

Alternativas para convertir una planta de beneficio en una biorrefinería*

Alternatives for Converting a Palm Oil Mill into a Biorefinery

AUTORES: Jesús Alberto García-Núñez^{1,2}; Deisy Tatiana Rodríguez¹; Nidia Elizabeth Ramírez-Contreras¹; Electo Eduardo Silva Lora³; Manuel García-Pérez².

CITACIÓN: García-Núñez, J. A., Rodríguez, D. T., Ramírez-Contreras, N. E., Silva-Lora, E., & García-Pérez, M. (2016). Alternativas para convertir una planta de beneficio en una biorrefinería. *Palmas*, 37(Especial Tomo II), pp. 95-106.

PALABRAS CLAVE: plantas de beneficio, biorrefinería, bioaceite.

KEY WORDS: Palm oil mills, biorefinery, bio-oil.

*Artículo original recibido en español.

- 1 Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma. Bogotá, Colombia
- 2 Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica. Washington State University, Pullman, WA, EE.UU.
- 3 Grupo NEST. Universidad Federal de Itajubá. Itajubá, MT, Brazil



JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ
Coordinador Programa de
Procesamiento de Cenipalma
Processing Program Coordinator
of Cenipalma
jgarcia@cenipalma.org

Resumen

Se propone una metodología para evaluar los caminos para la transformación de una agroindustria actual en una biorrefinería, y la implementación de esta metodología para la conversión de una planta de beneficio de aceite de palma colombiano (POM, por sus siglas en inglés) en una biorrefinería. Fueron evaluados seis conceptos de biorrefinería al acoplar una POM de tamaño promedio con tecnologías para la producción de biogás, compost, electricidad, *pellets*, biocarbón y bioaceites.

Fueron utilizados indicadores de impacto económico, ambiental y social para comparar las opciones de la nueva biorrefinería. Los resultados confirman que el uso del efluente de la planta de beneficio de aceite de palma (POM) para la producción de biogás, es una tecnología que afecta positivamente todos los conceptos ya estudiados sobre biorrefinería y, por ende, su implementación debería ser considerada como prioritaria. La producción de compost, *pellets*, biocarbón/calor, biocarbón/bioaceite, desde la biomasa residual generada en el POM, podría conducir a conceptos de biorrefinería con un desempeño ambiental, económico y social, mejores que los obtenidos por la planta de beneficio

convencional usada como línea base. El uso de la metodología propuesta permite concluir que la selección de un concepto de biorrefinería, entre otros, dependerá de los valores sopesados que pueden ser asignados a impactos ambientales económicos y sociales. Los resultados mostrados en este trabajo dependen de los valores calculados, asumidos y encontrados en literatura, los cuales corresponden a unas condiciones específicas y no pueden generalizarse para todas las plantas de beneficio. En este sentido, desde el punto de vista económico, la mejor opción es la producción de *pellets* acoplada con la generación de biogás. Desde lo ambiental, la opción de biorrefinería que combina la producción de biogás y biocarbón pareciera ser la más satisfactoria. Desde el aspecto social, la mejor opción es la que produce principalmente bioaceite más biocarbón y biogás. Detalles más específicos de este trabajo se encuentran en edición en otras revistas científicas.

Abstract

A methodology for the evaluation of paths to convert an existing agroindustry into a biorefinery and the implementation of this methodology for the conversion of a colombian palm oil mill (POM) into a biorefinery is proposed. Six biorefinery concepts were evaluated by coupling an average size POM with technologies for the production of biogas, compost, electricity, pellets, biochar, and bio-oils.

Environmental, economic and social impact indicators were used to compare the new biorefinery options. Results confirm that the use of the palm oil mill effluent (POME) for the production of biogas is a technology that positively impacts all of the biorefinery concepts studied and consequently its implementation should be considered a priority. The production of compost, pellets, biochar/heat and biochar/bio-oil from the residual biomass generated in the POM could lead to biorefinery concepts with much better environmental, economic and social performance than the base line POM. The use of the proposed methodology allow us to conclude that the selection of one of the biorefinery concepts, will depend, among others, on the weighted values that can be assigned to the environmental, economic and social impacts. The following results showed in this paper depend, on the calculated figures, the POM initial conditions, the figures found in literature, etc. Therefore, the results are specific for the conditions considered in this study. From the economic point of view, the pellet production coupled with biogas generation is the best option. From the environmental point of view, the biorefinery option that combines biogas and biochar production seems to be more satisfactory. From the social point of view, the best option is the one that produces mainly bio-oil plus biochar and biogas. More specific details are shown in other papers that are published in other scientific journals.

Introducción

La agroindustria de la palma de aceite se ha convertido en una de las principales fuentes de aceites vegetales en el mundo con 59.228 millones de toneladas al año, seguido de la soya con 45.095 millones de toneladas en 2014^[1]. Los principales productos de comercialización son el Aceite de Palma Crudo (APC) y el Aceite de Palmiste (APL), en promedio 21 y 2 %, respectivamente, del peso de los Racimos de Fruto Fresco (RFF) que se procesan en una planta de beneficio^[1]. En 2014, Colombia produjo 1.109.586 toneladas de APC y 98.563 de APL, posicionándose como el cuarto productor en

todo el mundo e incrementando su producción en 6,6 % respecto al año anterior^[1]. Además del aceite y el palmiste, la biomasa generada en la planta de beneficio representa en promedio 40 % del peso de los RFF (tusa 22 %; fibra 13 % y cuesco 4,5 %), mientras que los efluentes se calculan aproximadamente en 0,8 m³ por tonelada de RFF procesado^[2]. El uso o disposición inadecuada de la biomasa residual puede dar lugar a importantes problemas ambientales. El efluente no tratado puede contaminar las corrientes de agua y los suelos debido a su alto contenido de nutrientes y

materia orgánica. La disposición inadecuada de la tusa en el campo puede fomentar el desarrollo de plagas^[3]. Es por esto que en Colombia se han establecido regulaciones ambientales cada vez más estrictas como respuesta al potencial de impacto de este cultivo^[4]^[5]. Debido a que la biomasa se concentra en la planta de beneficio, se ha incrementado la atención en el uso y aprovechamiento de la misma^[2-12]. El uso de la biomasa para la obtención de productos de valor agregado podría impactar positivamente la sostenibilidad del sector palmero.

La integración de tecnologías para producir nuevos productos con las actuales plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite, en un contexto de evolución de la industria en biorrefinerías, es un tema que ha recibido atención limitada^[8, 9, 13]. Chew y Bathia^[12] estudiaron los procesos catalíticos para la producción de biocombustibles en una biorrefinería de biomasa de palma; sin embargo, los autores no tuvieron en cuenta las interacciones que podrían darse entre una planta de beneficio y las nuevas alternativas de biorrefinerías. Chiew y Shimada^[13] evaluaron diferentes alternativas de aprovechamiento de la tusa o racimos vacíos de palma y su impacto ambiental, sin considerar las sinergias con la planta de beneficio. Kasivisvathanathan *et al.*,^[17] lideraron un estudio para seleccionar alternativas de uso de la biomasa mediante la metodología de optimización “fuzzy”. En este estudio los autores incluyeron los requerimientos técnicos de la planta de beneficio. La optimización se llevó a cabo

basada en el desempeño económico y el potencial total de impacto ambiental de la biorrefinería incluyendo la planta de beneficio. Este estudio no tuvo en cuenta los indicadores de impacto social.

Para cumplir con los nuevos requisitos medioambientales, la evolución gradual de las plantas de beneficio en Colombia en biorrefinerías se presenta como una oportunidad, no solo para cumplir con las normas ambientales, sino también para permitir la comercialización de nuevos bioproductos y, por tanto, mejorar la viabilidad económica de la agroindustria, la generación de nuevos empleos y la contribución al desarrollo rural. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño técnico, ambiental y socioeconómico de seis opciones de biorrefinería.

Selección de los conceptos de biorrefinería

Usando la descripción de la clasificación del nivel de disponibilidad de tecnología reportada por Orend^[18], se seleccionaron las tecnologías de aprovechamiento de la biomasa con potencial de aplicación en la agroindustria de la palma de aceite. La Tabla 1^[18] muestra la clasificación del nivel de disponibilidad de tecnología (TRL, por sus siglas en inglés) y la Tabla 2, los resultados obtenidos por los autores para diferentes tecnologías de aprovechamiento de la biomasa.

Tabla 1. Descripción del nivel de disponibilidad de tecnología (TRL)^[18].

TRL	Descripción
TRL 1	Principios básicos observados
TRL 2	Concepto: concepto tecnológico formulado
TRL 3	Concepto: prueba experimental de concepto
TRL 4	Validación: en laboratorio
TRL 5	Validación: en entorno industrial
TRL 6	Demostración: en entorno industrial
TRL 7	Demostración: prototipo en contexto operacional
TRL 8	Sistema: completo y cualificado
TRL 9	Sistema: probado y económicamente competitivo

Tabla 2. Disposición de la tecnología para los nuevos productos de acuerdo con la anterior revisión de la literatura.

Productos procedentes de diferentes tecnologías	TRL	Productos procedentes de diferentes tecnologías	TRL
Pellets y briquetas	TRL 8	Biocompuestos	TRL 5
Etanol celulósico	TRL 4	pulpa de celulosa y papel	TRL 4
Biocarbón de torrefacción	TRL 4	Bioplástico	TRL 4
Biochar de pirólisis lenta	TRL 6	Hidrógeno y gases de síntesis	TRL 4
Bioaceite de pirólisis rápida	TRL 6	Alimento para rumiantes	TRL 4
Producción y uso de biogás	TRL 9	Químicos a través de tecnologías catalíticas	TRL 3
Carbón activado	TRL 8	Producción de enzimas	TRL 3
Compostaje	TRL 9	Fenol a partir de efluentes	TRL 3
Generación de electricidad	TRL 9		

Evaluación técnica, ambiental y socioeconómica

Se establecieron los modelos técnicos, que contienen balances de masa y requerimientos energéticos de cada uno de los conceptos, integrados a los balances de la cadena productiva ya establecidos de aceite de palma que incluye el cultivo y la extracción en la planta de beneficio, sin transformación de subproductos. Para una capacidad de procesamiento (t RFF/h) en la planta de beneficio, el modelo identificó la disponibilidad de materia prima (biomasa), capacidad de producción de los nuevos productos, el rendimiento del proceso y los servicios industriales requeridos, información indispensable para realizar la evaluación económica, ambiental y social de los conceptos de biorrefinería.

Los modelos de evaluación ambiental de las seis alternativas de uso de la biomasa u opciones de biorrefinería se desarrollaron siguiendo la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Las categorías de impactos calculadas fueron: Potencial de Calentamiento Global (PCG), Eutrofización y la Relación energética (energía renovable generada/energía fósil utilizada).

Los modelos económicos por su parte, hacen referencia al estudio preliminar de prefactibilidad de cada una de las opciones de biorrefinería evaluadas. Con estos modelos se estimó el costo de inversión (CAPEX, por sus siglas en inglés) y operación (OPEX, por sus

siglas en inglés) y se determinaron variables económicas como Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), retorno de la inversión, entre otras, debido a la aplicación de un concepto de biorrefinería en plantas de beneficio.

Los aspectos sociales se evaluaron teniendo en cuenta el número de empleos nuevos generados por el concepto de biorrefinería y el número de empleos nuevos especializados.

Descripción de la línea base y los conceptos de biorrefinería seleccionados

Línea base

La línea base incluye las plantaciones de palma de aceite y la planta de beneficio. La planta de beneficio genera vapor a partir de fibra y cuesco para consumo interno y energía eléctrica en turbinas de contrapresión. En Colombia, la eficiencia de combustión de la caldera es generalmente baja (60-75 %) y la presión de trabajo difiere entre 20 y 40 bar (según información de Cenipalma). En la mayoría de los casos existe una planta de energía basada en diésel para satisfacer las necesidades de energía eléctrica, especialmente cuando no existe un suministro del servicio a través de la red nacional. Alrededor del 37 % de las plantas de beneficio colombianas (según información de Cenipalma) tienen las características señaladas en la Figura 1.

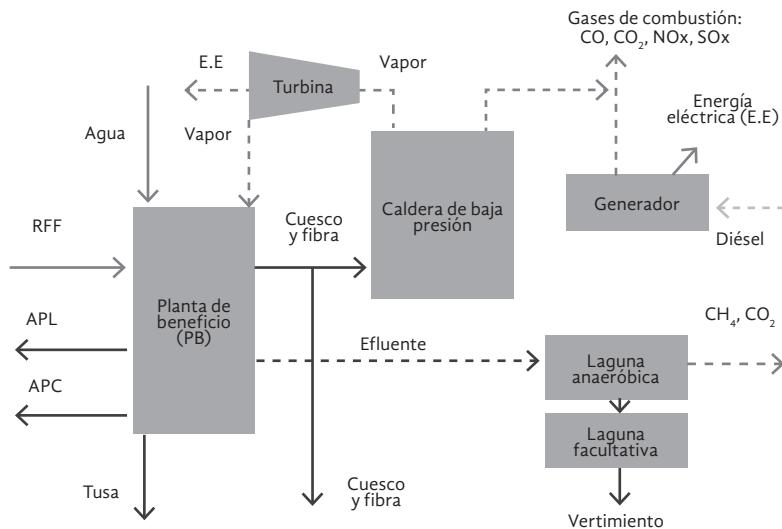


Figura 1. Diagrama de la línea base de la cadena productiva del APC.

Las tecnologías seleccionadas a través del análisis del grado de madurez TRL fueron: recuperación de biogás para producción de energía eléctrica, compostaje, cogeneración (caldera de biomasa y turbina de vapor), peletización, pirólisis lenta y pirólisis rápida.

A continuación se describen los conceptos de biorrefinería propuestos en este estudio.

Concepto 1: producción de biogás, recolección y usos

La recuperación del biogás es la primera alternativa que se integra al esquema de producción de una plan-

ta de beneficio (Figura 2). Considerando que en esta alternativa solo se utiliza el efluyente como materia prima, y que no hay competencia con otras alternativas para el uso de la biomasa sólida, la integración de esta alternativa ha sido contextualizada en todos los casos con las otras opciones de biorrefinería que se describirán en esta sección. La tecnología de biogás comprende la captura de biogás mediante la cobertura de la laguna de oxidación anaeróbica para el tratamiento convencional (línea de base); luego, el biogás pasa por una batería de filtros de H_2S y extracción de humedad antes de enviarlo a un motor de combustión interna readaptado para generar electricidad.

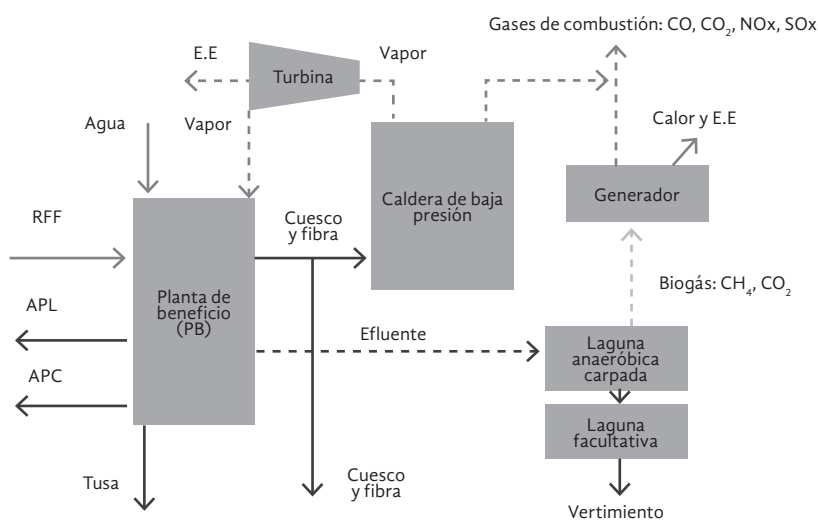


Figura 2. Biorrefinería: planta de beneficio con producción de biogás.

Concepto 2: compostaje y plantas de biogás

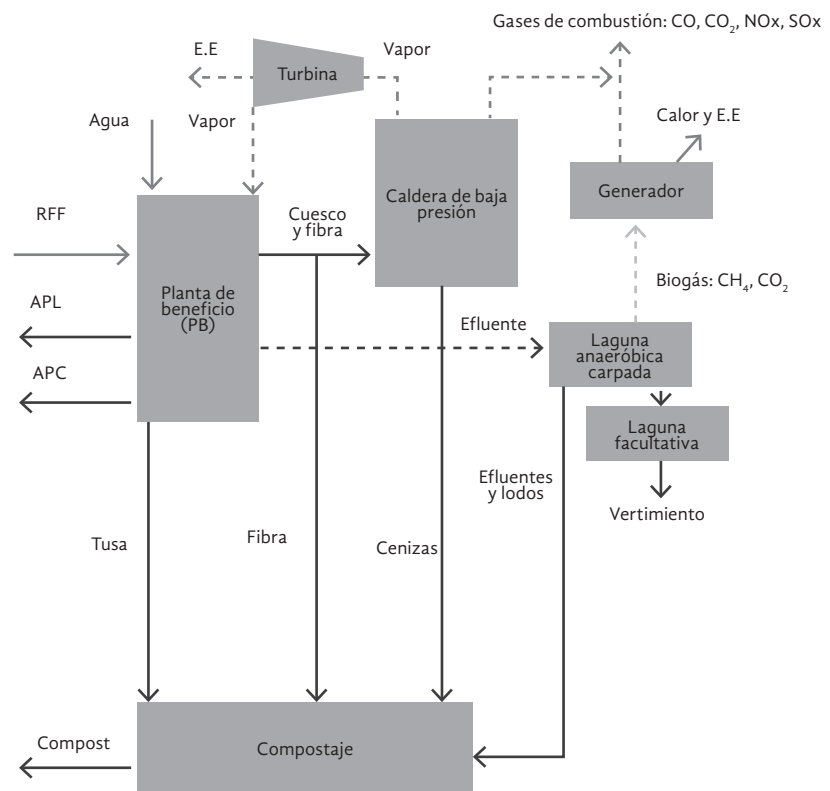
En Colombia, la tecnología de compostaje comúnmente usada en la industria de la palma de aceite es la construcción de pilas abiertas, seguida del uso de coberturas (invernaderos) que permiten un mayor control de las condiciones del proceso.

El proceso de compostaje consiste en la degradación aeróbica de la biomasa (tusa, fibra, efluentes, etc.). La biomasa sólida se dispone en pilas y, los efluentes y lodos de fondo de la laguna anaeróbica son aplicados a las pilas para alcanzar los niveles de temperatura y humedad requeridos por los procesos mesofílicos y termofílicos que se presentan durante el proceso de degradación. Después de 2.5 a 3.0 meses se obtiene el compost, un abono rico en nutrientes y materia orgánica que servirá como enmienda en los suelos y como complemento en la fertilización química del cultivo de palma (Figura 3).

Concepto 3: cogeneración de alta eficiencia y planta de biogás

En los sistemas de cogeneración de alta eficiencia se produce vapor en calderas de alta presión (mayor a 40 bar), el vapor puede ser producido a partir de tusa, fibra y cuesco, por lo que se recomienda la implementación de una unidad de secado para acondicionar la biomasa antes de ser ingresada a la caldera. Estos sistemas pueden alcanzar eficiencias alrededor de 80 % si se tiene una unidad de recuperación de calor en las calderas. Análogamente, con vapor de buena calidad es posible garantizar una eficiencia aceptable en la turbina de vapor de condensación/extracción para generar electricidad (Figura 4). Durante el proceso de secado de la biomasa sólida, el uso de gases de combustión y el exceso de vapor de la caldera ha sido considerado. Asimismo, esta alternativa implica la generación de biogás, el cual puede ser usado para aumentar la red de generación de energía y para el suministro de una parte de las necesidades de energía térmica para secar la biomasa sólida con gases de combustión de biogás.

Figura 3. Biorrefinería: planta de beneficio con producción de biogás y compostaje.



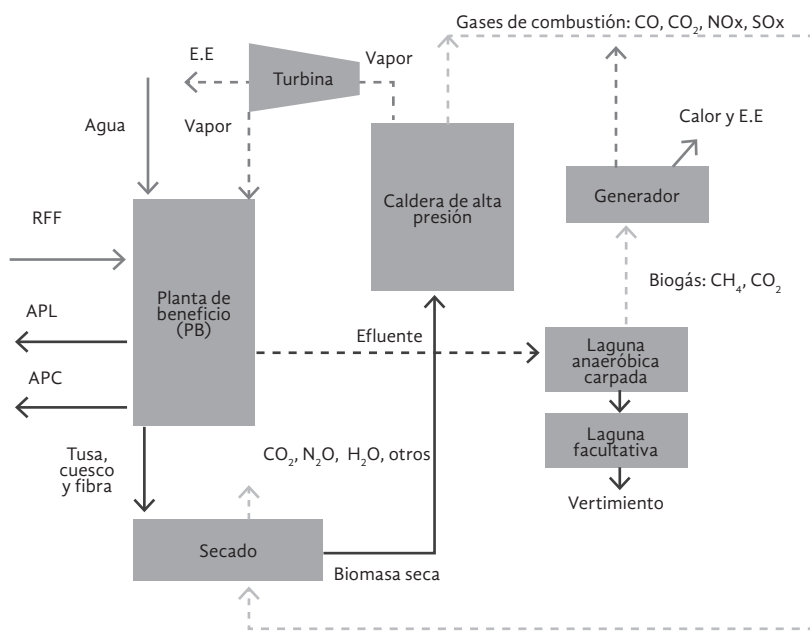


Figura 4. Biorrefinería: planta de beneficio con cogeneración y biogás.

Concepto 4: producción de *pellets* y plantas de biogás

Para la integración de un módulo de producción de *pellets* acoplada a una planta de beneficio, es necesario considerar en primera instancia que una fracción de la fibra y cuesco es utilizada en la producción de vapor y energía eléctrica para consumo interno, mientras que el excedente de la biomasa puede ser utilizado para la producción de *pellets*. La tusa, por

otro lado, puede emplearse exclusivamente para la producción de *pellets*. Para esta alternativa, la biomasa debe ser secada y picada con el fin de ajustar su tamaño y humedad antes de la peletización. Los *pellets* pueden ser vendidos y utilizados para la calefacción de casas y combustión en los sistemas de generación de energía en una variedad de industrias^[19] Además, como ocurre con las otras opciones, este concepto contempla el aprovechamiento del biogás como se ve en la Figura 5.

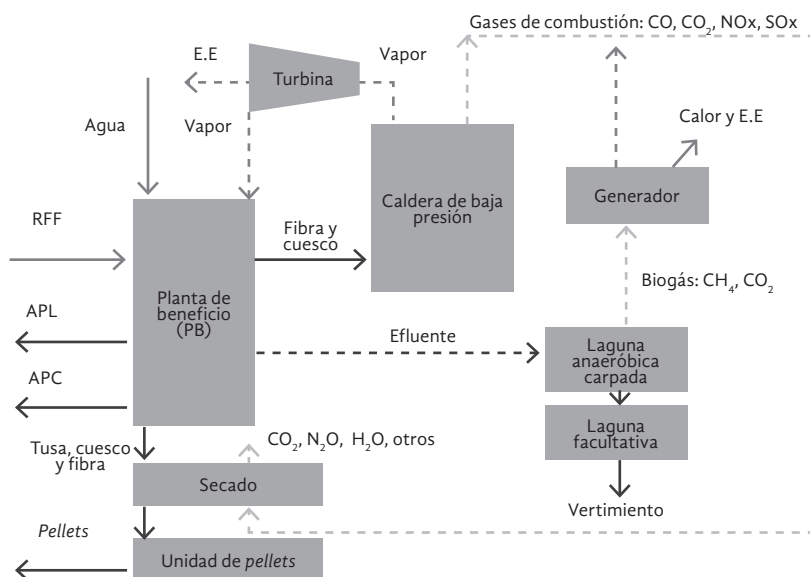


Figura 5. Biorrefinería: planta de beneficio con producción de *pellets* y planta de biogás.

Concepto 5: pirólisis lenta con recuperación de calor y planta de biogás

La pirólisis consiste en la degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno para obtener biocarbón, bioaceites y gases de síntesis (CO , H_2 y CH_4). Con el conocimiento de las cinéticas de reacción se puede favorecer la producción de uno de los tres productos, modificando las condiciones de operación^[20]. En la pirólisis lenta se favorece la producción de biocarbón debido a las bajas tasas de calentamiento y al alto tiempo de residencia. La biomasa debe ser picada y secada antes de ingresar al reactor de pirólisis. Los vapores generados en el proceso de pirólisis son quemados en la caldera para impedir la liberación de componentes como el metano (CH_4), el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos pesados y los oxigenados. El secado de biomasa se realizará utilizando los gases procedentes de la combustión del biogás y la biomasa en la caldera (Figura 6).

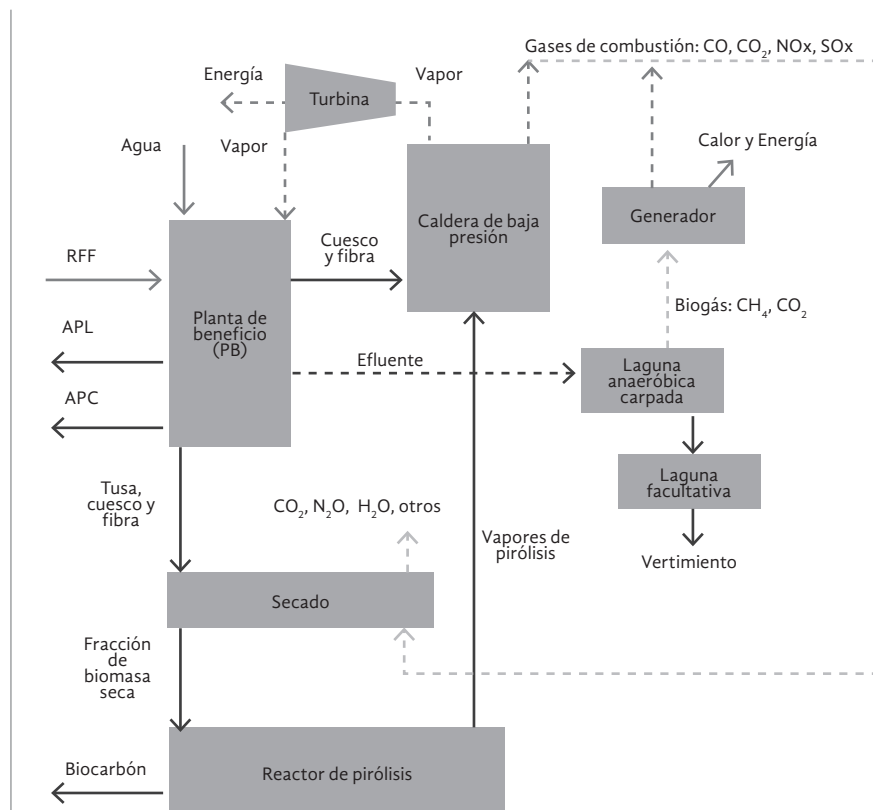
El biocarbón obtenido puede ser utilizado en el mejoramiento del suelo o con algunos tratamientos

adicionales (tales como la oxidación o la activación) para la eliminación de contaminantes del efluente a través de los filtros de remoción.

Concepto 6: pirólisis rápida para la producción de bioaceite y biocarbón y planta de biogás

El módulo de producción de bioaceites es similar al de la producción de biocarbón, con algunas diferencias en las condiciones de operación y con un reactor de pirólisis específico para tal fin. La biomasa pasa por un proceso de acondicionamiento (secado y picado) igual al de pirólisis lenta; sin embargo, para alcanzar el tamaño requerido para la pirólisis rápida (menos de 2 mm)^[21], es necesario agregar un paso al proceso de molienda. Los vapores de la pirólisis obtenidos pasan a través de un sistema de condensación donde el bioaceite es separado de los gases de síntesis^[22]. Los gases son enviados a la caldera para recuperación de energía (Figura 7). El bioaceite es un producto con potencial como combustible o para la producción de productos químicos de alto valor añadido.

Figura 6. Biorrefinería: planta de beneficio con producción de biochar y planta de biogás.



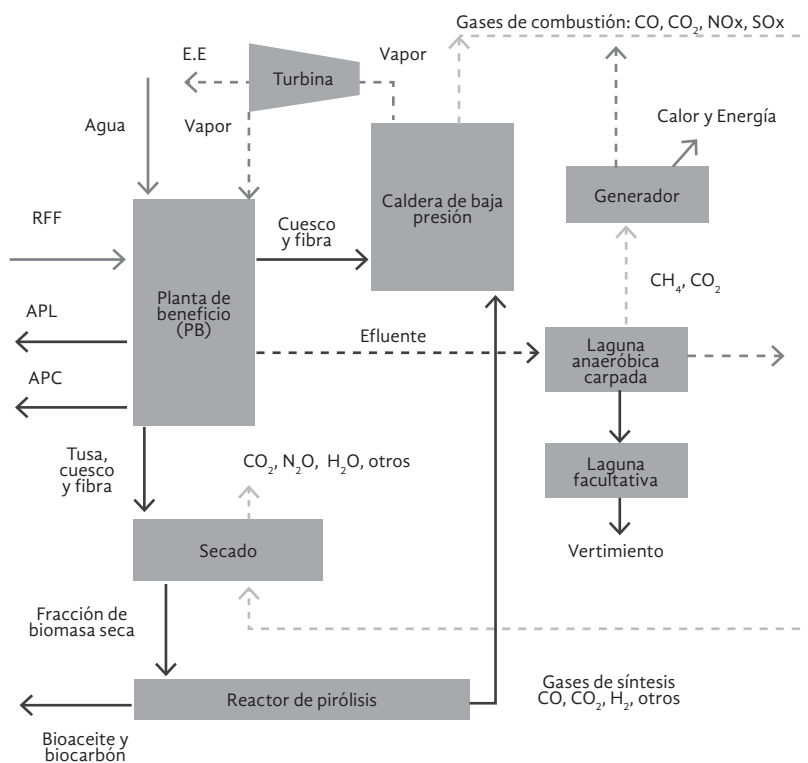


Figura 7. Biorrefinería: planta de beneficio con producción de bioaceite y planta de biogás.

Resultados de los modelos ambientales y socioeconómicos de conceptos de biorrefinerías

Los productos generados en los conceptos de biorrefinería propuestos se presentan en la Tabla 3. En todos los conceptos la tecnología de biogás aporta excedentes de energía y para los conceptos 4, 5 y 6 se convierte en una fuente de energía para la operación de las diferentes unidades de proceso, lo que representa una ventaja de aprovechamiento de la energía

local disponible en la planta de beneficio sin generar consumos adicionales de fuentes externas de energía.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los modelos ambientales y socioeconómicos de las opciones de biorrefinería estudiadas en las condiciones de este estudio. Los resultados evidencian que el Concepto 5 presentó el mejor desempeño ambiental debido a las ventajas de disponer el biocarbón en las plantaciones de palma. La tecnología de biogás tiene un potencial de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) mayor a 80 % debido a la mitigación de la emisión

Tabla 3. Productos generados por los conceptos de biorrefinería.

Concepto de biorrefinería	Productos generados
Concepto 1	60,6 kWh/ t RFF
Concepto 2	207 kg compost/ t RFF; 60 kWh/ t RFF
Concepto 3	124,5 kWh/ t RFF
Concepto 4	124,8 kg pellets/ t RFF; 22,5 kWh/ t RFF
Concepto 5	43,9 kg biocarbón/ t RFF; 36,4 kWh/ t RFF
Concepto 6	63,2 kg bioaceite/ t RFF; 37,4 kWh/ t RFF

Tabla 4. Resultados de la evaluación ambiental y socioeconómica de seis conceptos de biorrefinería.

	Ambiental			Económico			Social	
	PCG (kg CO ₂ /t RFF)	Eutrofización (kg PO ₄ /T RFF)	Relación energética neta	Ingresos extra (\$/t RFF)	VPN (USD)	Año de retorno de la inversión	# nuevos empleos	# empleos especializados
Línea base	-437,64	1,23	18,11	0	\$ -			
C1	-585,61	1,23	18,48	3,27	\$ 2.503.413	6	2	0,5
C2	-663,67	0,86	17,71	4,50	\$ 3.420.399	5	6	1
C3	-569,43	0,98	18,99	1,93	\$ -(4.819.092)	26	5	0,5
C4	-593,33	0,98	22,88	12,82	\$ 13.953.493	3	7	1
C5	-872,64	0,98	18,29	-2,14	\$ -9.344.456)	26	7	1
C6	-584,36	0,98	21,33	9,61	\$ 6.820.962	8	8	1

de metano en las lagunas anaeróbicas y, por tanto, aporta el mismo porcentaje a todos los conceptos de biorrefinería evaluados. El potencial de eutrofización se mantuvo constante en el Concepto 1, pero se redujo en los demás conceptos debido a que se evita la emisión de la degradación de la biomasa. La relación energética (energía renovable/energía fósil) mostró un aumento en todos los conceptos de biorrefinería a excepción del Concepto 2, en el que se presenta el consumo de combustible fósil (diésel) y, en el que el *compost* no es una fuente de energía renovable.

En la categoría económica el Concepto 4 es el que mejor desempeño mostró debido al bajo costo de inversión, comparado con otras tecnologías y al potencial de venta de *pellets* generados en mercados internacionales como el europeo. Los conceptos 3 y 5 presentaron inviabilidad económica en el ejercicio realizado, con una tasa de oportunidad de 10 %, debido al costo de inversión y al costo de venta de la energía eléctrica. En el caso específico del Concepto 5, el modelo contempló el uso del biocarbón en la plantación con un costo de venta equivalente a una enmienda orgánica; sin embargo, se conocen precios de venta superiores al valor usado, lo que mejoraría los indicadores económicos de este concepto. Por otro lado, es importante resaltar que la tecnología de pirólisis se encuentra aún en desarrollo y, por tanto, se espera la reducción de los costos de inversión una vez alcance un mayor grado de madurez tecnológica.

En el factor de impacto social el Concepto 6 es el que presentó el mejor desempeño debido a la generación de mayor número de empleos, mientras que el Concepto 1, el menor desempeño debido a que solo tiene en cuenta la tecnología de biogás.

Conclusiones

- Se construyeron modelos técnicos, ambientales y socioeconómicos para la evaluación de opciones de biorrefinería.
- La recuperación de biogás en la laguna anaeróbica mitiga las emisiones de GEI de la laguna anaeróbica en 80 %, convirtiéndose en la alternativa que mayor contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La implementación de conceptos de biorrefinería en la planta de beneficio en todos los casos reduce las emisiones de GEI respecto a la línea base.
- El Concepto 4 presentó los mejores indicadores económicos seguido del Concepto 6.
- Los conceptos 5 y 6 pueden presentar mejores indicadores económicos en tanto la tecnología de pirólisis alcance un mayor grado de madurez.
- Bajo las consideraciones del modelo económico, los conceptos 3 y 5 no fueron factibles económicamente.
- La integración de la tecnología de biogás con la producción de *pellets* resuelve los altos requerimientos

de energía eléctrica en el proceso de peletización, siendo en conjunto autosuficiente y generando los mejores resultados de indicadores económicos.

- Los resultados aquí presentados corresponden a las condiciones específicas con las cuales se trabajaron los modelos y no pueden ser generalizadas para

todas las plantas de beneficio. Un cambio en sus condiciones iniciales, la cercanía a la red eléctrica nacional, el uso final que se dé a productos de las biorrefinerías, la competencia con los usos actuales de la biomasa, entre otros factores, cambiarán drásticamente los resultados mostrados en este estudio.



Bibliografía

- [1] Fedepalma, *Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo*. 2015.
- [2] J. A. García-Núñez; M. Cardenas M., and E. E. Yañez A, "Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia," *Palmas*, vol. 31, no. 2, pp. 41–48, 2010.
- [3] ICA-Cenipalma, "Plan de manejo de la mosca de estable. *Stomoxys Calcitrans*." p. 34, 2002.
- [4] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 909 de 2008*. Colombia, 2008, p. 36.
- [5] M. de A. y D. S. de C. MADS, *Proyecto de Norma 2013 - Versión 7*. Colombia, 2013, p. 30.
- [6] H. Stichnothe and F. Schuchardt, "Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis," *Int. J. Life Cycle Assess*, vol. 15, pp. 907–915, 2010.
- [7] F. Arrieta; F. Teixeira; E. Yañez; E. Lora; and E. Castillo. "Cogeneration potential in the colombian palm oil industry: Three case studies," *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 7, pp. 503–511, Jul. 2007.
- [8] T. Yoshizaki; Y. Shirai; M. A. Hassan; A. S. Baharuddin; N. M. Raja Abdullah; A. Sulaiman; and Z. Busu. "Improved economic viability of integrated biogas energy and compost production for sustainable palm oil mill management," *J. Clean. Prod.*, vol. 44, pp. 1–7, Apr. 2013.
- [9] T. Yoshizaki; Y. Shirai; M. A. Hassan; A. S. Baharuddin; N. M. R. Abdullah; A. Sulaiman; and Z. Busu. "Economic analysis of biogas and compost projects in a palm oil mill with clean development mechanism in Malaysia," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 14, no. 6, pp. 1065–1079, Jul. 2012.
- [10] A. B. Nasrin; Y. M. Choo; W. S. Lim; L. Joseph; S. Michael; M. H. Rohaya; A. A. Astimar; and S. K. Loh. "Briquetting of Empty Fruit Bunch Fibre and Palm Shell as a Renewable Energy Fuel," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 6, pp. 446–451, 2011.
- [11] C. Bessou; L. D. C. Chase; I. E. Henson; A. F. N. Abdul-Manan; L. Milà i Canals; F. Agus; M. Sharma; and M. Chin. "Pilot application of Palm GHG, the RSPO greenhouse gas calculator for oil palm products," *J. Clean. Prod.*, no. April, pp. 1–10, Dec. 2013.
- [12] T. L. Chew and S. Bhatia. "Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7911–22, Nov. 2008.
- [13] Y. L. Chiew and S. Shimada. "Current state and environmental impact assessment for utilizing oil palm empty fruit bunches for fuel, fiber and fertilizer – A case study of Malaysia," *Biomass and Bioenergy*, vol. 51, pp. 109–124, 2013.
- [14] S. Prasertsan and B. Sajjakulnukit. "Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 5, pp. 599–610, Apr. 2006.
- [15] S. Mekhilef; R. Saidur; A. Safari; and W. E. S. B. Mustaffa. "Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 7, pp. 3360–3370, Sep. 2011.

- [16] S. H. Chang. "An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production," *Biomass and Bioenergy*, vol. 62, pp. 2–9, 2014.
- [17] H. Kasivisvanathan; R. T. L. Ng; D. H. S. Tay; and D. K. S. Ng. "Fuzzy optimisation for retrofitting a palm oil mill into a sustainable palm oil-based integrated biorefinery," *Chem. Eng. J.*, vol. 200–202, pp. 694–709, Aug. 2012.
- [18] R. P. Overend. "Process integration, project development, implementation and commercialization," in *Fast Pyrolysis of Biomass: A specialists' workshop.*, 2014, no. December.
- [19] A. Uslu; A. Faaij; and P. Bergman. "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation," *Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 1206–1223, Aug. 2008.
- [20] J. A. Garcia-Nunez. "Evaluation of new concepts for palm oil mill Biorefineries: Methodologies to design pyrolytic reactors and engineered biochars," 2012.
- [21] J. Shen; X.-S. Wang; M. Garcia-Perez; D. Mourant; M. J. Rhodes; and C.-Z. Li. "Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass," *Fuel*, vol. 88, no. 10, pp. 1810–1817, Oct. 2009.
- [22] M. Garcia-Perez; J. A. Garcia-Nunez; T. Lewis; C. Kruger; and S. Kantor. "Methods for Producing Biochar and Advanced Bio-fuels in Washington State. Part 3: Literature Review of Technologies for Product Collection and Refining. third Project Report.," Pullman, WA, 2011.