de POM en la que los productos principales son únicamente aceite de palma y almendra.

de la biomasa y el costo del transporte ya se han pagado como parte del precio de los frutos.

Una desventaja de los modelos de negocio de las biorrefinerías con base en plantas de beneficio es que la capacidad de producción de la biorrefinería está limitada por la corriente de desechos que genera la planta. En el futuro la capacidad de estas biorrefinerías podría aumentarse si se recogieran y transportaran a las POM otros materiales de desecho disponibles en la región. Esto contrasta con los modelos de negocio de las nuevas biorrefinerías concebidas para la utilización de desechos agrícolas. Un informe de NREL menciona que a fin de tener una nueva biorrefinería económicamente viable se debe construir un proceso con capacidad entre 2.000 y 3.000 t/día (secas) (Wright y Brown, 2007). Como una gran fracción de la inversión de capital ya se ha invertido en las plantas de beneficio existentes, algunas de las operaciones en éstas se pueden conside-

rar como tratamientos previos, y como ya se obtienen productos de alto valor en POM, las capacidades de producción para hacer que las biorrefinerías de aceite de palma sean económicamente viables probablemente serán mucho menores que las exigidas por modelos que utilizan materiales de desecho de los grandes agronegocios. Por tanto, los productos finales asociados con una biorrefinería en planta la de beneficio deben seleccionarse según las necesidades. La Tabla 2 muestra algunos elementos claves para comparar las ventajas y desventajas de convertir una planta de beneficio en una biorrefinería, comparadas con la construcción de una biorrefinería totalmente nueva para procesar materiales agrícolas de desecho derivados de las cosechas de temporada.

Entre los diversos usos que se dan a la biomasa de POM y (POME) que han recibido atención en los años recientes se encuentran la captura de CO₂ (Conil, 2007; Tantiham *et al.*, 2009) la

Tabla 2. Comparación entre biorrefinería en la planta de beneficio y una biorrefinería nueva para las cosechas de temporada.

Parámetro	Biorrefinería nueva	Biorrefinería POM
Costo de la biomasa	30%	Gratis
Costo del transporte	Depende de la densidad de biomasa disponible	Gratis
Disponibilidad de la biomasa	8 meses/año	365 días/año
Instalaciones existentes	NO	SI
Mercado de los productos	Por desarrollar	Se pueden utilizar en la plantación
Tamaño	2000 t/día (secas)	200 - 500 t/día (secas)

cogeneración (Arrieta *et al.*, 2007; Beck-Larsen, 2004; Lacrosse, 2010), y el compostaje (Baharuddin *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010).

Es necesario revisar las tecnologías individuales para el tratamiento de los efluentes existentes, que se han desarrollado y comprobado, a fin de visualizar múltiples alternativas en las biorrefinerías POM. Una planta de beneficio estándar trata los efluentes mediante estanques anaeróbicos. Se liberan a la atmósfera grandes cantidades de gases de efecto invernadero como el CH₄ y CO₂. En la actualidad y con el advenimiento del Protocolo de Kioto para la captura y comercialización del CO₂ mediante el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), muchas POM han implementado proyectos de MDL a fin de participar en el mercadeo del CO₂ (Conil, 2007; Tantitham *et al.*, 2009). En Colombia se aprobó un proyecto MDL en el año 2007 (Fedepalma, Proyecto Sectorial marco MDL para la Captura de Metano, para el desplazamiento de Combustibles Fósiles y para la cogeneración de Energía Renovable en Colombia) (<http://www.scribd.com/doc/56103970/Fedepalma-Approved-CDM-Validation-Report>). A la fecha, solo tres POM en Colombia han empezado a construir MDL para los certificados de CO₂. Se pueden diseñar biorreactores más eficientes para optimizar la captura de CH₄ - CO₂ a la vez que se genera energía para la POM. Wu *et al.* (2009) publicaron un excelente artículo de revisión sobre los productos que potencialmente se pueden obtener a partir de POME tales como antibióticos, bioinsecticidas, solventes, ácidos orgánicos, enzimas, fertilizantes, etcétera.

La cogeneración, es decir, la producción de vapor y energía eléctrica se ha estudiado en los años recientes dentro del sector palmero. El COGEN era un programa de cooperación económica entre la Comisión Europea y la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (Asean), que permiten a las industrias y proveedores europeos promover la implementación de proyectos de cogeneración de biomasa comprobados, limpios y eficientes desde 1991 hasta 2005 (Lacrosse, 2010, Berck-Larsen, 2004). Arrieta y sus colaboradores (2007) estudiaron el potencial de cogeneración en Colombia me-

dante tres estudios de casos en POM. A pesar del costo de los equipos y algunas limitaciones normativas, como en el caso de Colombia, la tecnología de cogeneración es un enfoque prometedor para el mejor uso de la biomasa residual de POM.

Los gránulos y briquetas son alternativas viables para producir combustibles sólidos a partir de la biomasa del aceite de palma. Se pueden utilizar estos gránulos y briquetas para las calderas tanto de producción de vapor como para uso doméstico (Shuit *et al.*, 2009, Nasrin *et al.*, 2008; Arzola *et al.*, 2011). Si bien la granulación y la briquetización son tecnologías muy bien establecidas, a nuestro entender no existen plantas comerciales que produzcan gránulos y briquetas a partir de la biomasa de aceite de palma. Sin embargo, existe un interés creciente en países como Holanda y Japón de importar este tipo de combustible sólido de países como Indonesia, Malasia y Colombia. La granulación se debería considerar como un componente viable para las biorrefinerías POM.

Se han realizado muchos estudios utilizando la biomasa de POM en laboratorios y plantas piloto para la producción de biocombustibles. Goh *et al.* (2010) estimaron la producción de bioetanol a partir de la biomasa de palma de aceite en Malasia, así: 4.456 t provenientes de las hojas, 1.411 de RFF, 968 t de fibras, 475 t de las cáscaras y 522 de los troncos de las palmas. Sin embargo, ellos afirmaron que aún existen muchas limitaciones económicas, técnicas y políticas para implementar las biorrefinerías con fines de producción de bioetanol en las POM malasias. En un artículo de revisión escrito por Chew y Bhatia (2008), el enfoque principal fue el de las tecnologías catalíticas que se pueden utilizar a fin de obtener combustibles y productos químicos a partir de la biomasa de POM, al igual que las aplicaciones de catalizadores a los derivados del aceite de palma. Los autores informaron sobre varios estudios en los que la biomasa lignocelulósica en POM se utiliza para producir enzimas de celulosa (Alam *et al.*, 2009), biocompuestos (Shinoj *et al.*, 2011), bioetanol (Goh *et al.*, 2010; Tan, Lee y Mohamed, 2010; Yamada *et al.*, 2010) hidrógeno y gas sintetizado (Chew y Bhatia, 2008; Kelly-Yong *et al.*, 2007), carbón



activado (Guo y Lua, 1998; Lu *et al.*, 2006; Fan *et al.*, 2011; Aani y Zailani, 1997; Gómez *et al.*, 2011) y compostaje (Baharuddin *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010).

Se ha propuesto la integración de la producción del bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos y la producción de biodiésel a partir del aceite de palma en una POM (Gutiérrez *et al.*, 2009; Goh y Lee, 2010). Otras opciones potenciales para las biorrefinerías incluyen la producción de lípidos a partir de la biomasa y fermentar los azúcares derivados de los materiales lignocelulósicos. Los azúcares se pueden obtener mediante rutas bioquímicas o termoquímicas. Esta es una iniciativa novedosa que han desarrollado investigadores en Washington State University (WSU) y puede utilizarse con los racimos vacíos como sustrato. Una POM posee la infraestructura para producir y comercializar aceites; por tanto esta integración ayudaría a incrementar la producción de aceites. Chew y Bhatia (2008) describieron los conceptos de biorrefinería enfocados en la pirólisis rápida para producir biocombustibles. Los autores enfocan su atención en las tecnologías catalíticas a fin de obtener productos combustibles finales a partir de diversas rutas bioquímicas y termoquímicas. Das *et al.* (2007) también propusieron un concepto amplio de biorrefinería en la planta de beneficio que incluye la producción de carbón vegetal. La empresa Biomass Technology Group (BTG) realizó varios estudios sobre la producción de aceite vegetal a partir de las tusas mediante la pirólisis rápida (Vendervosch *et al.*, 2007). A nivel conceptual, el metano producido durante la digestión anaeróbica de los efluentes se puede utilizar para producir parte del H_2 necesario en el hidrotreatmento de los aceites de la pirólisis y del aceite de palma para la producción de combustibles para el transporte.

La Figura 2 resume diversas alternativas para producir diferentes productos a partir de la biomasa en plantas de beneficio mediante diferentes rutas y procesos descritos en la literatura. La integración de estas tecnologías en las POM existentes originará la producción de múltiples productos y menores cantidades de materiales de desecho.

En otros trabajos se informa sobre las metodologías que podrían usarse para comparar las diferentes alternativas y productos a partir de las potenciales POM Biorrefinerías (POMB) (Bonomi, 2011; Bridgwater, 2011; Chong, 2011; Mansoornejad *et al.*, 2010). La Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) también es una herramienta que permite comparar los efectos ambientales de las diferentes tecnologías. Recientemente se completó una ECV en Colombia para determinar el efecto que tiene la producción de biodiésel y también sería una herramienta muy útil para estudiar el impacto ambiental de convertir las POM en biorrefinerías. La base de datos que alimentó esta ECV está disponible en Cenipalma para su uso posterior. Yáñez Angarita y colaboradores (2009) trabajaron en una aproximación a la ECV para la producción de biodiésel en Colombia y Brasil. En la sección siguiente se discute con mayores detalles un concepto de biorrefinería en el cual los materiales lignocelulósicos residuales de una POM se someten a pirólisis para producir calor y carbón vegetal.

Estudio de caso: Concepto de biorrefinería en una planta de beneficio formada mediante la adición de una unidad de pirólisis para producir calor y carbón vegetal, y un biodigestor anaeróbico para producir metano

La Figura 3 muestra un concepto de POMB en la cual se adicionan una unidad de pirólisis y un digestor anaeróbico a una planta existente. Tanto el metano que se produce en el digestor anaeróbico como el vapor que se produce en el reactor de pirólisis se someten a combustión a fin de producir vapor.

En la presente revisión consideraremos que toda la biomasa que se produce en la planta de beneficio (cáscara, tusas (RV) y fibra) se someterá a pirólisis a fin de producir carbón vegetal y calor. El carbón vegetal se utilizará en el campo como reparador del suelo y el calor se utilizará para producir el vapor y la electricidad para hacer funcionar la planta. La composición

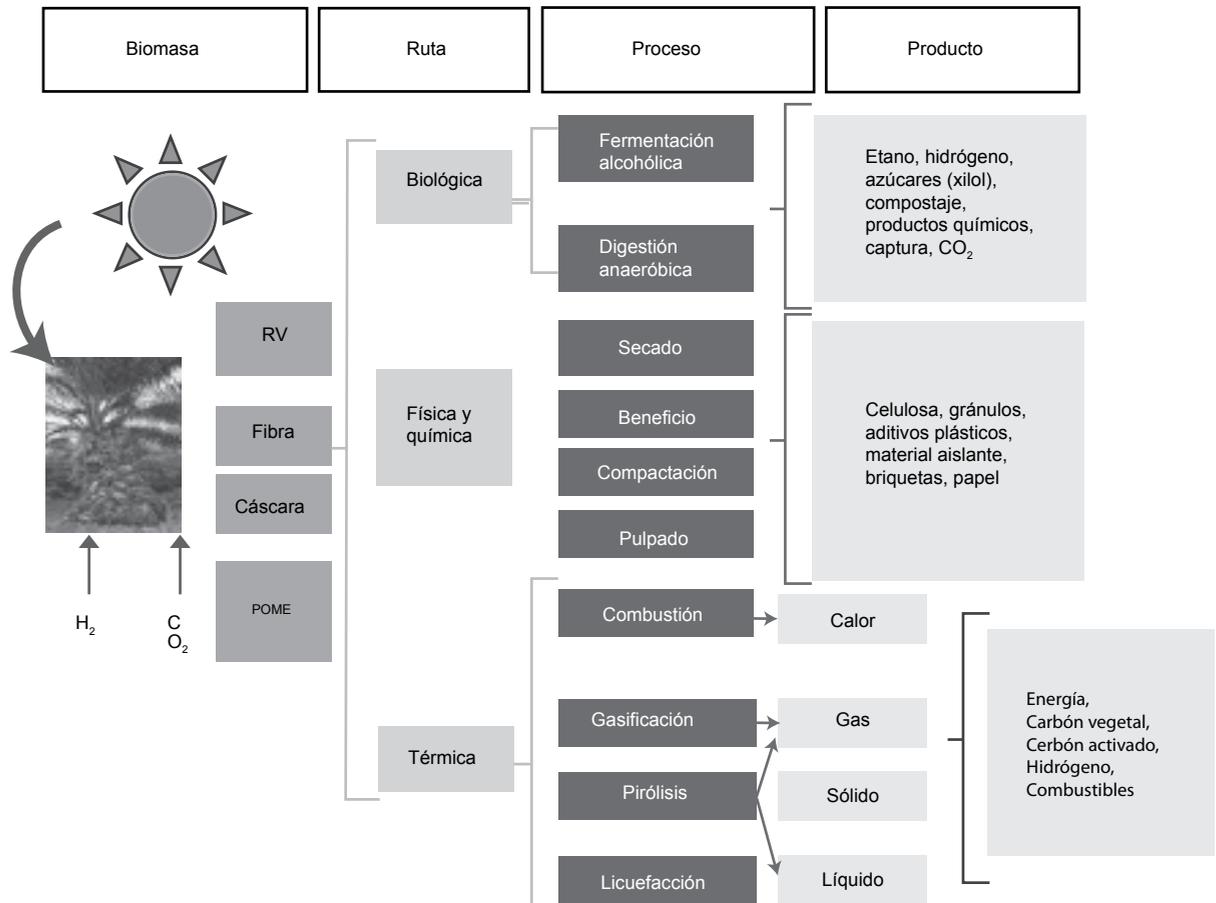


Figura 2. Diversas alternativas para el uso de la biomasa de la palma como parte de la conversión de las POM a biorrefinerías.

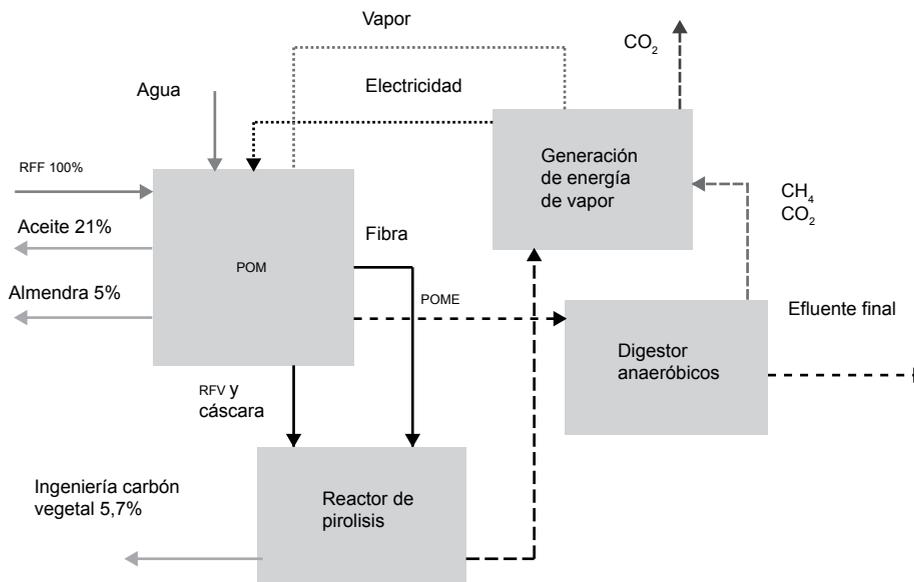


Figura 3. Concepto simple de biorrefinería POM con base en la pirólisis y la digestión anaeróbica.

**Tabla 3.** Principales componentes y elementos en los residuos de biomasa en la planta de beneficio de palma de aceite.

Componentes	Biomasa		
	Cáscara	Racimo vacío	Fibra
Lignina (%)	49,58	10,23	21,79
Celulosa (%)	30,28	44,97	33,21
Hemicelulosa (%)	12,72	19,92	16,58
Extractivos (%)	7,13	19,32	19,34
HCV (KJ/Kg)	21.445,00	8.165,00	19.201,00
Ceniza ^a (%)	2,02	7,87	8,44
Volátiles a 600 °C (%)	70,65	70,59	69,39
C (%)	46,21	40,88	43,35
N (%)	0,36	0,87	1,21
S (%)	0,04	0,09	0,18
Na (mg kg ⁻¹)	13,30	102,30	32,90
Mg (mg kg ⁻¹)	250,70	913,10	1.509,50
Al (mg kg ⁻¹)	336,50	802,10	1.216,30
P (mg kg ⁻¹)	111,90	572,70	594,90
K (mg kg ⁻¹)	1.557,50	22.289,20	5.188,30
Ca (mg kg ⁻¹)	160,80	889,30	1.771,60
Fe (mg kg ⁻¹)	337,90	812,40	1.239,40

Adaptado de: (Das *et al.*, 2007; García Nuñez *et al.*, 2008; García Nuñez, 2005).

química y algunas características fisicoquímicas de los tres materiales lignocelulósicos de desechos que produce una POM se muestran en la Tabla 3. Se espera que el carbón vegetal que se obtiene de estas fuentes dependa de la materia prima. Infortunadamente no se pudo encontrar información sobre las características del carbón vegetal para la biomasa de POM. Chan y Xu (2009) informaron un valor promedio de pH 8,1 para diferentes carbones vegetales. No obstante se espera que el carbón vegetal que se obtiene a partir de desechos de la POM tendrá un valor de pH con características apropiadas para mejorar las condiciones del suelo en los sitios donde crecen plantaciones de palma de aceite en Colombia.

El análisis que se presenta en este documento corresponde al caso de una nueva plantación de 15.000 ha con una producción de 22 t RFF /ha-año. Se espera que debido al pico de la cosecha (puede llegar a ser hasta 12% en los meses pico) y los meses de baja cosecha, la planta de beneficio trabaje 6.000 horas/año. Por tanto, la capacidad proyectada de la planta será de 55 t húmedas RFF /hora. La Tabla 4 muestra los productos y subproductos que se obtendrán por tonelada de RFF con base en esas consideraciones.

Teniendo en cuenta los valores que se muestran en la Tabla 4 (asumiendo que durante el primer año no se produzca RFF, en el segundo año habrá una cosecha del 20% de la

Tabla 4. Rendimientos de productos y subproductos para una planta de 55 t RFF /h.

Rendimientos de los productos y subproductos	(% de RFF)
(APC) Aceite de palma crudo	21*
Almendra	5*
Racimo vacío	21*
Fibra	13*
Cáscara	5*
Contenido de humedad en los subproductos	(% peso RFF)
Racimo vacío	65*
Fibra	42*
Cáscara	7*
Producción de carbón vegetal	
Rendimiento carbón (% carbón vegetal/t base seca)	30*
Racimo vacío	2.21**
Fibra	2.26**
Cáscara	1.40**
Total del carbón (% de RFF)	5.86**

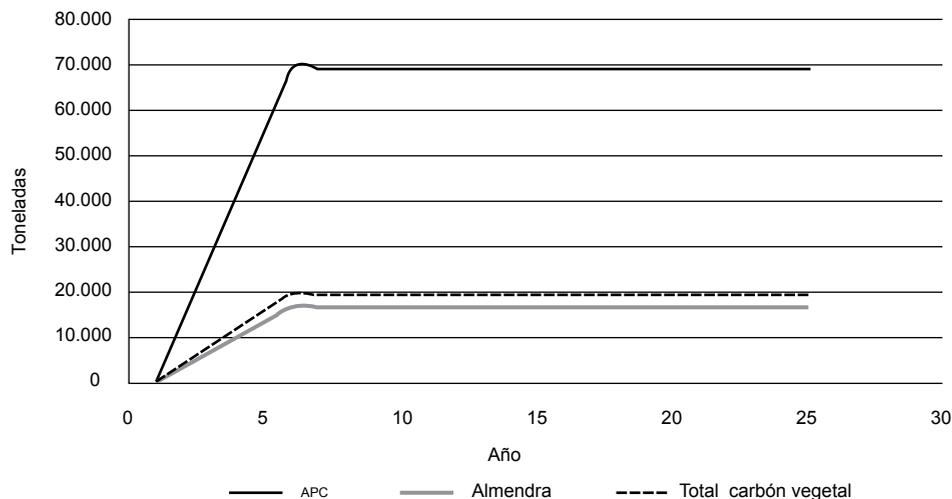
*Valores estimados, **Valores computados

producción final, el tercer año de 40%, el cuarto año de 60%, el quinto de 80% y después del sexto año se estabilizará la producción de RFF) se muestra en la Figura 4 la producción total de los productos finales: aceite de palma crudo, almendra y carbón vegetal.

El aceite de palma crudo y la almendra ya son mercados bien establecidos, así que no se discutirá su utilización. Para el carbón vegetal son distintos los escenarios posibles y se discutirán en los siguientes párrafos:

Primer escenario: *Se utiliza carbón vegetal únicamente alrededor de la palma.* En este escenario, al final del tercer año habrá suficiente carbón vegetal para añadir al suelo alrededor de cada palma (considerando 144 palmas/ha) en cantidad de 5,4 kg de carbón por árbol. En comparación, la cantidad de fertilizante químico que se utiliza por palma varía entre 4 y 10 kg/palma/año. Esta cantidad de carbón vegetal (5,4 kg/palma) representa una cantidad de 0,8 t carbón/ha. Una vez que la producción de RFF sea estable, sería posible poner 9 kg carbón/palma/año. La adición del carbón vegetal podría mejorar la efectividad de los fertilizantes al reducir su lixiviabilidad.

Segundo escenario: *Usar carbón vegetal en toda el área, no solo alrededor de las palmas sino entre ellas (en todo el campo).* En este escenario, al final del décimo año se produciría

**Figura 4.** Producción de aceite de palma crudo (APC), almendra y carbón vegetal.



suficiente carbón para poner un equivalente de 10 t de carbón/ha. La producción de carbón después del décimo año permitiría repetir esta aplicación al menos dos veces. Muchos autores han afirmado que solo sería necesaria una aplicación en el suelo. Sin embargo, debido a la falta de conocimiento sobre la cantidad que se necesita a fin de mejorar las condiciones del suelo ácido, los escenarios que se presentan aquí son solo aproximaciones que deben unirse a futuros resultados de investigaciones. Según Garzón (2009) el 75% de los suelos en los que se cultiva la palma de aceite en Colombia muestran bajas condiciones de fertilidad. Este hecho representa un uso potencial del carbón vegetal para mejorar las condiciones del suelo en Colombia. Después del décimo año se podría comercializar el carbón vegetal para otras aplicaciones.

Unidades de pirólisis para la producción de carbón vegetal y calor

La selección de un tipo específico de reactor de pirólisis depende entre otros del producto objetivo final, la velocidad de calentamiento, la estrategia de operación y las características de la biomasa (García Pérez *et al.*, 2011).

Las condiciones de pirólisis determinan la cantidad del producto final. De esta forma, las velocidades de calentamiento más rápidas producen más líquidos y gases mientras que velocidades más bajas producen más sólidos. En la presente sección revisaremos algunos esquemas de unidades de pirólisis para producir carbón vegetal y calor que se podrían integrar a las POM existentes.

La producción de carbón vegetal junto con la recuperación del calor que se produce en la combustión de vapores de la pirólisis es un enfoque promisorio que debería estudiarse aún más (Peláez Samaniego *et al.*, 2008). En una POM los gases que resultan de la pirólisis para producir carbón vegetal pueden usarse como combustible en las calderas existentes para producir vapor, que a su vez puede usarse en la extracción del aceite o para generar electricidad en las turbinas de vapor. Diversas industrias han reportado la combustión de

gases de la pirólisis con el fin de producir vapor (García Pérez *et al.*, 2011). La empresa Mitsui Engineering y Shipbuilding Co., Ltd utiliza este esquema en un proceso de reciclaje para obtener calor y carbón vegetal a partir de los desechos sólidos de una ciudad. Chores, Agri-Tech Producers e International Tech Corporation son tres empresas que comercializan los reactores de pirólisis continua acoplados a una cámara de combustión para producir calor (García Pérez *et al.*, 2011). Cirad e Innov-Energies desarrollaron un proceso que produce carbón vegetal con varios reactores de carga y someten a combustión los vapores de la pirólisis en un incinerador centralizado (Figura 5). El incinerador central se diseñó para eliminar la emisión de vapores orgánicos a la atmósfera, pero se puede renovar fácilmente para recuperar el calor.

Uno de los reactores de pirólisis más versátiles es el reactor sinfín (García Pérez *et al.*, 2011) (Figura 6). Este tipo de reactor se alimenta normalmente a través de una tolva que se conecta al cuerpo principal del reactor. Algunos diseños tienen una válvula de sello



Figura 5. Proceso MDL para recuperar el calor en los sistemas de carga (Cirad e Innov-Energies, 2010).

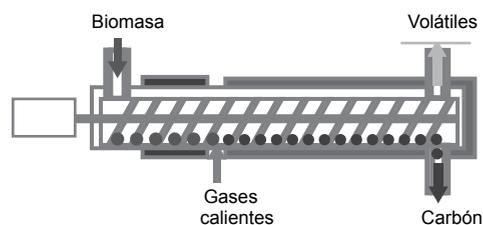


Figura 6. Reactor sinfín.

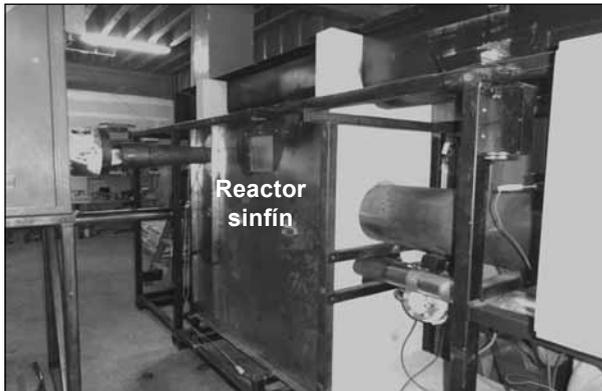


Figura 7. Reactor sinfín de pirólisis para carbón vegetal y recuperación de calor, comercializado por Jerry Whitfield Company (Fotografía tomada por Tom Miles).



Figura 8. Unidad de pirólisis con recuperación de calor, International Tech Corporation (<http://www.internationaltechcorp.org/IT-info.htm>, acceso el 13 de noviembre de 2010).

para evitar que ingrese aire. Una barrena (sinfín) mueve gradualmente la biomasa a través de la pared caliente, induciendo la liberación de vapores pirolíticos y la formación de carbón vegetal. Los gases y vapores se pueden condensar o someter a combustión y el carbón se recoge en un contenedor cerrado para su uso posterior (García Pérez *et al.*, 2011).

La Figura 7 muestra un reactor sinfín para pirólisis con recuperación de calor, el cual comercializa Jerry Whitfield Company.

Entre las características que mencionan García Pérez y sus colaboradores (2011) sobre el reactor sinfín se encuentran las siguientes:

- Orden del producto final tiene un objetivo: carbón vegetal – calor.
- Velocidad que se logra en la transferencia de calor: pirólisis lenta o rápida.
- Modo de operación: continuo.
- Método de calentamiento: puede utilizar calor indirecto mediante las paredes, arena o gases calientes.
- Materiales de construcción: metal.
- Portabilidad: estacionario o portátil.
- Posición del reactor: horizontal.
- Materia prima utilizada: astillas o partículas finas.
- Métodos de carga y descarga: mecánicos.
- Método de ignición de carga: calentamiento con una cámara de combustión externa.
- Control del proceso: medición directa de temperatura.

- Presión: atmosférica.
- Tratamiento previo requerido: ninguno.

Estas características llevarían al uso de este reactor acoplado con una POM. Hay otras empresas que comercializan reactores para pirólisis con enfoque en la producción de carbón vegetal y calor. Agri-Tech Producers (ATP), empresa ubicada en Carolina del Sur, utiliza reactores sinfín para torrefacción y pirólisis (<http://www.agri-techproducers.com/About-Us.html>). Su unidad de recuperación de calor hace una combustión de todos los vapores de la pirólisis para producir calor (Figura 8). El calor puede entonces convertirse en vapor. Esta empresa produce sobre pedido carbones activados, enriquecedores de suelos y productos a partir del carbón. El sistema está diseñado para utilizar desechos sólidos y puede procesar cincuenta toneladas de biomasa por día. Este tipo de sistema cuesta US\$450.000 y su fabricación toma dieciséis semanas (García Pérez *et al.*, 2011).

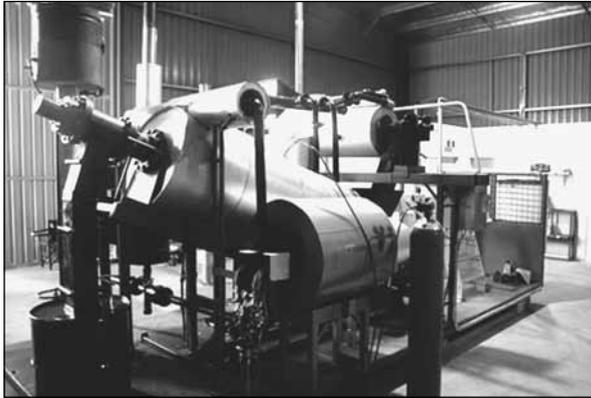


Figura 9. Unidad de pirólisis CR-2 de *eGenesis* para producir carbón vegetal y gases de síntesis (<http://www.egenindustries.com>; fecha de acceso 13 de noviembre de 2010).

eGenesis Industries, una empresa ubicada en California (<http://www.egenindustries.com>; fecha de acceso 13 de noviembre de 2010) está desarrollando reactores sinfín para la producción de carbón vegetal y calor. Su unidad CR-2 puede funcionar a 40 kg/h con un rendimiento energético de 64 Kw a partir de los gases de la síntesis (Figura 9). Los gases de síntesis limpios se pueden usar como fuente de calor o generación de energía.

Usos del carbón vegetal

El carbón vegetal obtenido mediante la pirólisis ha sido identificado como un elemento reparador del suelo y una herramienta para la absorción del carbono y así contrarrestar el calentamiento global (Woolf *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2006). El rendimiento, la calidad y las características del carbón dependen no solo de la materia prima utilizada sino también de la tecnología que se utilice para producirlo (Amonette y Joseph, 2009; Downie y Munrore, 2009; Joseph *et al.*, 2010; Verheijen *et al.*, 2009). Las características deseadas en el carbón vegetal dependen de la utilización que se vaya a dar al producto. Por ejemplo, se estudiaron las fibras y cáscaras de la palma de aceite con el fin de encontrar las características óptimas que permitan su uso en la industria del carbón activado (Lua y Guo, 1998, Guo y Lua, 1998). Los autores indicaron que el área superficial y la porosidad están en

función de la temperatura final, la velocidad del calentamiento y el tiempo de retención. Además encontraron que las condiciones específicas de la pirólisis mejoran el área superficial y la porosidad. En los últimos años ha generado interés el uso del carbón vegetal como enmienda del suelo y para la absorción de carbono (Amonette y Joseph, 2009; Cheng *et al.*, 2008; Downie *et al.*, 2009; Granatstein *et al.*, 2009; Joseph *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2006; Novak *et al.*, 2009; Verheijen *et al.*, 2009; Woolf *et al.*, 2010). Al aplicar carbón vegetal al suelo ocurren diferentes reacciones. Joseph *et al.* (2010) estudiaron las interacciones entre el carbón y el suelo. Identificaron en la literatura publicada que los factores que afectan las interacciones carbón-suelo son: (i) la composición de la biomasa (especialmente las fracciones minerales), (ii) las condiciones durante la pirólisis, (iii) el tamaño de las partículas y (iv) las propiedades del suelo y las condiciones ambientales específicas. Sin embargo, existen algunas preocupaciones en cuanto a utilizar el carbón vegetal. Verheijen *et al.* (2009) presentaron una revisión excelente en la cual se discuten los pros y los contras de aplicar el carbón vegetal a los suelos.

A pesar del interés creciente en utilizar el carbón vegetal como enmienda del suelo, no existe información sólida en cuanto a las propiedades nutrientes del carbón (Chan y Xu 2009). Los datos disponibles muestran que si bien el carbón vegetal contiene un amplio espectro de nutrientes, la mayoría de los carbones tienen una caracterización pobre (Chan y Xu 2009). Existen dos características principales que permiten considerar al carbón vegetal como enmienda del suelo. La primera es que puede ser una fuente de nutrientes. La segunda es el aumento en la captura de nutrientes por parte de las plantas mediante el mejoramiento de la calidad del suelo, lo que permite utilizar el fertilizante en forma más eficiente (Chan y Xu 2009). Amonette y Joseph (2009) indicaron que el contenido de nutrientes en el carbón vegetal depende fundamentalmente de la temperatura a la que se produjo. A temperaturas

relativamente bajas (200 - 300 °C) se libera potasio (K), nitrógeno (N) y cloro (Cl), en tanto que a mayores temperaturas (600 - 700 °C) se libera calcio (Ca), silicio (Si) y magnesio (Mg) (Amonette y Joseph, 2009). El fósforo (P) y el azufre (S) son estables a temperaturas bajas (Amonette y Joseph, 2009). Los grupos funcionales ácidos y básicos pueden coexistir sobre las superficies del carbón y contribuyen con sus características absorbentes (Amonette y Joseph, 2009). Se ha encontrado que el carbón vegetal que se produce entre 300 - 400 °C tiene mayores cantidades de grupos funcionales ácidos y básicos superficiales, pero menor área superficial comparados con los carbones que se producen a mayores temperaturas (Chan y Xu, 2009). Por tanto, la porosidad del carbón aumenta entre los 400 y 600 °C (Chan y Xu, 2009). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una de las características más importantes al considerar el carbón vegetal como remedio para el suelo. La CIC es crítica para la retención de nutrientes. Lehmann (2007), descubrió que la CIC del carbón vegetal es mayor cuando hay menores temperaturas de pirólisis. Sin embargo, parece que esta característica también depende de la antigüedad que tiene el carbón en el suelo (Lehman, 2007). Las características que un carbón ideal debería tener para su uso como enmienda del suelo son: (i) alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), (ii) disponibilidad de nutrientes y (iii) área específica grande. Cheng *et al.* (2006) y Liang *et al.* (2006) han explorado algunos procesos de manufactura a fin de mejorar la CIC del carbón vegetal. Al exponer el carbón a O₂ y agua ocurren reacciones espontáneas de oxidación que aumentan la CIC.

En la producción del carbón vegetal a partir de la biomasa en una POM (RV, cáscaras y fibra), el uso principal que se ha identificado es la remediación del suelo con el fin de reducir la acidez presente en algunas áreas donde se cultiva la palma de aceite en Colombia. Major *et al.* (2010) indicaron un aumento en el pH del oxisol en los Llanos Orientales o las sabanas (una de las principales áreas de cultivo de la palma en Colombia) luego de utilizar durante cuatro años el carbón vegetal proveniente de los árboles de mango. Los

investigadores de Cenipalma estudian primero el uso del carbón vegetal en las plantas de vivero y en los agujeros para la siembra en el campo debido a la cantidad de carbón que se requiere aplicar a las grandes áreas. Estas aplicaciones focalizadas son un primer paso para evaluar el desempeño del carbón vegetal en aplicaciones de mayor valor.

Digestor anaeróbico

Los sistemas que se utilizan más comúnmente para tratar POME son los estanques anaeróbicos abiertos. Los efluentes contienen grandes cantidades de materia orgánica. Son muy comunes los valores de 50.000 mg/l en la demanda química de oxígeno (DQO), 25.000 mg/l en demanda bioquímica de oxígeno, 50.000 mg/l en sólidos totales, 7.000 mg/l en los aceites y las grasas y un pH de 4,0 (García Núñez y Uribe Mesa, 1997). Actualmente se obtienen reducciones mayores al 96% en el DQO y el DBO al usar estanques anaeróbicos abiertos. Sin embargo, se liberan grandes cantidades de CH₄ y CO₂ a la atmósfera. En un reciente estudio de Cenipalma en el que se realizó la evaluación del ciclo vital (ECV) al biodiésel colombiano se mostró que los gases de efecto invernadero (GEI) liberados a la atmósfera durante las digestiones anaeróbicas representan más del 70% del CO₂ equivalente que se libera durante el proceso de extracción de aceite en las POM (resultados sin publicar). Esta cantidad es la principal contribuyente de las emisiones totales en toda la cadena del biodiésel colombiano de aceite de palma, con un valor cercano a 1,0 kg CO₂ eq. /kg de biodiésel. Aunque este estudio mostró un muy buen desempeño en la ECV del biodiésel colombiano al reducir en 117% los GEI (resultados sin publicar) considerando el uso de B100, será imposible mejorar este indicador al captar y utilizar el metano que se produce durante el paso de la digestión anaeróbica.

Se debe elegir un digestor anaeróbico eficiente con el fin de producir y utilizar la energía que contiene el biogás (CH₄). Tantiham y colaboradores (2009) estudiaron diversas formas de digestores anaeróbicos para tratar el



POME y capturar los gases liberados. Se estudiaron los Reactores de Tanque con Agitación Continua (RTAC) teniendo en cuenta la experiencia previa en el tratamiento de la POME con estos reactores. Estos autores afirman que los RTAC trataron con éxito los POME en condiciones termofílicas o mesofílicas usando un área relativamente pequeña. Sin embargo, los problemas principales que encontraron los autores fueron los altos costos de la construcción, los riesgos de corrosión, el corto tiempo de retención la POME y el tiempo de almacenamiento limitado para el gas. Tantiham *et al.*, (2009) descartaron el uso de los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA) para el tratamiento de los efluentes debido a las limitaciones en el almacenamiento de gas y los altos costos de construcción. La tecnología seleccionada fue el Estanque Cubierto Modificado (Reactor Anaeróbico Cubierto) debido a los costos de construcción relativamente bajos, el gran tiempo de retención y el alto volumen de almacenamiento para el gas. Conil (2007) también informó sobre esta tecnología y es la que adopta actualmente el proyecto MDL colombiano (<http://www.scribd.com/doc/56103970/Fedepalma-Approved-CDM-Validation-Report>). Esta tecnología se puede adaptar fácilmente en la propuesta para el concepto de la biorrefinería.

Conclusiones

El sector de la palma de aceite es una de las industrias agrícolas en las que se pueden implementar a corto plazo el concepto de la biorrefinerías. Un solo sitio produce la biomasa suficiente durante todo el año para sustentar la producción de combustibles, químicos y enmiendas para los suelos. El acoplar las instalaciones actuales con las nuevas tecnologías que se están estudiando para procesar los desechos industriales llevará a la evolución gradual de las plantas existentes hacia las biorrefinerías. No obstante, es necesario estudiar cuál alternativa es más prometedora en el uso de biomasa y enfocarse en ciertos productos específicos.

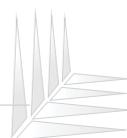
Una de las alternativas para una biorrefinería en la planta de beneficio de palma que se puede implementar en los años venideros, es la producción de carbón vegetal y calor mediante la pirólisis de biomasa y la recuperación del metano que se produce en los estanques de digestión anaeróbica. Con este concepto, los principales productos que se pueden obtener son la energía, el calor, el vapor y el carbón vegetal. A medida que se desarrollen las tecnologías para refinar estos aceites podrían ser viables conceptos más complejos que se enfoquen en la producción de combustibles avanzados a partir de aceites producto de la pirólisis.



Bibliografía

- Aani, F. N. y Zailani, R. (1997). Characteristics of pyrolysis oil and char from oil palm shells. En: A.V. Bridgwater y D.G.B. Boocock (Eds.), *Developments in Thermochemical Biomass Conversion* (pp. 425–432). Oxford, U.K.: Blackwell Science.
- Alam, M. Z.; Mamun, A.; Qudsieh, I.Y.; Muyibi, S.A.; Salleh, H.M. y Omar, N.M. (2009). Solid state bioconversion of oil palm empty fruit bunches for cellulase enzyme production using a rotary drum bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 46(1), 61-64.
- Amonette, J.E. y Joseph, S. (2009). Characteristics of biochar: Microchemical properties. En: J. Lehmann y S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and technology* (pp. 33–52). London, UK: Earthscan.
- Arrieta, F. R.; Teixeira, F. N.; Yañez, E.; Lora, E. y Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 503–511.
- Arzola, N.; Gómez, A. y Rincón, S. (2011). Bio-pellet Production from Oil Palm Shells. *Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, Pipoc 2011. International Palm Oil Congress* (p. 127). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.

- Baharuddin, A. S.; Hock, L. S.; Yusof, M. Z.; Abdul, N. A.; Shah, U.; Hassan, M. A.; Wakisaka, M.; *et al.* (2010). Effects of palm oil mill effluent (POME) anaerobic sludge from 500 m³ of closed anaerobic methane digested tank on pressed-shredded empty fruit bunch (RV) composting process. *African Journal of Biotechnology*, 9(16), 2427–2436.
- Beck-Larsen, N. (2004). COGEN 3 Programme and Activities EC - Asean Cogen Programme Phase III. *Brunei Darussalam Cogeneration Week*. Bandar Seri Begawan, Brunei. Retrieved from <http://www.cogen3.net/presentations/asean/cogenweek2004brunei/COGEN-3Programmeactivities.pdf>
- Bonomi, A. (2011). Virtual Sugarcane Biorefinery: A tool to compare the sustainability of different technological alternatives. *PASI 2011 - Process Modeling and Optimization for Energy and Sustainability*. Angrados Reis, RJ, Brazil. Retrieved from http://cepac.cheme.cmu.edu/pasi2011/library/bonomi/Presentation_VSB_Bonomi.pdf
- Bridgwater, T. (2011). A methodology for the generation and evaluation of biorefinery chains. *IEA Bioenergy Agreement Task 34 Newsletter - PyNe 29* (pp. 18 – 19). Retrieved from http://www.pyne.co.uk/Resources/user/PyNe_Issue_29_v1.pdf
- Cirad and Innov-Energies. (2010). Carbonisation and Cogeneration Technology: The CML Process. Retrieved November 15, 2010, from http://www.drveniugljen.hr/assets/files/prezentacije/06_Christian_Bedrossian.pdf
- Chan, K. Y. y Xu, Z. (2009). Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In J. Lehmann y S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and technology* (pp. 67–84). London, UK: Earthscan.
- Chen, B.; Chen, Z., y Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource technology*, 102(2), 716–723.
- Cheng, C.; Lehmann, J.; Thies, J.; Burton, S. y Engelhard, M. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 37(11), 1477–1488.
- Cheng, C.-H.; Lehmann, J. y Engelhard, M. H. (2008). Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6), 1598–1610.
- Chew, T. y Bhatia, S. (2008). Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery. *Bioresource Technology*, 99(17), 7911–7922.
- Chong, K. J. (2011). *A methodology for the generation and evaluation of biorefinery process chains, in order to identify the most promising biorefineries for the EU*. Aston University.
- Conil, P. (2007). Biogas and C.E.R. Generation in Palm Oil Mills in Latin America. *Proceedings of the PIPOC 2007 International Palm Oil Congress (Chemistry & Technology)* (pp. 262 – 263). Kuala Lumpur.
- Cooperative des Producteurs et Exportateurs de Huile de Palme du Congo Belga. (1952). Mongana Report, research on production and storage of palm oil. (2 Vol). Congo Belga: IRSIA.
- Corley, R. H. V., y Tinker, P. B. (2003). *The oil palm* (4th ed.). Oxford {;Malden} {MA}: Blackwell Science.
- Corredor, A. (2011). Palm Oil Production Costs. Bogotá.
- Das, K. C.; García Nuñez, J. A. y García Pérez, M. (2007). Overview of a Biorefinery and Opportunities in the Palm Oil Sector. *Revista Palmas*, 28(Especial), 91–100.
- Downie, A.; Crosky, A. y Munrore, P. (2009). Physical properties of biochar. In J. Lehmann y S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and technology* (pp. 13 – 32). London, UK: Earthscan.
- Fan, S.-P.; Zakaria, S.; Chia, C.-H.; Jamaluddin, F.; Nabihah, S.; Liew, T.-K. y Pua, F.-L. (2011). Comparative studies of products obtained from solvolysis liquefaction of oil palm empty fruit bunch fibres using different solvents. *Bioresource technology*, 102(3), 3521–3526.
- Fedepalma. (2010). *Statistical Yearbook 2010. The Oil Palm Agroindustry in Colombia and the World 2005 - 2009*. Bogotá.
- García Nuñez, J. A.; García Pérez, M. y Das, K. C. (2008). Determination of Kinetic Parameters of Thermal Degradation of Palm Oil Mill By-Products Using Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry. *Transactions of The Asabe*, 51(2), 547–557.
- García Nuñez, J.A. (2005). *Determination of kinetic constants and thermal modeling of pyrolysis of palm oil mill solid wastes*. University of Georgia, Athens. UGA.
- García Nuñez, J.A.; Cardenas, M. y Yañez-Angarita, E. E. (2010). Generación y Uso de Biomasa en Plantas de Beneficio de Palma de Aceite en Colombia. *PALMAS*, 31(2), 41–48.
- García Nuñez, J.A. y Uribe Mesa, L.D. (1997). *Manejo de Efluentes en Plantas Extractoras 2. Diseño de lagunas de estabilización*. 56 p. Bogotá: Editorial Kimpres Ltda., Colombia.
- García Nuñez, J.A.; Yañez Angarita, E. E.; Rincón-Miranda, S. M. y Díaz Rodríguez, O. M. (2007). Improving in Oil Extraction Efficiency in Colombia. *Proceeding of Chemistry & Technology Conference. Pipoc* (pp. 32 – 45). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- García Pérez, M.; Lewis, T. y Kruger, C. E. (2011). Methods for Producing Biochar and Advanced Biofuels in Washington State. Part 1: Literature Review of Pyrolysis Reactors. First Project Report. Department of Biological Systems Engineering and the Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman, {WA}, 137 pp. Retrieved from <http://www.ecy.wa.gov/pubs/1107017.pdf>
- García Pérez, Manuel. (2011). Lectures. BSYSE 596 Biomass Thermo-Chemical Conversion Technologies. *Lectures*. Pullman, WA: Washington State University, WSU.
- Goh, C. S. y Lee, K. T. (2010). Palm-based biofuel refinery (PBR) to substitute petroleum refinery: An energy and emergy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2986–2995.
- Goh, C.S.; Tan, K.T.; Lee, K.T. y Bhatia, S. (2010). Bio-ethanol from lignocellulose: Status, perspectives and challenges in Malaysia. *Bioresource technology*, 101(13), 4834–41.
- Gómez, A.; Mendoza, L. y Rincón, S. (2011). Activated Carbon from Oil Palm Shells for Hot Temperature Tar Removal in Gasification Systems. *Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, PIPOC 2011. International Palm Oil Congress* (p. 208). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- Granatstein, D.; Kruger, C. E.; Collins, H.; Galinato, S.; García Pérez, M. y Yoder, J. (2009). *Use of biochar from the pyrolysis of waste*



- organic material as a Soil Amendment. Final project report. Program (p. 168). Wenatchee, WA.
- Guo, J. y Chong Lua, A. (1998). Characterization of chars pyrolyzed from oil palm stones for the preparation of activated carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 46(2), 113–125.
- Gutiérrez, L.F.; Sánchez, O.J. y Cardona, C. a. (2009). Process integration possibilities for biodiésel production from palm oil using ethanol obtained from lignocellulosic residues of oil palm industry. *Bioresource technology*, 100(3), 1227–37.
- Halim, R. M.; Bakar, N. A.; Wahid, M. B.; May, C.Y.; Ahmad, A.H.; Ngan, M.A.; Ramli, R.; et al. (2009). Maximizing the Recovery of Dry Shell and Kernel via a Four Stage Winnowing Column. *Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, Pipoc 2009. International Palm Oil Congress* (p. 54). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- Joseph, S. D.; Camps-Arbestain, M.; Lin, Y.; Munroe, P.; Chia, C. H.; Hook, J.; van Zwieten, L.; et al. (2010). An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 48(7), 501.
- Kelly-Yong, T.L.; Lee, K.T.; Mohamed, A.R. y Bhatia, S. (2007). Potential of hydrogen from oil palm biomass as a source of renewable energy worldwide. *Energy Policy*, 35(11), 5692–5701.
- Lacrosse, L. (2010). Tecnologías limpias y eficientes de cogeneración con biomasa en la Asociación de Países del Sudeste Asiático (Asean). Clean and efficient biomass-based cogeneration technologies in South East Asian Countries (Asean). *Palmas*, 31(Especial), 103 – 110.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 381–387.
- Lehmann, J.; Gaunt, J. y Rondon, M. (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 395–419.
- Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O'Neill, B.; Skjemstad, J.O.; et al. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719.
- Lua, A. C. y Guo, J. (1998). Preparation and characterization of chars from oil palm waste. *Carbon*, 36(11), 1663–1670.
- Lua, A. C.; Lau, F. Y. y Guo, J. (2006). Influence of pyrolysis conditions on pore development of oil-palm-shell activated carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 76(1-2), 96–102.
- Major, J.; Rondon, M.; Molina, D.; Riha, S. J. y Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1-2), 117–128.
- Mansoornejad, B.; Chambost, V. y Stuart, P. (2010). Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1497–1506.
- NREL. (2008). Modeling tomorrow's biorefinery the NREL Biochemical Pilot Plant. Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41334.pdf>
- Nasrin, A. B.; Ma, A. N.; Choo, Y.M.; Mohamad, S.; Rohaya, M. H.; Azali, A. y Zainal, Z. (2008). Oil Palm Biomass As Potential Substitution Raw Materials For Commercial Biomass Briquettes Production. *American Journal of Applied Sciences*, 5(6), 179–183.
- Nathaniel Gronewold. (2011, May 2). Biofuels Push Becomes Weapon in Colombia's War on Narco-Traffickers. *The New York Times*. New York. Retrieved from <http://www.nytimes.com/gwire/2011/05/02/02greenwire-biofuels-push-becomes-weapon-in-colombias-war-94778.html?pagewanted=1&ref=energy-environment>
- Novak, J. M.; Busscher, W. J.; Laird, D. L.; Ahmedna, M.; Watts, D. W. y Niandou, M. A.S. (2009). Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science*, 174(2), 105–112.
- Peláez-Samaniego, M.; García Pérez, M.; Cortez, L.; Rosillo-Calle, F. y Mesa, J. (2008). Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1063–1086.
- Shinoj, S.; Visvanathan, R.; Panigrahi, S. y Kochubabu, M. (2011). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 7–22.
- Shuit, S. H.; Tan, K. T.; Lee, K. T. y Kamaruddin, A. H. (2009). Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. *Energy*, 34(9), 1225–1235.
- Singh, R. P.; Ibrahim, M. H.; Esa, N. y 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.
- Sivasothy, K. (2009). Recent Developments in Continuous Sterilization. *Chemistry, Processing Technology & Energy Conference. PIPOC 2009 International Palm Oil Congress*. (p. 9). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- Sivasothy, K.; Basiron, Y.; Taha, R. M.; Hwa, T. Y. y Sulong, M. (2006). Continuous sterilization: The new paradigm for modernizing palm oil mills. *Journal of Palm Research*, (Special Issue), 144 – 152.
- Subramaniam, V.; Menon, R. y Sin, H. (2011). Residual Oil Recovery System - An Avenue to Increase Your Palm Oil Mill's Annual Revenue. *Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, PIPOC 2011. International Palm Oil Congress* (p. 4). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- Tan, H. T.; Lee, K.T. y Mohamed, A. R. (2010). Second-generation bio-ethanol (SGB) from Malaysian palm empty fruit bunch: energy and exergy analyses. *Bioresource technology*, 101(14), 5719–27.
- Tantitham, S.; Khlaisombat, P.; Clendon, J. H.; Campbell-Board, M. y McIntosh, B. (2009). A Review of Three CDM Biogas Projects Based on Palm Oil Mill Effluent in Southern Thailand. *Proceedings of the PIPOC 2009 International Palm Oil Congress (Chemistry & Technology)*. Kuala Lumpur.
- Venderbosch, R.; Assink, D.; Gansekoel, E. y Florijn, J. (2007). Pyrolysis of Empty Fruit Bunches. *npt procestechologie*. Retrieved January 18, 2012, from <http://www.btg-btl.com/uploads/documents/2007-12 NPT Pyrolysis of RV.pdf>
- Verheijen, F.G.A.S.J.; Bastos, A. C.; van der Velde, M. y Diafas, I. (2009). *Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*. Environment (p. 144). Luxembourg.

- Vijayendran, B. (2010). Bio products from biorefineries - trends, challenges and opportunities. *Journal of Business Chemistry*, 7(3), 109–115. Retrieved from <http://www.businesschemistry.org/article/?article=121>
- Woolf, D.; Amonette, J. E.; Street-Perrott, F. A.; Lehmann, J. y Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1(5), 56. doi:10.1038/ncomms1053
- Wright, M. y Brown, R. C. (2007). Establishing the optimal sizes of different kinds of biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(3), 191–200.
- Wu, T.; Mohammad, A.; Jahim, J. y Anuar, N. (2009). A holistic approach to managing palm oil mill effluent (POME): Biotechnological advances in the sustainable reuse of POME. *Biotechnology Advances*, 27(1), 40–52.
- Yamada, H.; Tanaka, R.; Sulaiman, O.; Hashim, R.; Hamid, Z. A.; Yahya, M. K.; Kosugi, A.; *et al.* (2010). Old oil palm trunk: A promising source of sugars for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 34(11), 1608–1613.
- Yáñez-Angarita, E. E. y García Nuñez, J. A. (2009). Technological Developments to Increase the Efficiency of the Clarification Process and to Determine the Oil Potential in Fresh Fruit Bunches. *Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, PIPOC 2009. International Palm Oil Congress* (p. 89). Kuala Lumpur, Malaysia: MPOB.
- Yáñez Angarita, E. E.; Silva Lora, E. E.; da Costa, R. E. y Torres, E. A. (2009). The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia. *Renewable Energy*, 34(12), 2905–2913.