

SESIÓN 3: USOS ALTERNOS DE LA BIOMASA

Convirtiendo una planta de beneficio en una biorrefinería: paso de tecnologías por el valle de la muerte*

Turning an Oil Palm Mill into a Biorefinery:
The Passage of Technologies through the Valley of Death



JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ
Coordinador del Programa de
Procesamiento de Cenipalma
Processing Program Coordinator,
Cenipalma
Colombia

AUTORES: Jesús Alberto García Núñez, Darlis Varón Cárdenas y Juan Camilo Barrera Hernández. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma

CITACIÓN: García, J. A., Varón, D., & Barrera, J. C. (2019). Convirtiendo una planta de beneficio en una biorrefinería: paso de tecnologías por el valle de la muerte. *Palmas*, 40 (Especial, Tomo II), 76-103.

PALABRAS CLAVE: bioeconomía, biomasa de aceite de palma, biorrefinerías, nivel de madurez tecnológica, sistemas de innovación tecnológica.

KEYWORDS: Bioeconomy, palm oil biomass, biorefineries, level of technological maturity, technological innovation system.

*Artículo original recibido en español.

Resumen

La agroindustria del aceite de palma, además de producir el aceite vegetal más consumido en el mundo, está comprometida con el cumplimiento de estándares de sostenibilidad. Para esto es necesario el ajuste de prácticas de manejo de los subproductos generados en las plantas de beneficio. Uno de los usos actuales de la biomasa es la generación de energía térmica y eléctrica. Sin embargo, su utilización en una planta de beneficio de aceite de palma debe abordarse como una biorrefinería que genere valor agregado. Para lograrlo, es preciso identificar los productos promisorios que puedan ser desarrollados con rutas de conversión y nivel de madurez tecnológica (TLR, por su sigla en inglés), que superen la etapa de comercialización en el mercado nacional e internacional. Cada una de dichas etapas incluye la aplicación y seguimiento de indicadores que envuelven temas como cambios de uso de suelo (LUC, por su sigla en inglés), biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y empleo del agua, entre otros.

En este documento se realiza una revisión de las alternativas tecnológicas actualmente disponibles para aplicar en plantas de beneficio, de acuerdo con el tamaño de escala que se pretende alcanzar. Se hace énfasis en las perspectivas y tendencias actuales del mercado de bioproductos en fase de escalamiento industrial, que pueden ser utilizadas en plantas de beneficio de aceite de palma sostenible, integrando tecnologías que permitan abrir nuevos mercados de biomasa. Se presentan algunos estudios de caso para ilustrar el enfoque propuesto de lograr infraestructuras estratégicas, con rendimiento económico y un mínimo impacto ambiental.

Abstract

The palm oil agroindustry, in addition to producing the most consumed vegetable oil in the world, is committed to meeting sustainability standards. For this, the adjustment of management practices of the by-products generated in the oil palm mills is necessary. One of the current uses of biomass is the generation of thermal and electrical energy. However, its use in a palm oil mill should be addressed as a biorefinery that generates added value. To achieve this, it is necessary to identify promising products that can be developed with conversion paths and Technology Readiness Level (TLR), which exceed the marketing stage in the national and international market. Each of these stages includes the application and monitoring of indicators that involve issues such as land use changes (LUC), biodiversity, greenhouse gas (GHG) emissions and water use, among others.

In this document, a review of the technological alternatives currently available to be applied in oil palm mills is carried out, according to the scale size that is intended to be achieved. Emphasis is placed on the current perspectives and trends of the bioproduct market in industrial scaling phase, which can be used in sustainable oil palm mills, integrating technologies that allow new biomass markets to be opened. Some case studies are presented to illustrate the proposed approach of achieving strategic infrastructure, with economic yields and minimal environmental impact.

Introducción

La bioeconomía industrial está interesada en la conversión de biomasa en productos que satisfagan las necesidades humanas, al reemplazar las materias primas de origen fósil por materias primas renovables. En términos prácticos, una opción es la construcción de biorrefinerías en las que se pueda hacer una conversión eficiente de biomasa, obteniendo productos de mayor valor agregado. Las biorrefinerías se consideran una parte integral del desarrollo hacia una futura bioeconomía sostenible. Bajo esta iniciativa, se encuentra el modelo de economía circular, que puede entenderse como aquella de la que se derivan los componentes básicos para materiales, productos químicos y energía, a partir de recursos renovables. Este concepto puede ser abordado a través de una economía baja en carbono, sostenible y competitiva. La agroindustria de aceite de palma en Colombia ha venido trabajando en los últimos años en modelos de

producción sostenible, donde se destaca la obtención de energía renovable y aprovechamiento de recursos como la biomasa. La utilización de la biomasa es reconocida como un componente crítico en los planes estratégicos de las naciones, para hacer frente a la dependencia energética de recursos fósiles y volatilidad de los precios del petróleo. Se proyecta que la energía primaria generada por biomasa aumente el equivalente de 1.827 MT de petróleo para 2030 (12 % de la demanda mundial total) (International Energy Agency, 2018). De igual forma, se cuenta con marcos de referencia para la fabricación de productos provenientes de biomasa que involucran la sostenibilidad en toda la cadena de producción a nivel social, ambiental y económico.

La estrategia del sector palmero en Colombia ha sido el uso eficiente de biomasa en la cadena de suministro de aceite de palma, desde la perspectiva de conversión de plantas de beneficio a biorrefinerías, teniendo en cuenta las importantes cantidades de

biomasa generada por hectárea cultivada, en comparación con otros cultivos oleaginosos y bioenergéticos (García & Yáñez, 2010). En la evaluación realizada por Cenipalma en el 2016 (García *et al.*, 2016a) sobre usos de biomasa y tecnologías de conversión más prometedoras, se destacaron la producción de pellets y briquetas, obtención de etanol celulósico, torrefacción, pirólisis, producción de biogás (degradación anaeróbica), compost y generación de energía eléctrica. Estas opciones tecnológicas fueron consideradas viables por la disponibilidad de materia prima durante todo el año. En la actualidad, los usos de la biomasa en el sector palmero son como materia orgánica para los cultivos (tusa), formulación de productos para alimentación animal (torta de palmiste) y como combustible (fibra, cuesco) para sistemas de generación de vapor (García y García, 2013; García *et al.*, 2016a; Ramírez *et al.*, 2015).

La proyección de una planta de beneficio en una biorrefinería, requiere herramientas que permitan seleccionar la mejor ruta de acuerdo con la infraestructura y potencial de producción de la planta para elegir productos sostenibles que generen valor agregado. Por otro lado, la inversión de recursos en investigación y desarrollo es uno de los factores claves para lograr que las biorrefinerías superen el “valle de la muerte” hacia mayores inversiones comerciales. De igual forma, es importante la participación de políticas gubernamentales que faciliten la integración de estas en toda la cadena de producción del aceite de palma y favorezcan su comercialización. Aun así, el principal reto es la creación y posicionamiento en el mercado de estos productos.

El propósito de esta revisión es mostrar que es posible el desarrollo de biorrefinerías con tecnologías de conversión de biomasa de aceite de palma en productos de alto valor agregado. Las alternativas tecnológicas y productos de biorrefinería que fueron estudiados están enfocadas en biocombustibles, bioproductos y bioenergía, dentro de un amplio portafolio de métodos y rutas que han sido reportadas a nivel mundial, considerando aspectos normativos, nivel de madurez y de adopción. De igual forma, se estimó la importancia de la conformación de clústeres energéticos a través de alianzas estratégicas del sector, de manera que se generen efectos positivos en la competitividad de la agroindustria de palma, con adecuada

redistribución de los beneficios y acceso a los recursos productivos. Los escenarios que se consideraron más convenientes están fundamentados en modelos económicos y análisis de ciclo de vida.

Problemática ambiental y palma de aceite

Cambio climático, seguridad alimentaria, generación de energía y contaminación ambiental, se encuentran entre las mayores amenazas y desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Esta preocupación ha llevado a organizaciones gubernamentales, industrias y sociedad, a la búsqueda de tecnologías sostenibles que permitan alcanzar políticas climáticas a largo plazo, con la cooperación estratégica de actores privados y públicos (Roome, 2004). Dentro de las alternativas energéticas sustentables, el aprovechamiento de biomasa ha despertado interés a nivel mundial para sustituir combustibles y productos químicos provenientes de fuentes no renovables (García & Yáñez, 2010).

De hecho, se espera que la energía primaria generada por biomasa aumente a un equivalente de 1.827 MT de petróleo hasta 2030 (12 % de la demanda total mundial). Sin embargo, la apertura de nuevos mercados basados en biomasa (bioeconomía) implica mayor inversión en investigación e innovación (Ramírez & Faaij, 2018). Las biorrefinerías a partir de la biomasa, pueden potencialmente conducir a un mejoramiento ambiental, social y económico de las agroindustrias y aumentar la sostenibilidad en el contexto nacional y mundial. Este concepto, además de brindar oportunidades a lo largo de toda la cadena de suministro, favorece el desarrollo económico (Figura 1).

Por otra parte, los esfuerzos internacionales en torno a la reducción de la deforestación, en gran medida impulsados por movimientos sociales, ambientales y de consumidores, han presionado a que se apliquen progresivamente estándares elevados para la agroindustria. Todo con el fin de disminuir la problemática de deforestación asociada a la producción global de materias primas, con actividades de mayor expansión y uso masivo como es el caso de la palma de aceite (Sudeste Asiático) y la soya (Brasil). Por esta razón, el Foro de Bienes de Consumo (CGF, por su sigla en inglés), emitió en 2010 una Resolución sobre

Cero Deforestación Neta, con la que sus miembros se comprometen a eliminar a 2020 la deforestación asociada al aceite de palma, soya, carne vacuna, pulpa y papel. A partir de ese compromiso, surgió la iniciativa global Tropical Forest Alliance 2020 (TFA 2020), creada en 2012 en la Conferencia Mundial sobre Desarrollo Sostenible Río +20, como una alianza donde sus asociados se comprometen voluntariamente a desarrollar acciones individuales y colectivas para reducir la deforestación de bosques tropicales y eliminar la huella de deforestación.

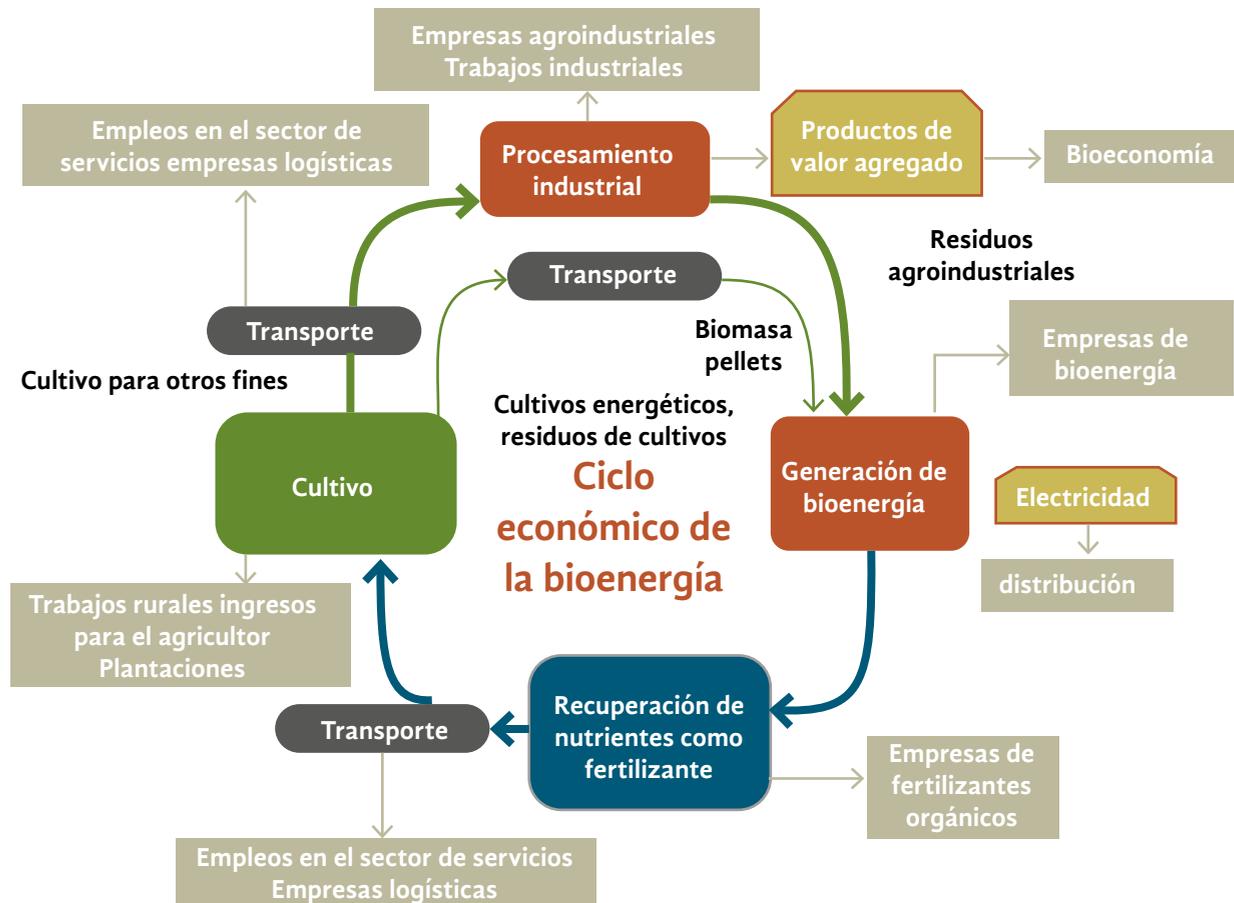
Colombia ha suscrito pactos internos y a nivel internacional para disminuir su tasa de deforestación gradualmente como aporte nacional a la reducción de emisiones de GEI. En 2015 firmó, con los gobiernos

de Noruega, Alemania y Reino Unido, una Declaración Conjunta de Intención sobre cooperación para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero provenientes de la deforestación, la degradación de los bosques (REDD+) y la promoción del desarrollo sostenible, en la que se promueven varios hitos que incluyen los acuerdos de cero deforestaciones con algunas cadenas productivas. Desde el 2017, el Gobierno colombiano es miembro formal de TFA 2020, siendo el primer país de América Latina en adherirse a esta alianza (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017).

El sector palmero es uno de los segmentos de la agroindustria colombiana que ha presentado crecimiento constante, al aumentar a una tasa promedio

Figura 1. Diagrama conceptual del ciclo económico de la bioenergía.

Fuente: tomado y adaptado de Sadhukhan *et al.* (2018)



del 9,2 % en la última década (Fedepalma, 2018), siendo la sostenibilidad uno de los pilares de Fedepalma, desde la creación de la Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible (RSPO, por su sigla en inglés) en el 2004. Adicionalmente, el sector cuenta con el Proyecto GEF “Paisaje Palmero Biodiverso, PPB”, en asocio con WWF, el Instituto Alexander von Humboldt y Cenipalma, para generar guías prácticas de planificación de proyectos palmeros conservando los bosques y otras áreas con alto valor de conservación (AVC); incorporación de herramientas de manejo del paisaje biodiverso (HMP) y adopción de buenas prácticas agrícolas con un enfoque agroecológico.

De igual forma, firmó el “acuerdo de voluntades para la deforestación cero en la cadena de aceite de palma” en el 2017, cuyo objetivo fue visibilizar que

el aceite de palma se produce libre de deforestación y eliminar la huella de deforestación que ya existía en la palmicultura colombiana. El acuerdo busca fortalecer la cultura empresarial de vanguardia del sector, en términos de responsabilidad ambiental y social, con el fin de impulsar el trabajo conjunto con diferentes actores para adherirse al propósito de “cero deforestaciones” en la cadena productiva y de abastecimiento. La competitividad del sector está íntimamente ligada a su desempeño ambiental, situación que refuerza la necesidad de avanzar en medidas como las que promueve este acuerdo para atender los requerimientos de consumidores y mercados cada vez más exigentes en temas asociados a la sostenibilidad. De esta forma, programas de certificación como RSPO y Rainforest Alliance son cada vez más exigidos (Tabla 1).

Tabla 1. Esquemas de certificación actuales de aceite de palma sostenible. Fuente: adaptado de Jusoh *et al.* (2018).

Certificación	Objetivo	Nivel de aplicación
Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible (RSPO por su sigla en inglés)	Promover la producción y uso de aceite de palma con criterios de sostenibilidad ambiental, social y económica.	Se fundamenta en dos estándares. <ul style="list-style-type: none"> - El de la producción de aceite de palma sostenible es utilizado por los cultivadores y plantas de beneficio para implementar prácticas sostenibles de producción, y por los organismos para verificar su adopción en campo. - El de la cadena de suministro describe los requerimientos para garantizar el control y trazabilidad del aceite de palma certificado, sus derivados y productos a lo largo de la cadena de valor, desde la planta de beneficio hasta el usuario final.
Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC, por su sigla en inglés)	Certificación para las industrias de biomasa y bioenergía, en el uso sostenible de la tierra, protección de la biosfera natural y sostenibilidad social, todo orientado hacia la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de toda la cadena de suministro.	Lineamientos generales para productores, procesadores, comerciales y marcas, para demostrar su compromiso con la gestión sostenible de sus cadenas de suministro. Enfatiza la evaluación de la huella de carbono.
Red de Agricultura Sostenible y Rainforest Alliance (RAS/RA)	Cambiar el uso de la tierra y las prácticas comerciales para reducir sus impactos tanto en la biodiversidad como en la población local. Asimismo, mitigar los riesgos ambientales y sociales asociados a la agricultura.	Directrices globales para productores agrícolas en prácticas que conserven los bosques, aseguren la salud de los suelos, protejan los cuerpos de agua y mejoren la calidad de vida de las personas. Hace hincapié en la evaluación de plantaciones.

Continúa →

Certificación	Objetivo	Nivel de aplicación
Aceite de palma sostenible de Indonesia (ISPO, por su sigla en inglés)	<ul style="list-style-type: none"> - Mejorar la sostenibilidad y competitividad de la industria indonesia de aceite de palma. - Contribuir con los objetivos del Gobierno para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, dando atención a los temas ambientales. 	Lineamientos generales para todas las empresas productoras de aceite de palma en Indonesia sobre prácticas sostenibles. Enfatiza en aspectos ambientales.
Aceite de palma sostenible de Malasia (MSPO, por su sigla en inglés)	-Certificación nacional en Malasia para la producción de aceite de palma sostenible.	Directrices globales para plantaciones, pequeños productores independientes e instalaciones de planta de beneficio de aceite de palma. Se centra en aspectos sociales y ambientales.

Por otro lado, la certificación del sector además de favorecer la comercialización del aceite de palma sostenible abre las puertas al incremento de un mercado de biomasa, diversificando las actividades y fuentes de ingreso económico. Actualmente, los estándares más utilizados en el país son RSPO, RTRS y BONSUCRO (Tabla 2). Si bien Colombia cuenta con las condiciones básicas para desarrollar un sector

sostenible de base biológica, por la disponibilidad de tierras aptas para cultivo sin generar problemas de deforestación, también representa varios desafíos en la producción de biomasa e incorporación de políticas de protección para abordar los desafíos del cambio climático, seguridad alimentaria y generación de energía limpia, dentro de la planificación económica y financiera del país.

Tabla 2. Sistemas de certificación de productos de biomasa y características generales. Fuente: adaptado de Ramírez & Faaij (2018).

Tipo de certificación	Normatividad	Alcance	Aplicación de la norma	Participantes	Método/ Herramienta de contabilidad de GEI
Certificación general	ISCC 202. Versión 3.0 (2016) *	Materias primas y productos: bioenergía, alimentos, alimentación animal, químicos.	Voluntaria	Procesos con múltiples partes interesadas.	Metodología de cálculo de emisiones de GEI.
	RSB versión 3.0 (2016) *	Biomateriales: biocombustibles, productos derivados de biomasa o subproductos.	Voluntaria	Coalición multiparticipativa a nivel mundial.	Calculadora de GEI (RSB, Biograce, otros).
	Icontec-GTC 213 (2011)	Biocombustibles.	Voluntaria	Procesos con múltiples partes interesadas en Colombia.	

Continúa →

Tipo de certificación	Normatividad	Alcance	Aplicación de la norma	Participantes	Método/ Herramienta de contabilidad de GEI
Certificación de bioenergía	GBEP 1a edición (2011)	Bioenergía.	Voluntaria	Líderes del G8.	Herramientas analíticas.
	BETTER BIOMASS NTA 8080-1 (2015) *	Bioenergía y bioproductos	Voluntaria	Gobierno de los Países Bajos.	Herramienta cálculo de GEI BioGrace.
	ISO 13065 (2015)	Bioenergía.	Voluntaria	Líderes del G8.	ISO/TS 14067:2013, GEI-Huella de carbono de los productos.
	SBP versión 1.0 (2015)	Bioenergía: biomasa leñosa (pellets y astillas de madera).	Voluntaria	Sector de servicios públicos de Europa que utilizan biomasa en plantas generadoras de calor.	
	EC-RED Directiva 2009/28/EC modificada a través de la Directiva EU2015/1513*	Bioenergía: biocombustibles y biolíquidos.	Obligatoria	Parlamento Europeo.	Metodología de cálculo de emisiones de GEI
Certificación agrícola	RTRS versión 3.0 (2016)*	Producción sostenible de soya.	Voluntaria	Procesos con múltiples partes interesadas.	Metodología de cálculo de emisiones de GEI
	RSPO P&C (2013)*	Producción sostenible de aceite de soya.	Voluntaria	Procesos con múltiples partes interesadas.	Calculadora PalmGHG
	BONSUCRO versión 4.2 (2016)*	Producción sostenible de caña de azúcar.	Voluntaria	Procesos con múltiples partes interesadas.	Herramienta cálculo de GEI BioGrace.

* Incluido en la Comisión Europea - Directiva de Energías Renovables (EC-RED).

Para efectos de la consolidación internacional del aceite de palma colombiano, Fedepalma ha venido trabajando con diferentes actores del sector para posicionar los productos de la agroindustria y visibilizar sus atributos únicos, como alternativa sostenible para el mercado europeo. En este sentido, como resultado

de la coordinación entre el Ministerio de Agricultura de los Países Bajos, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia y la sociedad civil, se firmó un acuerdo internacional para aumentar la producción de aceite de palma sostenible en conjunto con la Industria de Aceites y Grasas de los Países Bajos

(MVO, por su sigla en inglés), Solidaridad Network y la Iniciativa de Comercio Sostenible (IDH, por su sigla en inglés). Este tiene el objetivo de acrecentar la producción y el comercio internacional del aceite de palma sostenible entre Colombia y los Países Bajos, proyectando que lo utilizará 100 % sostenible para 2021.

Biomasa de palma de aceite y usos potenciales

En el contexto internacional, Colombia es el cuarto productor mundial de aceite de palma (después de Indonesia, Malasia y Tailandia) y el primero de América, alcanzando en 2017 un rendimiento de 3,8 toneladas de aceite por hectárea, cifra que supera el promedio mundial y posiciona nuevamente a la palmicultura colombiana en niveles similares a los de países líderes como Indonesia y Malasia (Fedepalma, 2018).

Desde el 2001, el Gobierno colombiano ha adoptado una serie de leyes para promover la producción, uso de biocombustibles y bioenergía (Ley 693/2001, Ley 939/2004 y Ley 1715/2014). Estas han alentado la producción de bioetanol y biodiésel a partir del cultivo de caña de azúcar y palma de aceite, respectivamente, así como la utilización de biomasa para cogeneración.

Para continuar expandiendo el uso de energías renovables y reducir el de combustibles fósiles, el Gobierno ha promulgado leyes como la Resolución 1283 de 2016 para brindar beneficios fiscales a las empresas que generan y gestionan el empleo de energías renovables en el país (Ramírez & Faaij, 2018).

Una de las principales inquietudes del uso de biomasa es el porcentaje que debe quedar disponible en el campo para aprovechamiento en el suelo (Figura 2). De los residuos de campo (porcentajes en base seca), los racimos que representan el 39 % llegan a la planta de beneficio. Es decir, el 61 % quedan en el campo. Este aspecto es muy importante en el cultivo de palma de aceite porque garantiza actividades sustentables, comparado con otros cultivos como la soya y el sorgo. De este modo, del porcentaje que ingresa a la planta de beneficio, solo el 18 % corresponde al aceite de palma (APC) y un 7 % para la fibra y tusa. Esto es, a mayor eficiencia dentro de la planta de beneficio con menor uso de fibra y tusa, mayor disponibilidad de la biomasa (base seca).

Ahora bien, si se considera la humedad del racimo, con un porcentaje de biomasa sólida del 40 %, el escenario es diferente con uno mayor en base húmeda de la tusa con respecto a la fibra (Figura 3).

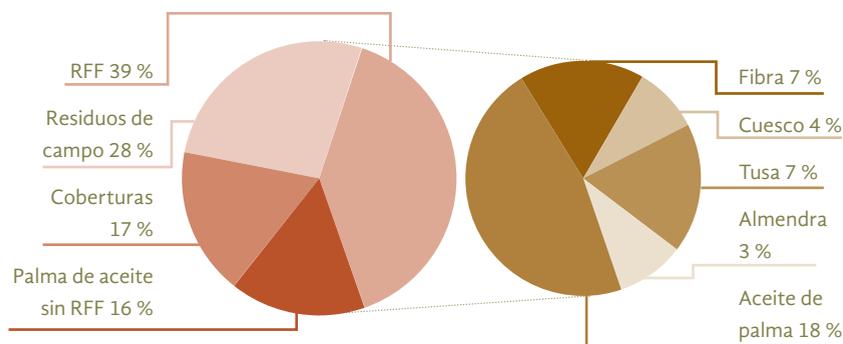


Figura 2. Distribución del total de biomasa seca por hectárea del cultivo de palma de aceite (ciclo de vida de 25 años).

Fuente: adaptado de Ramírez *et al.*, 2015.

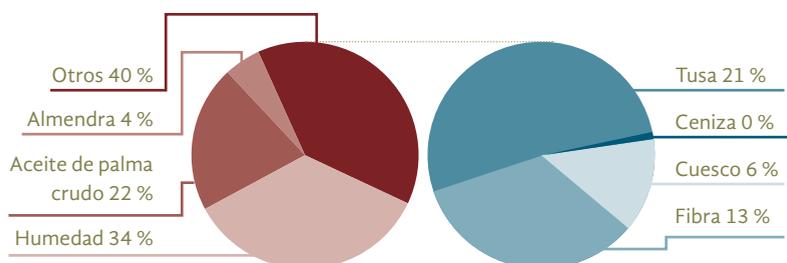


Figura 3. Distribución de la biomasa generada en el proceso de extracción de aceite de palma.

Fuente: adaptado de Ramírez *et al.*, 2015.

De acuerdo con el diagnóstico realizado por Cenipalma en el 2015, del proceso de beneficio del fruto de palma de aceite se generan varios subproductos de interés técnico y económico, tanto para la planta de beneficio como para el manejo agronómico del cultivo. Así, del total de la fruta procesada, el 40 % corresponde a biomasa sólida (base húmeda) compuesta por: 21 % de tusa; 13 % de fibra de mesocarpio; 6 % de cuesco; 0 % de ceniza de caldera y 0 % de lodo de tricanter. De esta forma se estimó que el procesamiento de 5.000.000 t de RFF tienen un potencial de biomasa húmeda (tusa, fibra y cuesco) de 1.975.357 t, y una biomasa potencial seca de 979.000 t (Ramírez *et al.*, 2015). El estudio concluyó que el mayor valor agregado de la biomasa se puede obtener mediante la evaluación de diferentes opciones de biorrefinería.

La actualización del inventario de biomasa para las cuatro zonas palmeras del país distribuido por fibra, cuesco y tusa, realizado en el 2017 (Figura 4), demostró que la alta disponibilidad de biomasa en base húmeda se reduce si se considera la misma en base seca. Por ejemplo, aunque para la tusa se tiene cerca de 1.657.000 toneladas de biomasa en base húmeda, en la seca representa 663.000 toneladas (Tabla 3).

De los usos actuales de la biomasa (Figura 5), el 64 % de la tusa se está llevando al campo, lo que hace parte de la adopción de buenas prácticas agrícolas. El uso de tusa como compostaje solo cobra sentido como opción ambientalmente sostenible cuando se mezcla con los efluentes finales (POME, por su sigla en inglés) de las plantas de beneficio, porque favorece la

Figura 4. Biomasa generada por el sector palmero de Colombia (2017):
a) toneladas en base húmeda b) toneladas en base seca.

Fuente: adaptado de Ramírez *et al.* (2015).

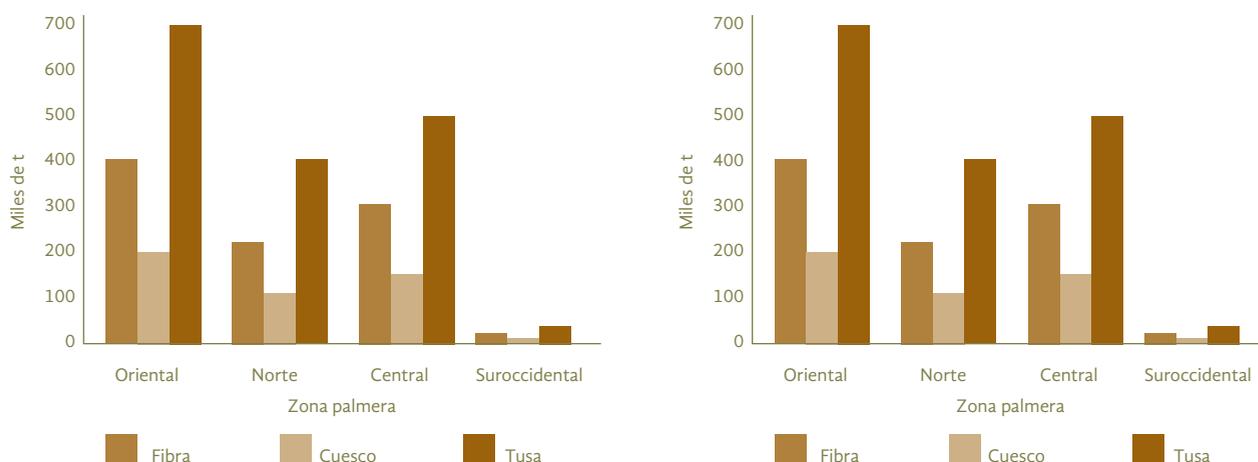


Tabla 3. Inventario de biomasa generada por el sector palmero de Colombia en el 2017. Fuente: adaptado de Ramírez *et al.* (2015).

Zona palmera (Colombia)	Biomasa					
	Base húmeda (miles de t)			Base seca (miles de t)		
	Fibra	Cuesco	Tusa	Fibra	Cuesco	Tusa
Oriental	424	212	718	297	193	287
Norte	240	120	406	168	109	162
Central	293	147	496	205	133	199
Suroccidental	22	11	37	15	10	15
Total	979	490	1657	685	445	663

reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono CO₂ y metano CH₄) (Rodríguez *et al.*, 2015). En cuanto al cuesco, el empleo principal es como combustible para calderas (72 %), mientras que un 21 % ya se comercializa dentro del país. Esta venta representa una primera salida de biomasa, aunque el precio se ha mantenido en los últimos cinco años alrededor de \$ 60.000 por tonelada. Para la fibra, el mayor porcentaje también es para uso en las calderas (74 %) y un 17 % para el campo. En cuanto a las cenizas, se utilizan para compost y campo.

Teniendo en cuenta las cantidades de biomasa generada del proceso de extracción de palma de aceite, es necesario explorar las opciones para escoger la mejor

estrategia de aprovechamiento. La elaboración de nuevos productos se puede dar a través de rutas fisicoquímicas, biológicas o térmicas (Figura 6).

De la revisión realizada por Cenipalma en el 2016, se encontró que la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina, de los residuos lignocelulósicos de la palma de aceite, definen los posibles procesos de transformación y aplicación de esta biomasa (Tabla 4). Por ejemplo, en el caso de la tusa, por el bajo poder calorífico y mayores cantidades de celulosa/hemicelulosa, puede emplearse en procesos fermentativos como producción de etanol. Por el contrario, el cuesco por su alto contenido de lignina, puede ser utilizado para carbono activado (García *et al.*, 2016a).

Figura 5. Porcentaje de uso final de biomasa en planta de beneficio para Colombia (2017).

Fuente: adaptado de Ramírez *et al.* (2015).

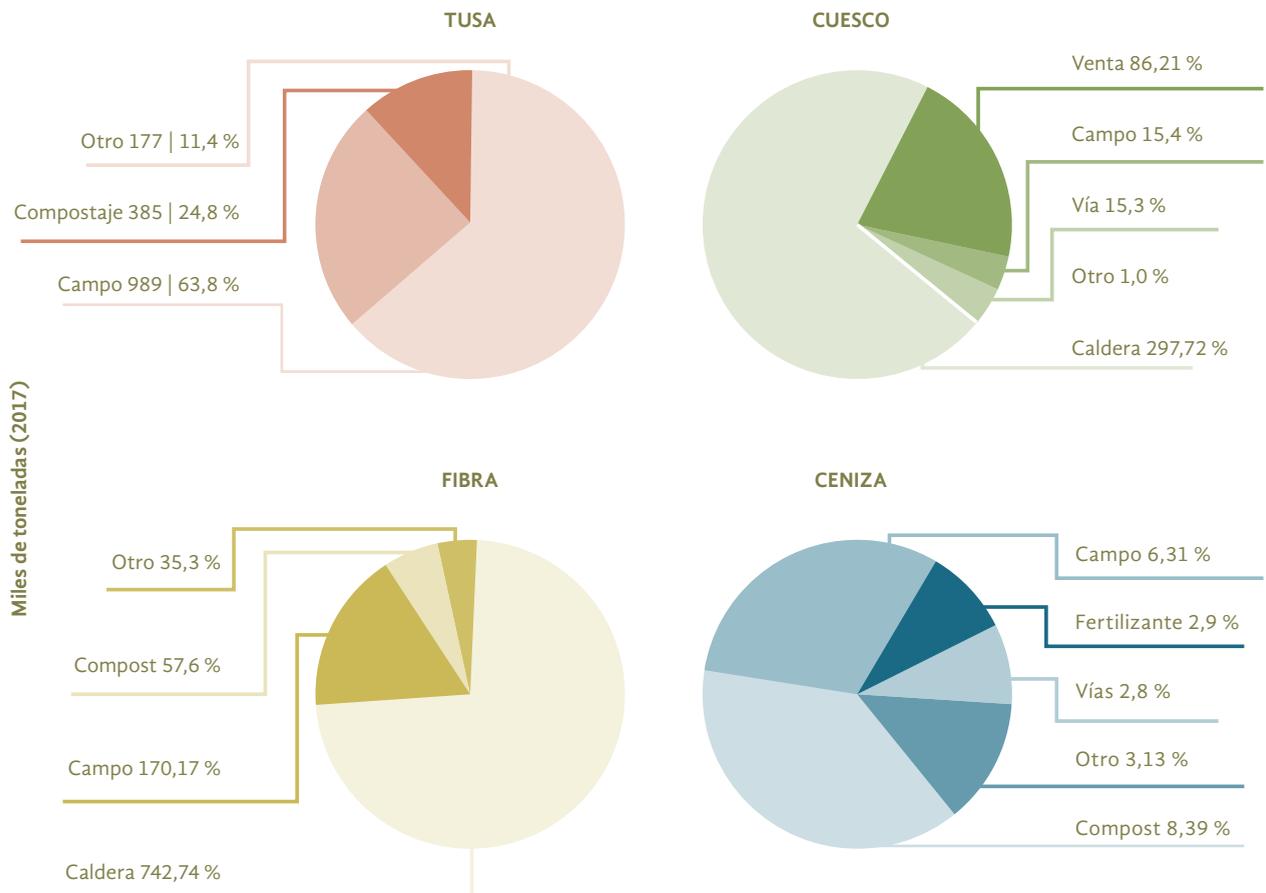


Figura 6. Rutas de aprovechamiento de biomasa de palma de aceite.
Fuente: García & García, 2013.

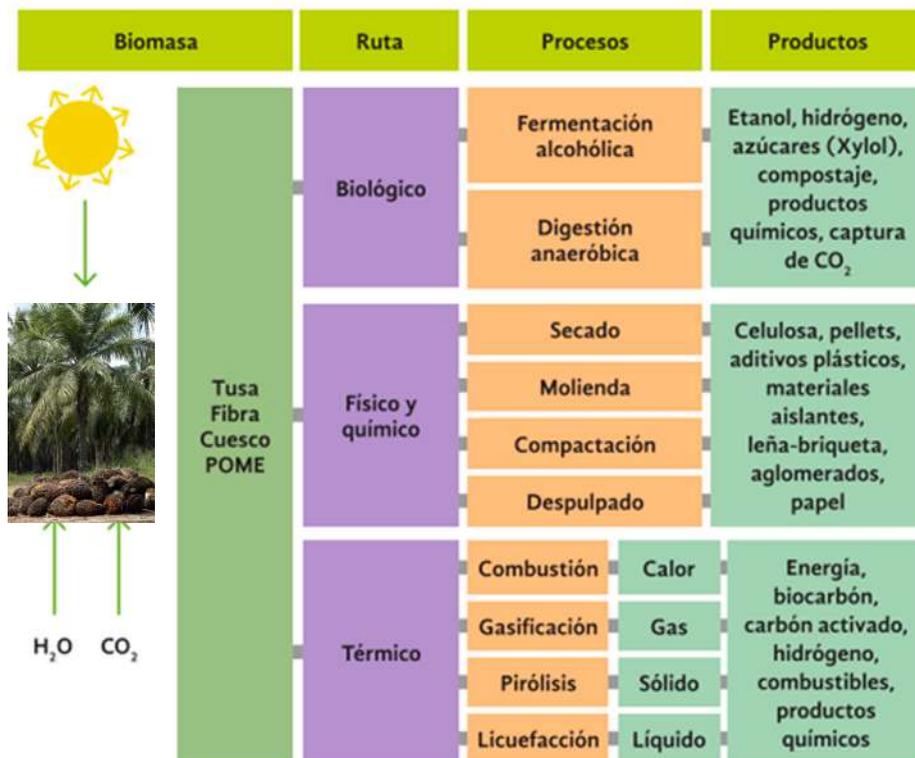


Tabla 4. Composición principal de la biomasa sólida de palma de aceite. Fuente: adaptado de García & García, 2013; Van Dam, 2016.

Componentes (%)	Biomasa (valores promedios)		
	Tusa	Fibra (mesocarpio)	Cuesco
Lignina (S/G)	15,4	23,7	48,1
Celulosa	43,0	30,3	26,3
Hemicelulosa	21,1	21,1	19,0
Ceniza	1,5	9,3	1,0
C (%)	40,9	43,4	46,2
N (%)	0,87	1,21	0,36
S (%)	0,09	0,18	0,04
Mayor poder calorífico (GJ/t)	18,3	19,7	21,0
Menor poder calorífico	6,4	13,0	15,1
Nutrientes			
N	0,7	0,9	0,5
K	0,08	0,07	0,01
P	2,4	1,2	0,15

Biorrefinerías a partir de biomasa de palma de aceite

El concepto de biorrefinería tiene varias definiciones. De acuerdo con el documento Bioenergía Tarea 42 emitido por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por su sigla en inglés), se caracteriza por la conversión sostenible de biomasa en una gama de productos comerciales y energía. Esto significa que una biorrefinería puede ser un proceso, una planta o incluso un conjunto de instalaciones (De Jong, 2009). De acuerdo con el NREL (National Renewable Energy Laboratory), es una instalación que integra tecnologías de conversión de biomasa y procesos para la producción simultánea de combustibles, energía y productos químicos de alto valor agregado. Según la Red Holandesa de Biorrefinerías Bio2Value el término se refiere a la separación de la biomasa en diversos componentes que pueden ser llevados individualmente al mercado después de la separación, o de tratamientos adicionales (biológicos, termoquímicos/químicos).

Por tanto, la definición de biorrefinería muestra que esta no necesariamente incluye un único proceso o tecnología, y que diferentes rutas pueden desarrollarse en función de las materias primas

utilizadas y los productos a obtener dependiendo de la composición inicial de la biomasa utilizada (Silva *et al.*, 2016). El principal criterio de la clasificación es la ruta que conduce al producto final. El desarrollo de una biorrefinería requiere por tanto la integración de módulos tecnológicos dentro de una logística clara para diversificar los productos, reducir el impacto ambiental y los costos de los sistemas existentes. Una estrategia para establecerla en una industria existente, consiste en la adición gradual de módulos o tecnologías (térmicas, químicas, biológicas o agentes de conversión mecánicos).

Ahora bien, uno de los factores importantes dentro de su diseño es el tamaño de escala, ya que esto permite identificar el modelo de negocio que se puede implementar. Es claro que los precios de venta del aceite de palma es el principal *commodity* del sector, pero en el modelo de desarrollo de producción de biomasa uno de los criterios más importantes son los costos (Figura 7). Si se compara el precio de venta del aceite de palma crudo (APC) de 666 USD/t con productos como la biogasolina y carboximetilcelulosa, el valor comercial puede estar en rangos 10 o 100 veces mayor (Abdulrazik *et al.*, 2017).

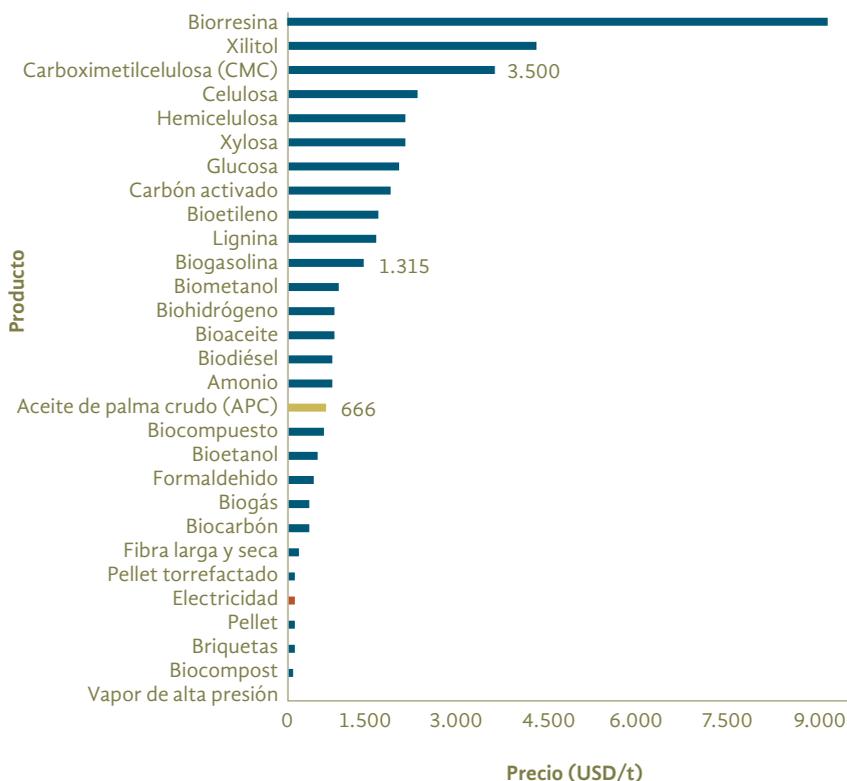


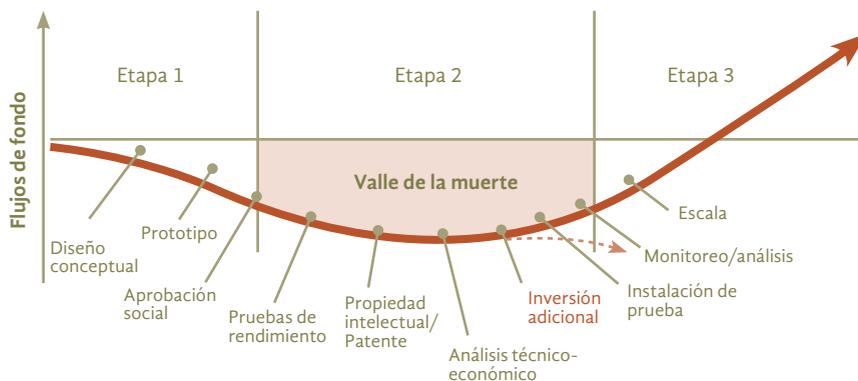
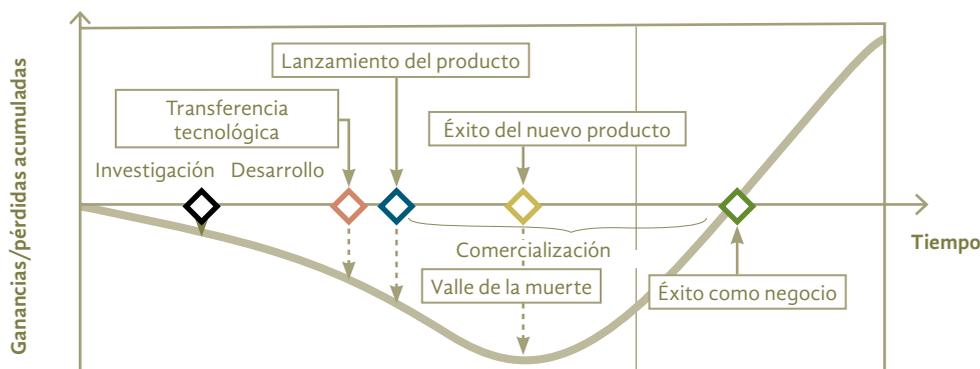
Figura 7. Precios de venta de productos derivados de biomasa. Fuente: adaptado de Abdulrazik *et al.*, 2017.

El gran desafío de los proyectos en las etapas iniciales de investigación y desarrollo radica en lograr la inversión necesaria. Esta dificultad se da en gran parte porque los inversionistas prefieren modelos de negocio probados y listos para empezar el aumento de escala. Por tanto, la opción de biorrefinería al igual que en cualquier otra inversión, incluye la estimación de cuánto dinero se necesita hasta estar en la etapa donde se generen ingresos, y tenerlo para cubrir los costos antes de dar el salto al precipicio (Zwilling, 2013). Esto es, aunque el mayor riesgo está en el inicio del proceso, se debe superar el “valle de la muerte” para garantizar el éxito del negocio con aumento de escala (Figura 8).

En ese sentido, es de gran utilidad identificar el alcance de las tecnologías en términos del concepto de nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level, TRL, por su sigla en inglés) (Mankins, 2009),

para establecer las diversas opciones de biorrefinería y la evaluación de su sostenibilidad. Las investigaciones que se encuentran en la escala de validación TRL 4 y 5, aún enfrentan una serie de barreras en su desarrollo futuro (Tabla 5). En cuanto al uso de biomasa de palma, cada vez es mayor el número de publicaciones relacionadas con procesos tecnológicos para producción de una amplia gama de productos (Ahmed *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2015; Balagurumurthy *et al.*, 2015; Garver & Liu, 2014; Mohd *et al.*, 2017; Sadhukhan *et al.*, 2018). Aun así, el avance de nuevas tecnologías generalmente depende del éxito de los esfuerzos de investigación. Entender las barreras y superarlas, es una tarea importante para la integración de la biorrefinería en la planta de beneficio. La concepción de evaluación propuesta por Cenipalma (García *et al.*, 2016b) se esquematiza en la Figura 9.

Figura 8. Etapas para cruzar el “valle de la muerte” de las tecnologías: a) enfoque como negocio de éxito; b) enfoque con aumento de escala.
Fuente: adaptado de Zwilling, 2013.



En ese sentido, es de gran utilidad identificar el avance de las tecnologías en términos del concepto de nivel de madurez tecnológica (*Technology Readiness Level*, TRL, por su sigla en inglés) (Mankins, 2009), para establecer las diversas opciones de biorrefinería y la evaluación de su sostenibilidad. Las investigaciones que se encuentran en la escala de validación TRL 4 y 5, aún enfrentan una serie de barreras en su desarrollo futuro (Tabla 5). En cuanto al uso de biomasa de palma, cada vez es mayor el número de publicaciones relacionadas con procesos tecnológicos para producción de una amplia gama de productos (Ahmed *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2015; Balagurumurthy *et al.*, 2015; Garver & Liu, 2014; Mohd *et al.*, 2017; Sadhukhan *et al.*, 2018). Aun así, el avance de nuevas tecnologías generalmente depende del éxito de los esfuerzos de investigación. Entender las barreras y superarlas es una tarea importante para la integración de la biorrefinería en la planta de beneficio. La concepción de evaluación propuesta por Cenipalma (García *et al.*, 2016b) se esquematiza en la Figura 9.

El desafío más importante para evitar el "valle de la muerte", es lograr mover los proyectos a TRL mayores de 4, porque es este lugar donde fallan la mayoría de las nuevas tecnologías, pasando del laboratorio a un proceso de escala piloto con un entorno operativo donde hay mayor inversión de capital y menor retorno. Por tanto, las partes interesadas deben tomar decisiones dentro de una escala de tiempo apropiada. Es preci-

so recordar que, asumiendo una serie de estudios de biorrefinerías y que su contexto para la construcción desde cero (del diseño hasta la operación) puede demorar entre cuatro y cinco años, llevará al menos 10 más obtener un retorno de la inversión inicial.

Estudios de caso de biorrefinerías

Diversas opciones de biorrefinería están surgiendo en la industria. Los procesos que predominan se encuentran en los campos de digestión anaerobia, gasificación, torrefacción y pirólisis. En el estudio realizado por Cenipalma y la Universidad del Estado de Washington (WSU, por su sigla en inglés) sobre integración de plantas de beneficio de aceite de palma en una biorrefinería (García *et al.*, 2016b), se evaluaron seis opciones para una planta de beneficio de 30 t RFF/h, utilizando el diagrama de decisión de la tecnología con un TRL mayor a siete, teniendo en cuenta factores climáticos, sociales y ambientales. De esta forma se presentaron las diversas opciones de producción de biogás en conjunto con compost, pellets, cogeneración, biocarbón y bioaceites, que son factibles dentro de las plantas de beneficio, de acuerdo con el grado de madurez tecnológica (Figura 10). Desde el concepto de biorrefinería evaluado se demuestra la importancia de la producción de biogás, porque es la fuerza motriz para obtener los demás productos (Figura 11), además de favorecer la captura de metano (CH₄).

Tabla 5. Descripción del nivel de madurez tecnológica (TRL). Fuente: adaptado de Mankins (2009).

Nivel de madurez (TRL)	Descripción
TRL 1	Principios básicos observados
TRL 2	CONCEPTO: concepto tecnológico formulado
TRL 3	CONCEPTO: prueba experimental del concepto
TRL 4	VALIDACIÓN: en laboratorio
TRL 5	VALIDACIÓN: en entorno industrial
TRL 6	DEMOSTRACIÓN: en entorno industrial
TRL 7	DEMOSTRACIÓN: prototipo en operación
TRL 8	SISTEMA: completo y calificado
TRL 9	SISTEMA: probado y económicamente competitivo

Figura 9. Diagrama de decisión para escoger la tecnología dentro de la planta de beneficio. Fuente: García *et al.*, 2016b.

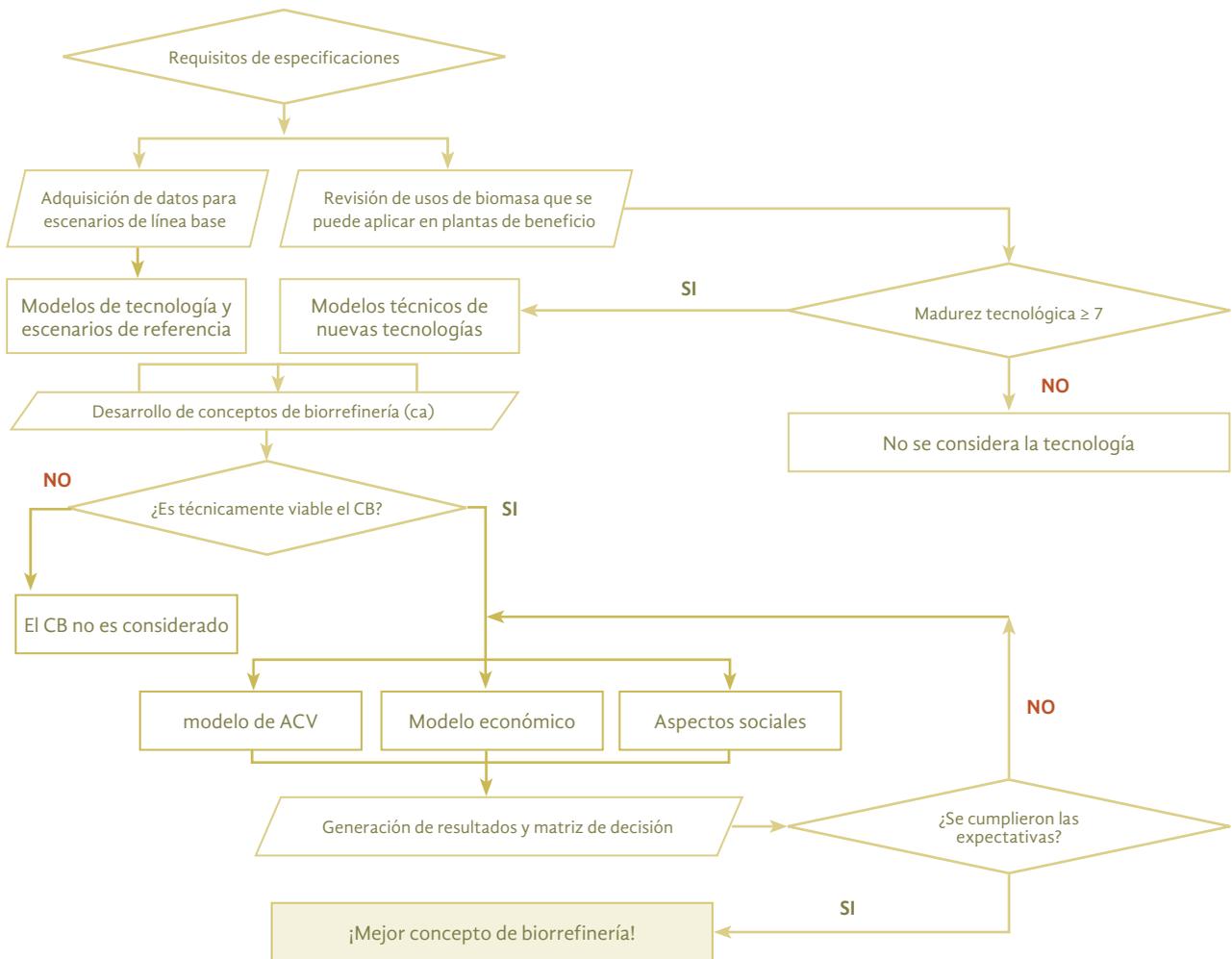
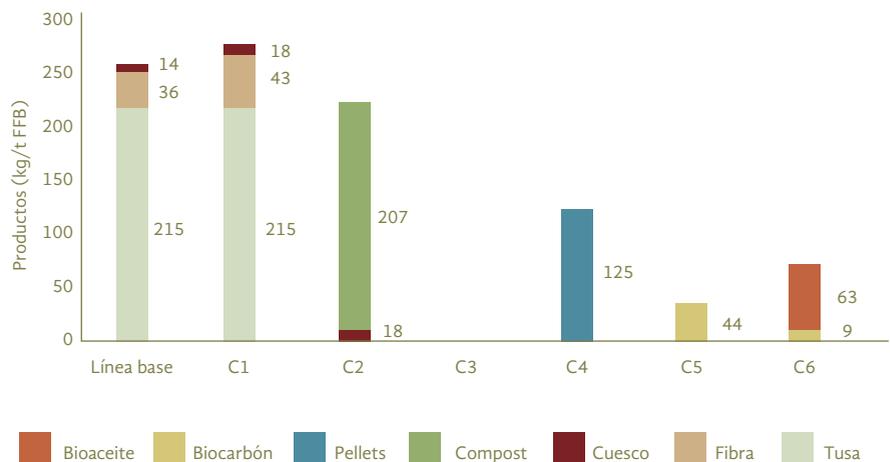


Figura 10. Contribución energética de los productos dentro del concepto de biorrefinería (Colombia). Fuente: García *et al.*, 2016b.



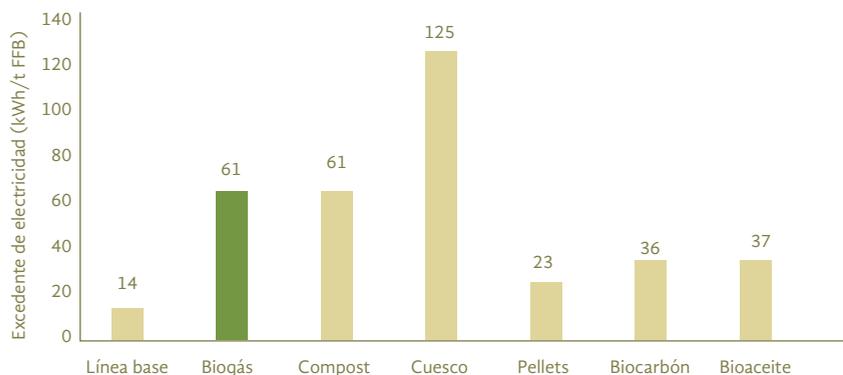


Figura 11. Contribución energética de los productos dentro del concepto de biorrefinería (Colombia). Fuente: García *et al.*, 2016b.

Por otro lado, con las alternativas tecnológicas planteadas es posible reducir la huella de carbono entre 30 % a 99 % dependiendo de la opción seleccionada, en comparación con la línea base (Figura 12).

En términos de producto se dio énfasis a la producción de biocarbón, porque además de su potencial uso como adsorbente de contaminantes en medio acuoso (Ello *et al.*, 2013; Foo & Hameed, 2012; Kundu, 2015; Ramírez *et al.*, 2011), también es un producto interesante para aplicación en campo. En el estudio publicado recientemente por Gale & Thomas (2019), los parámetros más importantes para aplicación de biocarbón en campo es el pH del suelo y el tipo de cultivo (leguminosas, vegetales, maíz, entre otros) (Figura 13). De este modo, si se requiere mejorar el pH del suelo, los autores proponen aplicar una dosis de 33 toneladas de biocarbón por hectárea para lograr un pH neutro o básico ($\text{pH} > 6$). Pero si lo que se requiere es aumentar la acidez del suelo ($\text{pH} < 6$), se deben administrar

solo 24 toneladas biocarbón por hectárea. En cuanto a la respuesta de la aplicación dependiendo del tipo de cultivo, los autores afirman que es posible un aumento de productividad cercano a 25 toneladas por hectárea para cultivos como la palma de aceite (como RFF o biomasa), en contraste con otros como el maíz o el trigo en los que solo se lograría cerca de 10 toneladas por hectárea. Aun así, es necesario realizar más estudios para evaluar otros efectos del biocarbón en el suelo.

Adicionalmente, dentro de la perspectiva de conceptualización de biorrefinería, si se considera producir biocarbón en una planta de beneficio de 30 t RFF/h, se pueden obtener 6.336 t biocarbón/año para aplicación en campo, con posibilidades de venta comercial para usos específicos con precios estimados entre USD 250 a USD 4.950 por tonelada, dependiendo de las propiedades del bioproducto obtenido. En la actualidad, también se puede utilizar la herramienta de cálculo desarrollada por la Iniciativa Internacional de Biocarbón

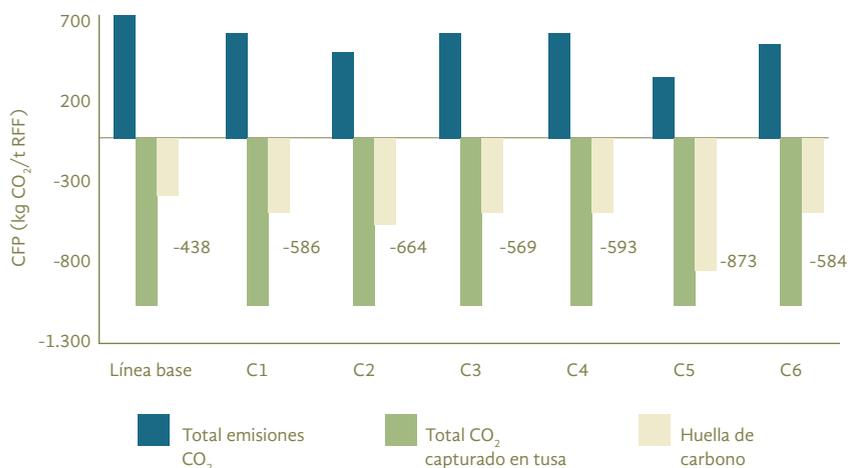
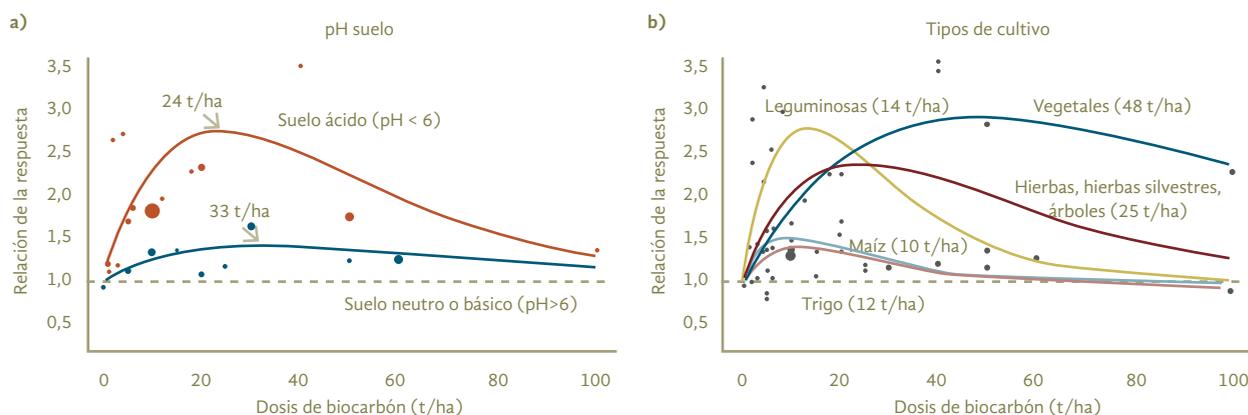


Figura 12. Contribución energética de los productos dentro del concepto de biorrefinería (Colombia). Fuente: García *et al.*, 2016b.

Figura 13. Relación de la dosis de biocarbón con el pH del suelo (a) y tipo de cultivo (b). Fuente: adaptado de Gale & Thomas, 2019.



(IBIC, por su sigla en inglés) para la clasificación del biocarbón, ingresando los datos de las propiedades físico-químicas. Con los resultados es posible conocer el potencial uso de los biocarbones obtenidos (Lehmann & Joseph, 2009).

En cuanto a la gama de productos que se pueden obtener a partir de biomasa de palma en el estudio de caso de Malasia Peninsular, reportado por Abdulrazik *et al.* (2017), se destacan diversas estructuras estratégicas. Para lograr esto, los autores realizaron el modelamiento de análisis económico de la cadena de suministro de biomasa a partir de tusa (EFB, por su sigla en inglés) con el fin de obtener múltiples productos, incluyendo en el estudio los sistemas de transporte, etapas intermedias y finales, al igual que productos de venta directa (Figura 14).

Uno de los aspectos más interesantes de este estudio, es que con el análisis del potencial económico abordado puede priorizarse la inversión hacia productos rentables, dependiendo de la capacidad de cada planta de beneficio, teniendo en cuenta el tamaño de escala requerido (Figura 15).

De acuerdo con el modelo, utilizando como base de cálculo los factores de producción reportados en g/h, para producir una tonelada de RFF es posible obtener 0,11 toneladas de biocarbón por la ruta de la activación alcalina y 0,08 toneladas de pellets por torrefacción por la densificación de biomasa a través de producción de pellets. En el caso de estos últimos, si se continuara con la pirólisis rápida hasta

la formación de bioaceite, se podrían obtener 0,07 toneladas de biohidrógeno, por medio de reformado con vapor (gasificación). En resumen, el modelo de optimización del estudio concluye que es posible obtener una ganancia de 713.642.269 USD/año, incluyendo los costos de biomasa, producción, transporte y tratamiento de emisiones, asumiendo un solo propietario de todo el negocio de cadena de suministro, en un cultivo de 1.825.483 ha con producción de 36.405.371 toneladas de RFF y 8.373.235 toneladas de EFB. Ese tamaño de escala no es fácilmente alcanzable en el país, por lo que podría considerarse solo alguna de las rutas propuestas.

De igual forma, en Brasil han sido reportados otros estudios para obtener productos como etanol, xilitol y lignina, calor, energía y jarabe C5 (alimento para ganado) a partir de biomasa de tusa. En el realizado por Coral *et al.* (2018) fueron considerados los pretratamientos: ácido-alcalino secuencial (AAP, por su sigla en inglés), explosión con vapor seguida de deslignificación alcalina (SEAP, por su sigla en inglés) y explosión con vapor sin deslignificación (SEP, por su sigla en inglés), para obtener etanol (como combustible), xilitol y lignina, respectivamente, considerando cuatro escenarios para cada pretratamiento (Figura 16). El rendimiento de los pretratamientos se analizó en función de la ganancia total anual (Figura 17) y valor energético neto, considerando la variación de los precios comerciales del etanol (0,7 USD/litro), xilitol (3 USD/kg) y lignina (3 USD/kg).

Figura 14. Estructura de obtención de múltiples productos a partir de biomasa de EFB (Malasia peninsular).

Fuente: adaptado de Abdulrazik *et al.*, 2017.

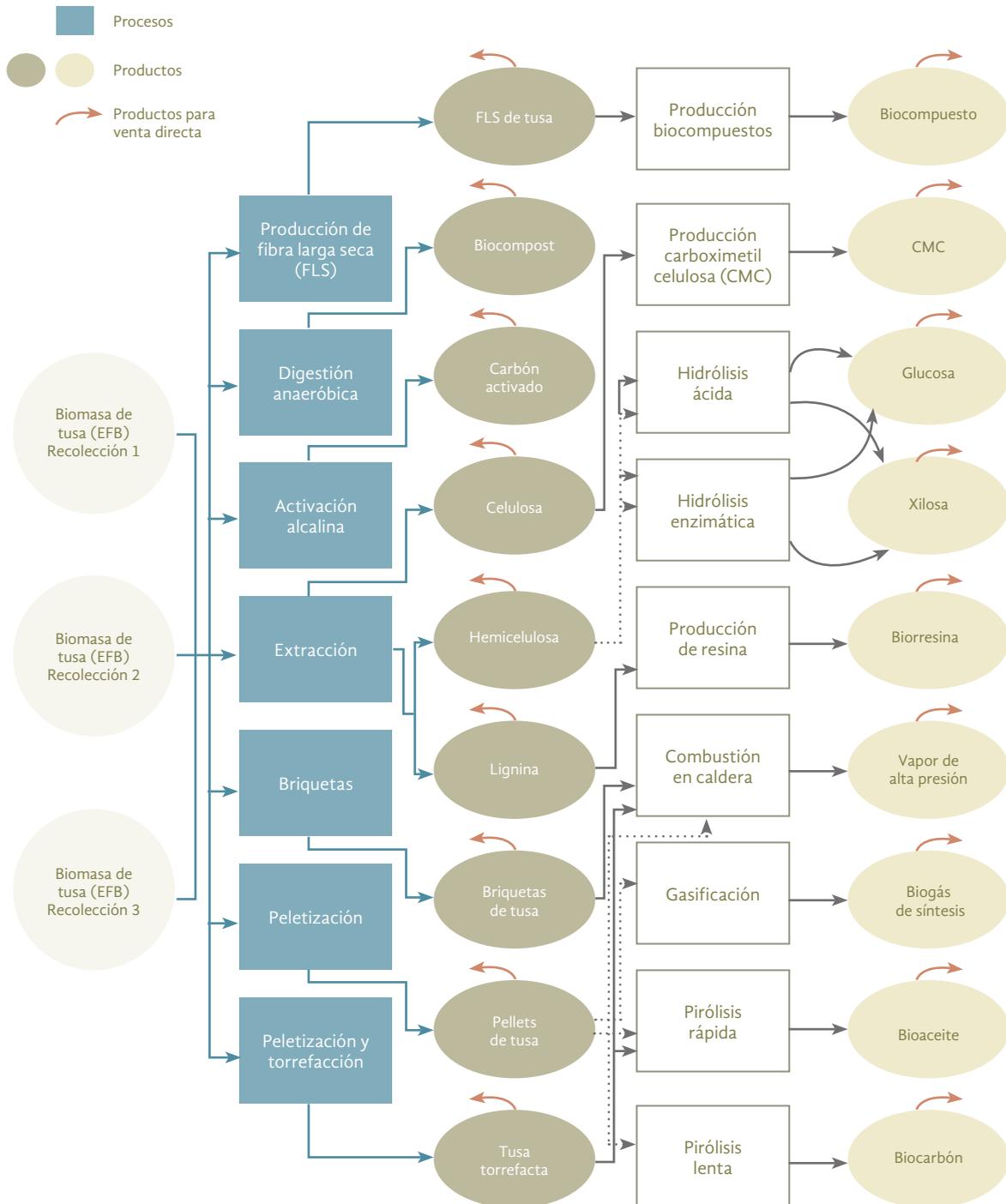


Figura 15. Niveles óptimos de producción de productos a partir de biomasa de EFB (Malasia peninsular).

Fuente: adaptado de Abdulrazik *et al.*, 2017.

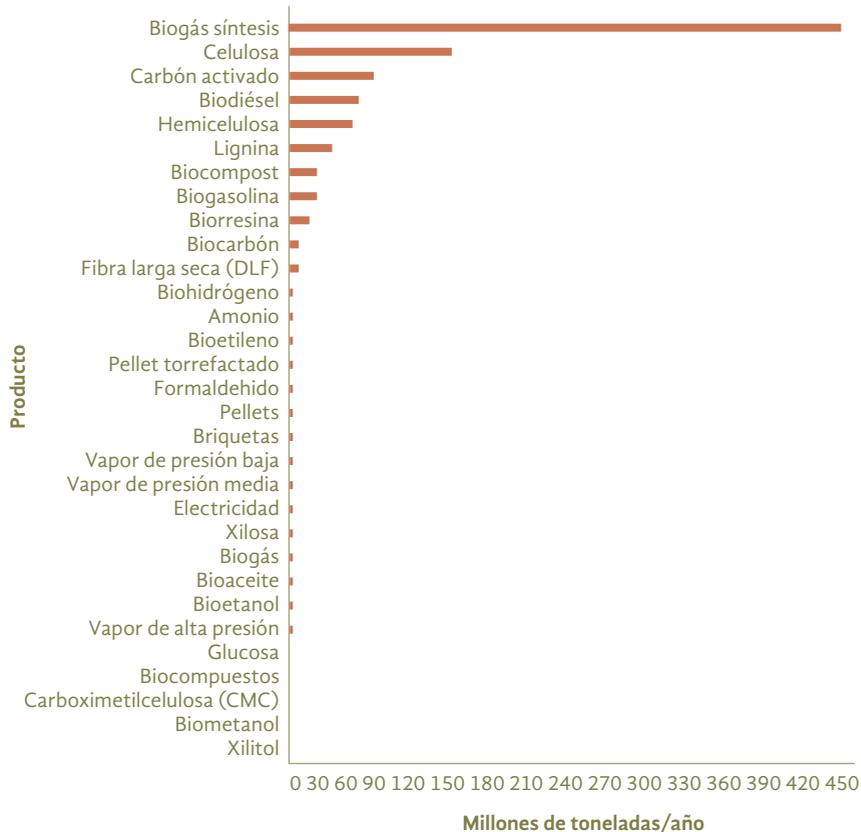


Figura 16. Escenarios de coproductos evaluados por pretratamiento (Brasil).

Fuente: adaptado de Coral *et al.* (2018).

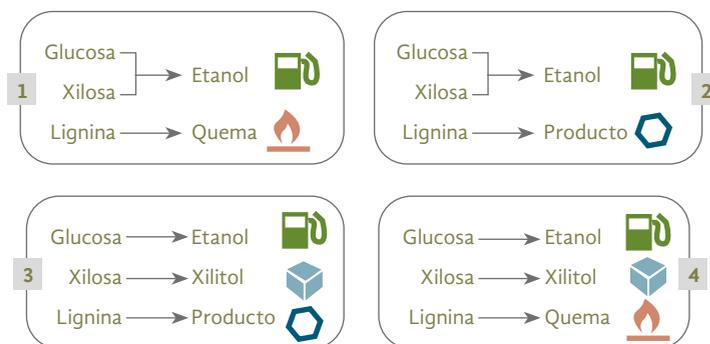
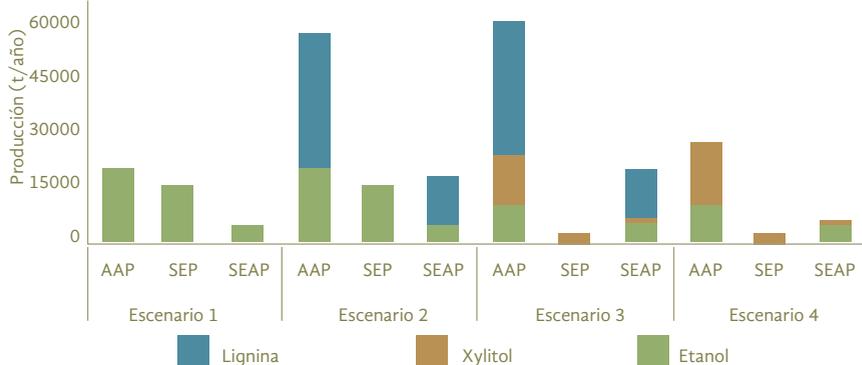


Figura 17. Costo de producción de coproductos de EFB por pretratamiento en cada escenario (Brasil). Fuente: adaptado de Coral *et al.* (2018).



Si se revisan los costos de producción en términos de utilidades para cada uno de los escenarios, se observa que no todas las opciones de biorrefinerías logran un beneficio económico. Los resultados mostraron que en cuanto a pretratamientos, el SEAP para producción de xilitol presentó la mayor ganancia anual para todos los casos analizados, seguido del AAP para producción de etanol. Por esta razón, los escenarios 2 y 3 presentan la mayor utilidad económica (Figura 18).

En términos de tamaño de escala, la estimación en este estudio se realizó para una plantación de 113.600 ha (20 t/ha) con una producción de 2.272.727 t de RFF y 200.000 t de tusa seca (500.000 t de tusa fresca), considerando siete plantas de beneficio con capacidades de 30 t/h.

Vaskan *et al.* (2018), hicieron la evaluación técnico-económica de dos biorrefinerías a partir de biomasa de tusa (EFB) para producir etanol, calor, energía y jarabe de C5 considerando el concepto de análisis de ciclo de vida (ACV), para evaluar el impacto ambiental de estas tecnologías. Los dos escenarios estudiados corresponden a la ruta de conversión de tusa para combustible de vehículos de transporte (EFB FF), con producción de etanol y jarabe C5 para suplemento alimenticio para el ganado; y la ruta de la tusa únicamente como combustible (EFB OF), para obtener etanol como producto principal. En los dos se produce electricidad y vapor, consumidos principalmente para satisfacer las demandas de calor y energía de la biorrefinería, considerando también la venta de los excedentes de electricidad (Figura 19).

El análisis económico de este estudio mostró que las perspectivas para los dos escenarios son desfavorables (Tabla 6), específicamente porque los valores en

términos de \$/t de tusa son negativos: \$ -32.38/t para el escenario A (EFB FF) y \$ -30.07/t para el escenario B (EFB OF). Adicionalmente, el ACV evidenció que con los dos escenarios se logran beneficios ambientales en términos de reducción del cambio climático (84 % para EFB FF y 73 % para EFB OF) y agotamiento de combustibles fósiles (83 % para EFB FF y 76 % para EFB OF), en comparación con otros sistemas. Sin embargo, el aumento de los niveles de impacto ambiental asociados con la toxicidad y eutrofización limitarían su aplicación. Dicho de otra forma, para los dos escenarios considerados no se logra beneficio económico ni ambiental. Una posible salida es considerar otros productos de base biológica con mayor valor comercial como el furfural, ácido succínico, ácido láctico o el xilitol, que se han mostrado más prometedores en las plataformas químicas de Brasil.

En cuanto a estudios llevados a cabo y que están actualmente en operación, se tiene como referencia a Global Green Sinergy (GGS) en Malasia, líderes en soluciones de tratamiento y procesamiento de biomasa de palma para producción de productos de valor agregado. La empresa cuenta con un cultivo de 10.000 hectáreas, correspondiente a la unión (clúster) de la producción de tres plantas de beneficio (40 y 60 t RFF/h), para una capacidad total de 120 t RFF/h. El principal mercado es el de fibra larga y seca, al igual que pellets para venta en China. El rendimiento de dicha fibra es de 350 kg/t de tusa, con una humedad de 10 %. Para 2014, GGS realizó la venta anual de 100.000 toneladas métricas de biocarbón proveniente del cuesco y 1.800 *containers* de fibra larga y seca. Además, el fertilizante orgánico proveniente del compost, se comercializa principalmente para uso en cultivos de hortalizas,



Figura 18. Utilidad para cada escenario de acuerdo con el pretratamiento utilizado (Brasil).

Fuente: adaptado de Coral *et al.* (2018)

Figura 19. Escenarios de biorrefinería a partir de biomasa de tusa (EFB).
 a) Para producción de combustible y jarabe C5. b) Para producción únicamente de combustible (Brasil).
 Fuente: adaptado de Vaskan *et al.* (2018).

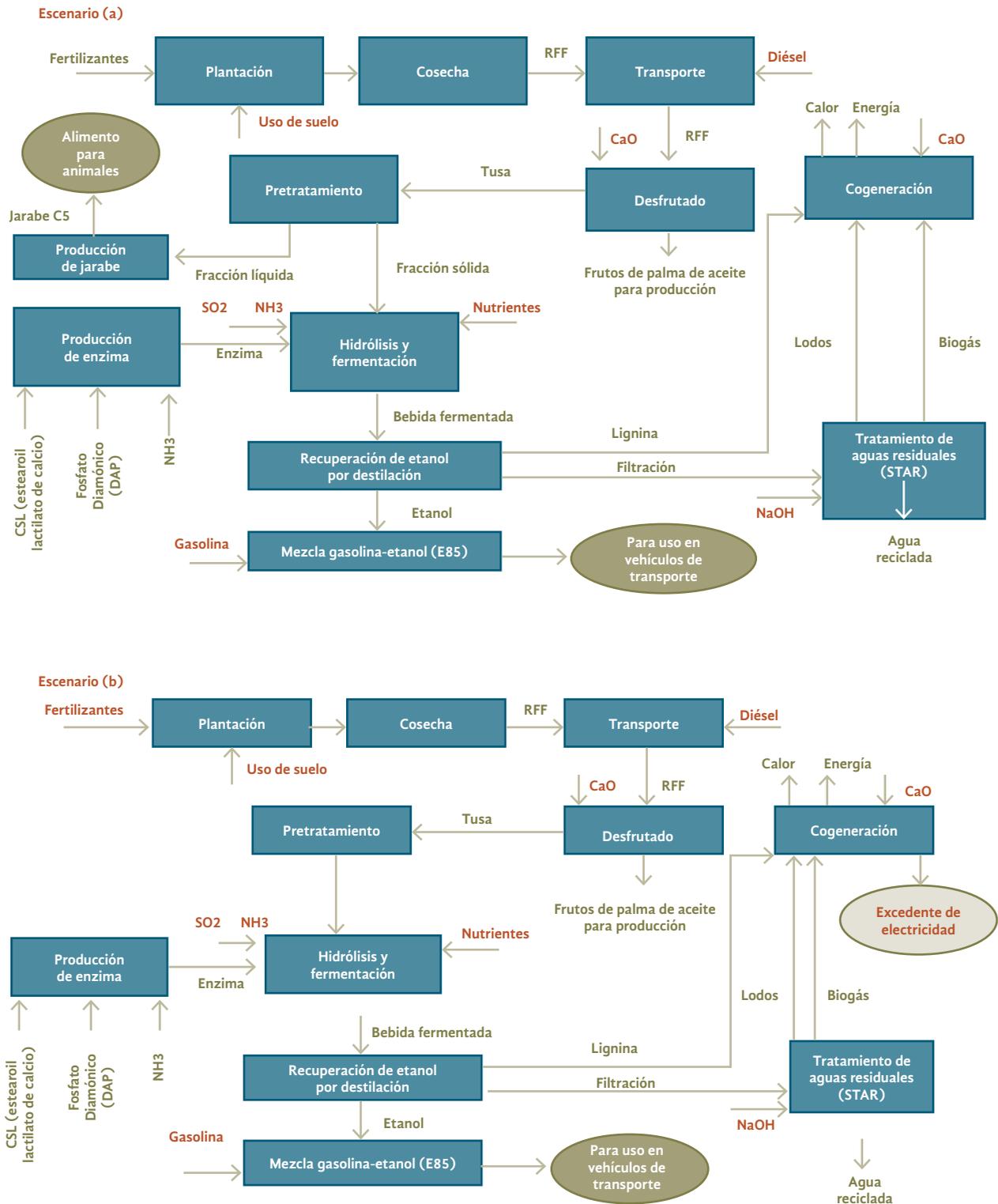


Tabla 6. Análisis económico de los escenarios A y B evaluados (Brasil). Fuente: adaptado de Vaskan *et al.* (2018).

Producto	Escenarios		
	Unidades	A (EFB FF)	B (EFB OF)
Etanol	t/año	24,196	45,094
Jarabe C5	t/año	58841	0
Electricidad (compra/excedente)	GWh/año	-21.14	2.96
Costo de producción de etanol	\$/t	849	1,038
Costo de producción de jarabe C5	\$/t	350	0
Costo de producción de electricidad	\$/kWh	-	0.11
Inversión total de capital	M\$	204.12	226.63
Costo de operación	M\$/año	3.86	8.85
Costo fijo de operación	M\$/año	7.94	8.29
Precio máximo de compra de biomasa EFB	\$/t	-20.38	-18.07
Precio mínimo de venta de biomasa EFB	\$/t	12.00	12.00
Prospectiva de desempeño económico	\$/t	-32.38	-30.07

papa, entre otros. Dentro de su portafolio de servicios, tienen un proyecto de comercialización de biogás con contratos de venta de energía a 16 años, con plantas de capacidad entre 2MW y 12 M.

Finalmente, con los diferentes escenarios mostrados se confirma la necesidad de tener en cuenta un modelo de negocio particular para cada producto que se pretende obtener, considerando la madurez tecnológica y el tamaño de escala. Por ejemplo, en Estados Unidos ya se cuenta con biorrefinerías integradas auspiciadas por el Departamento de Energía, a nivel de escala piloto, demostrativas y pioneras, con uso de altas cantidades de biomasa. Aun así, si se compara el tamaño mínimo requerido para una sola planta como etanol, la cantidad equivaldría a todo el potencial de biomasa de Colombia.

Clúster energético: opción de biorrefinería del sector palmero

La generación de energía promete ser un negocio alternativo de corto plazo, mientras se consolidan las tecnologías para el desarrollo de nuevos productos de biorrefinerías. La cogeneración tiene a su favor que es una tecnología madura, ampliamente aplicada en plantas de beneficio y cuenta con legislación

a partir de la Resolución 30 de 2018 emitida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), para la venta y comercialización de energía a pequeña escala. Este escenario, aunque abre la posibilidad de maximizar los ingresos de las plantas de beneficio de palma de aceite, generalmente requiere un alto costo de inversión, fundamentalmente para las plantas más antiguas porque deben reemplazar las calderas de baja presión, para lograr generar vapor con la calidad suficiente para ser aprovechado en una turbina (Arrieta *et al.*, 2008; Vargas *et al.*, 2011).

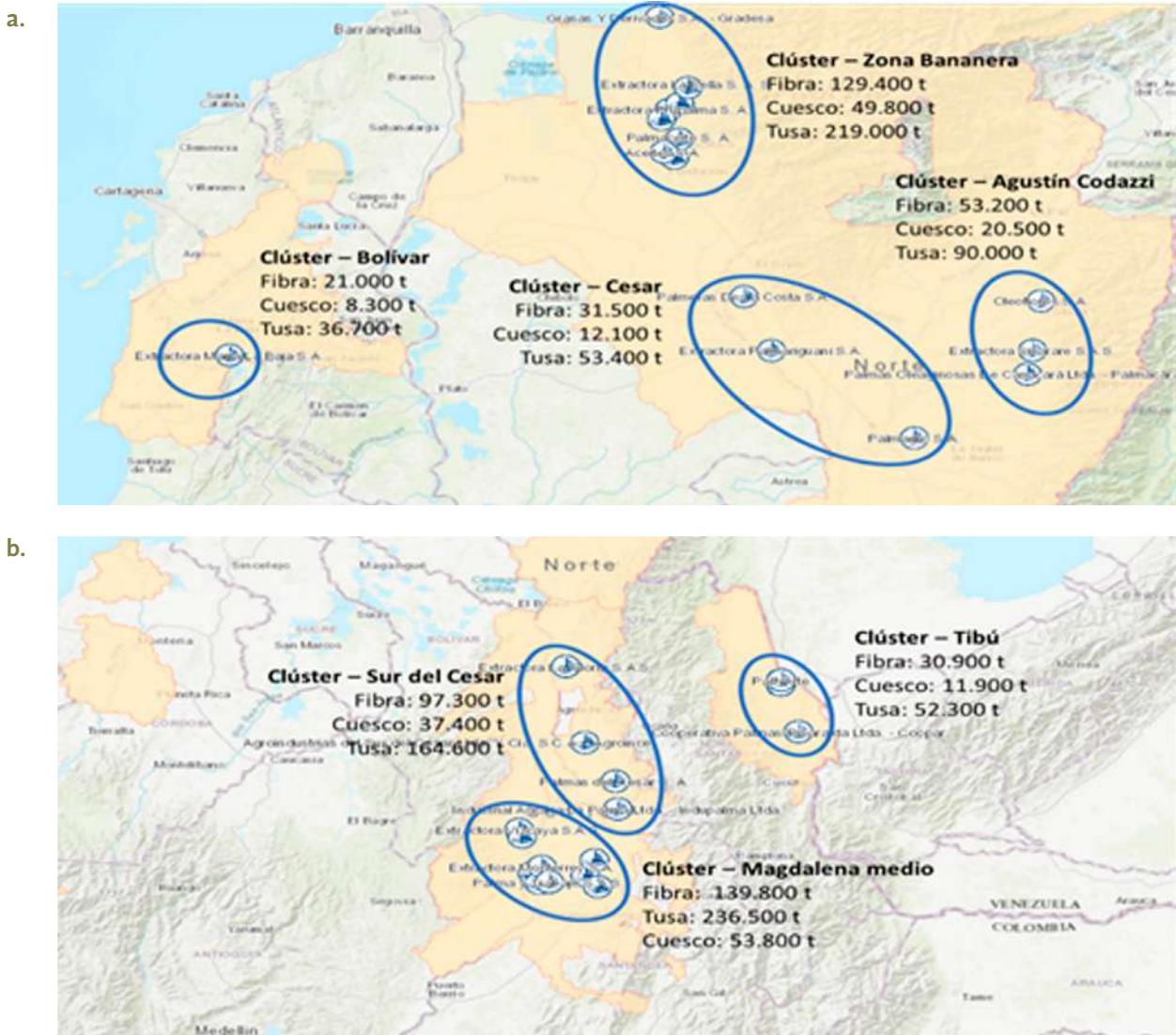
En este sentido, como el aspecto económico puede ser la primera barrera para la adopción de la tecnología de cogeneración, o los volúmenes de producción no son suficientemente altos para garantizar la cantidad de biomasa de manera continua, se propone la creación de un clúster energético palmero como opción de biorrefinería para el sector. La principal ventaja de su formación es que facilita la unión de múltiples actividades económicas en las condiciones geográficas más favorables. Con los datos obtenidos por Cenipalma en el 2018, se estimó el potencial energético para los clústeres distribuidos en las diferentes zonas palmeras del país (Norte, Central, Oriental y Suroccidental) agrupando plantas de beneficio en distancias inferiores a 300 km (Figuras 20 y 21), a partir de datos estándares

reportados por Loh (2017), incluyendo la energía teórica aportada por la tusa (Tabla 7).

Para lograr evaluar el potencial de generación de energía eléctrica, se consideró el uso de toda la biomasa disponible por clúster. Para la estimación del potencial de generación se utilizó el 75 % de la producción nacional del 2018 reportada, lo que equivale al empleo de 2.490.919 toneladas de biomasa. El aprovechamiento de esta en un proceso de cogeneración

representaría potencialmente la generación de 220 GWh/año, equivalente al 0,32 % del consumo nacional anual. Para el sistema de cogeneración con un factor de utilización de 85 % se asume una eficiencia térmica del 60 % y una eléctrica de 30 %, el potencial de generación total para los clústeres energéticos sería de 160 MW. La Figura 22 muestra la distribución de la mayor concentración de potencial eléctrico según los clústeres planteados.

Figura 20. Clústeres energéticos: a) Zona Norte b) Zona Central c) Zona Suroccidental.

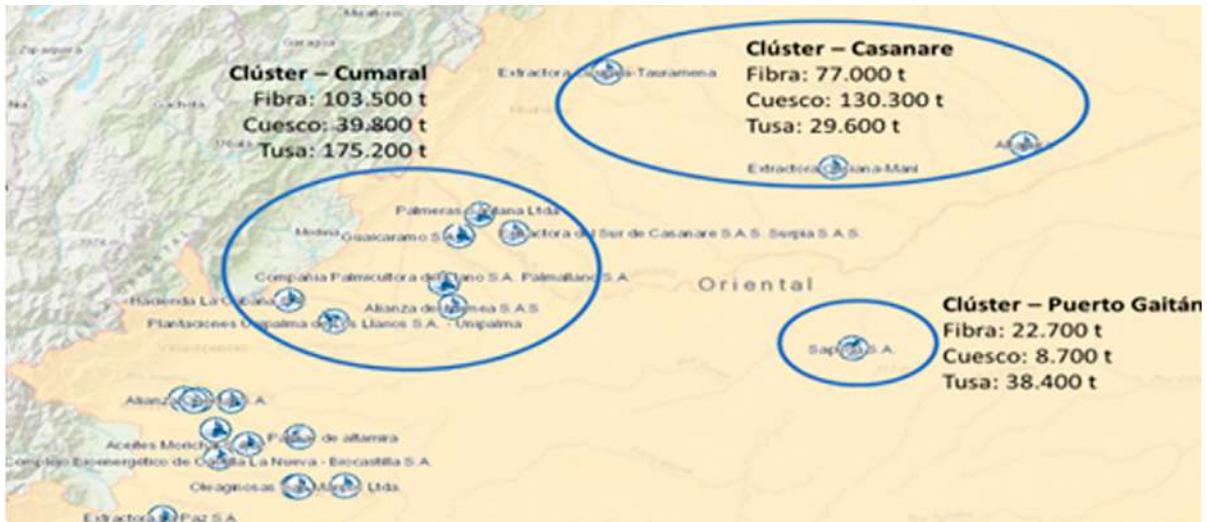


c.



Figura 21. Clústeres energéticos: a) Zona Oriental
 b) Zona Oriental – Serranía de la Macarena

a.



b.

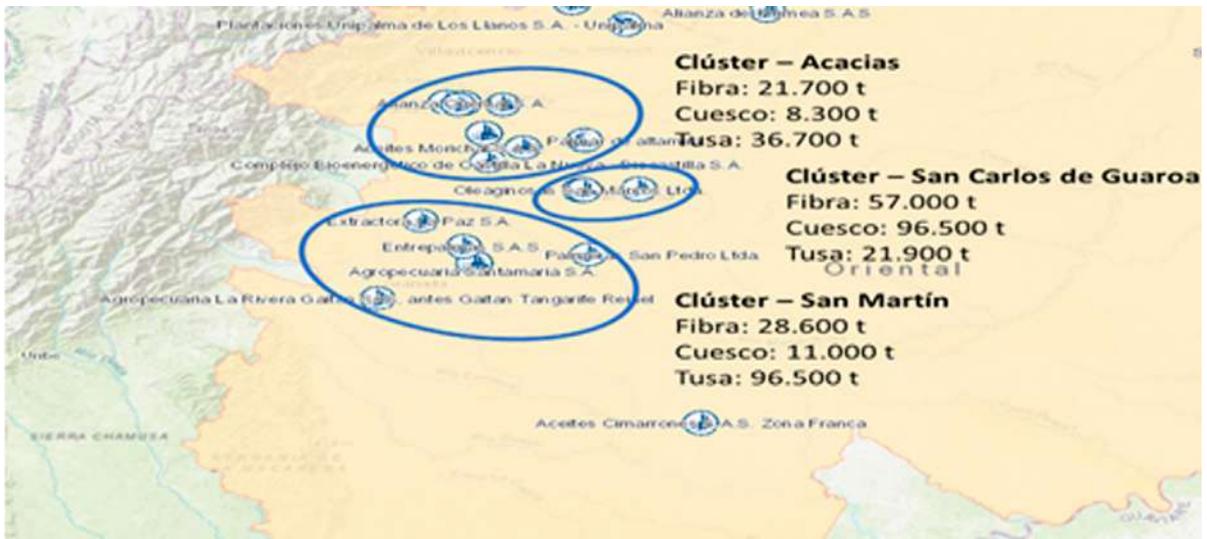
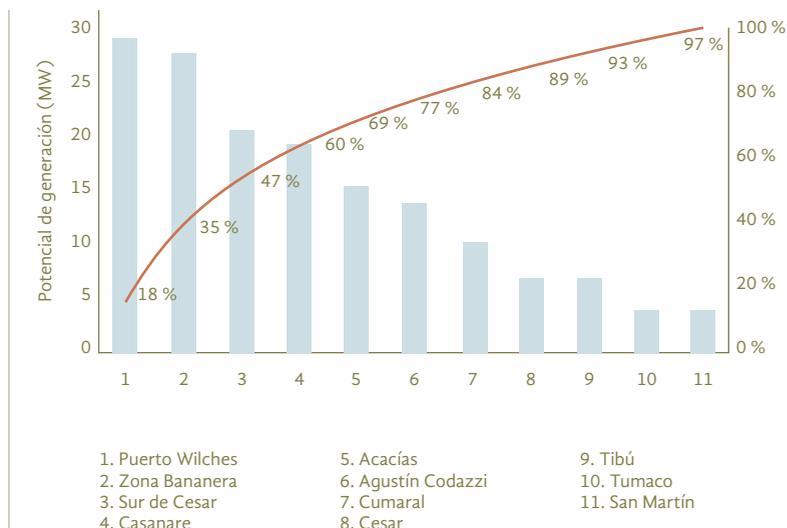


Tabla 7. Propiedades de combustión para biomasa de palma de aceite en Colombia. *En base seca. Fuente: adaptado de Loh (2017).

Biomasa	Proporción de biomasa (kg/t RFF)	Contenido de humedad (%)*	Contenido de cenizas (%)*	Contenido de materia volátil (%)*	Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)
Tusa	200 ± 220	67.00 ± 1.41	4.60 ± 0.50	87.04 ± 0.42	18.88 ± 0.74
Fibra	120 ± 150	37.09 ± 2.06	6.10 ± 0.94	84.91 ± 0.62	19.06 ± 0.32
Cuesco	50 ± 70	12.00 ± 1.08	3.00 ± 1.27	83.45 ± 0.68	20.09 ± 0.43

Figura 22. Potencial de energía eléctrica a partir de clústeres energéticos de zonas palmeras en Colombia.



La Tabla 8 describe los valores brutos de generación de energía térmica y eléctrica para los clústeres energéticos estudiados. Dentro del marco legal colombiano, los de Puerto Wilches, Zona Bananera y Sur del Cesar, tienen el potencial suficiente para operar como planta mayor, la que se considera a partir de una capacidad de generación superior a 20

MW. Esto implica la obligación de tener un despacho centralizado para la venta de energía, es decir, se garantizaría una venta de toda la energía si esta se comercializa a precios competitivos comparados con sistemas de generación convencionales (gas, carbón y diésel), pero también estaría condicionada a regir en un estado de alta disponibilidad.

Tabla 8. Propiedades de combustión para biomasa de palma de aceite en Colombia. *En base seca. Fuente: adaptado de Loh (2017). Potencia estimada a partir de un factor de utilización del 85 %.

Clúster	Energía térmica (Gj)	Energía eléctrica (MWh/Año)	Potencia (MW) ¹
Puerto Wilches	2.455.037	204.587	28.8
Zona Bananera	1.200.048	100.004	27.5
Sur de Cesar	659.992	54.999	20.9

Continúa →

Continuación Tabla 8. Propiedades de combustión para biomasa de palma de aceite en Colombia. *En base seca. Fuente: adaptado de Loh (2017). Potencia estimada a partir de un factor de utilización del 85 %.

Clúster	Energía térmica (Gj)	Energía eléctrica (MWh/Año)	Potencia (MW) ¹
Casanare	1.871.491	155.958	20.1
Acacías	2.575.048	214.587	14.3
Agustín Codazzi	659.221	54.935	13.4
Cumaral	1.798.118	149.843	12.0
Cesar	1.068.271	89.023	7.4
Tibú	479.657	39.971	7.4
Tumaco	1.273.545	106.129	5.7
San Martín	505.460	42.122	5.4

Conclusiones

La agroindustria de la palma de aceite tiene todo el potencial para ser un modelo de sostenibilidad. Sin embargo, la selección de tecnologías de uso de biomasa dentro del concepto de biorrefinería debe corresponder a un minucioso análisis que contemple aspectos económicos, ambientales y sociales. El futuro de las tecnologías promisorias para salir del “valle

de la muerte” solo será posible con el tamaño de escala adecuado. Una de las propuestas más interesantes para el sector es la integración de clústeres energéticos que potencialicen el uso de la biomasa en productos de mayor valor agregado. En definitiva, las opciones de biorrefinería con tecnologías de conversión térmica son las llamadas a jugar un papel protagonista en la conversión de la biomasa residual, dentro de las plantas de beneficio de Colombia.

Referencias

- Abdulrazik, A., Elsholkami, M., Elkamel, A., & Simon, L. (2017). Multi-products productions from Malaysian oil palm empty fruit bunch (EFB): Analyzing economic potentials from the optimal biomass supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 168, 131–148. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.088.
- Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1260–1278. doi:10.1016/j.rser.2014.10.073.
- Ali, A. A. M., Othman, M. R., Shirai, Y., & Hassan, M. A. (2015). Sustainable and integrated palm oil biorefinery concept with value-addition of biomass and zero emission system. *Journal of Cleaner Production*, 91, 96–99. doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.030.
- Arrieta, F. P., Lora, E. S., Yáñez, E., & Castillo, E. (2008). Potencial de cogeneración de energía eléctrica en la agroindustria colombiana de aceite de palma: tres estudios de casos. *Palmas*, 29(4), 59–72.

- Balagurumurthy, B., Singh, R., & Bhaskar, T. (2015). Catalysts for Thermochemical Conversion of Biomass. *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*. Elsevier B.V. doi:10.1016/B978-0-444-63289-0.00004-1.
- Coral, J. D., Woiciechowski, A. L., Filho, A. Z., Brar, S. K., Magalhães, A. I., & Soccol, C. R. (2018). Energetic and economic analysis of ethanol, xylitol and lignin production using oil palm empty fruit bunches from a Brazilian factory. *Journal of Cleaner Production*, *195*, 44–55. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.189.
- Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa*. *Revista Palmas Especial*, *37*, (Especial, Tomo I), 149–156.
- Elo, A. S., De Souza, L. K. C., Trokourey, A., & Jaroniec, M. (2013). Development of microporous carbons for CO₂ capture by KOH activation of African palm shells. *Journal of CO₂ Utilization*, *2*, 35–38. doi:10.1016/J.JCOU.2013.07.003.
- Fedepalma. (2018). Fedepalma, 55 años de gestión gremial para desarrollar y consolidar la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *El Palmicultor*, *552*, 5–7.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). Dynamic adsorption behavior of methylene blue onto oil palm shell granular activated carbon prepared by microwave heating. *Chemical Engineering Journal*, *203*, 81–87. doi:10.1016/J.CEJ.2012.06.073.
- Gale, N., & Thomas, S. (2019). Dose-dependence of growth and ecophysiological responses of plants to biochar. *Science of the Total Environment*, *658*, 1344–1354. doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.104
- García, J. A., Ramírez, N., Rodríguez, D. T., Silva, E., Frear, C. S., Stockle, C., & García, M. (2016a). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, *110*, 99–114. doi:10.1016/j.resconrec.2016.03.022.
- García, J. A., Rodríguez, D. T., Fontanilla, C. A., Ramírez, N. E., Silva, E. E., Frear, C. S., et al. (2016b). Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. *Biomass and Bioenergy*, *95*, 310–329. doi:10.1016/j.biombioe.2016.05.020.
- García, J. A., & Yáñez A., E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, *31*(2), 41–48. Recuperado de: <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1477>
- García, M., & García, J. A. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. *Palmas*, *34*(Especial, Tomo II), 66–84.
- Garver, M. P., & Liu, S. (2014). Development of Thermochemical and Biochemical Technologies for Biorefineries. *Bioenergy Research: Advances and Applications*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-59561-4.00027-9.
- International Energy Agency. (2018). World Energy Outlook 2018. The gold standard of energy analysis. Retrieved from: <https://www.iea.org/weo2018/fuels/>
- De Jong, E., Langewald, H., & Ree, R. van. (2009). IEA Bioenergy Task 42 on Biorefinery. Retrieved from: http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/8/5/4/2e500e0fd19a-4f7f-9360-4e9d5e580b75_Brochure_Totaal_definitief_HR%5B1%5D.pdf
- Jusoh, M., Muis, Z. A., Zakaria, Z. Y., Abdul Murad, S. M., Jamaludin, N. F., Yunus, A., & Hashim, H. (2018). A sustainability performance assessment framework for palm oil mills. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 1679–1693. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.028.
- Kundu, A., Sen Gupta, B., Hashim, M. A., & Redzwan, G. (2015). Taguchi optimization approach for production of activated carbon from phosphoric acid impregnated palm kernel shell by microwave heating. *Journal of Cleaner Production*, *105*, 420–427. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2014.06.093.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management. Science and Technology. Retrieved from: <https://biochar-international.org/book/>

- Loh, S. K. (2017). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285–298. doi:10.1016/j.enconman.2016.08.081.
- Mankins, J. C. (2009). Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, 65(9–10), 1216–1223. doi:10.1016/j.actaastro.2009.03.058.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2017). Acuerdo de Voluntades para la Deforestación Cero en la Cadena de Aceite de Palma en Colombia. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/ACUERDO_DEFORESTACION_CEROCADENA_ACEITE_DE_PALMA__COLOMBIA_Version_para_Suscripcion_28112017.pdf
- Mohd., A. F., Abu, H., Takriff, M. S., & Sheikh, S. R. (2017). A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 20(August), 8–21. doi:10.1016/j.jwpe.2017.09.006.
- Ramírez, N. E.; Silva, A. S.; Garzón, E. M. y Yañez, E. E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *Boletín Técnico*, 30 (30), 1–46. doi:10.5897/AJB11.3582
- Ramírez, N., Arévalo, A., & García J. A. (2015). Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. *Palmas*, 36(4), 41–54.
- Ramírez, N. E., & Faaij, A. P. C. (2018). A review of key international biomass and bioenergy sustainability frameworks and certification systems and their application and implications in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(August), 460–478. doi:10.1016/j.rser.2018.08.001.
- Rodríguez, D., García, J., & Ramírez, N. (2015). Evaluación de la incidencia de la producción de compost, de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. *Palmas*, 36(1), 27–39.
- Roome, N. (2004). Innovation, Global Change and New Capitalism: A Fuzzy Context for Business and the Environment. *Human Ecology Review*, 11(3), 277–279.
- Sadhukhan, J., Martínez, E., Murphy, R. J., Ng, D. K. S., Hassim, M. H., Siew Ng, K., *et al.* (2018). Role of bioenergy, biorefinery and bioeconomy in sustainable development: Strategic pathways for Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(April 2017), 1966–1987. doi:10.1016/j.rser.2017.06.007.
- Silva, E., Palacio, J., García, J., & Barrera, J. (2016). Bioenergía y biorrefinerías para caña de azúcar y palma de aceite. *Palmas*, 37(Tomo II), 119–136.
- Vargas, D., Yañez, E. E., Núñez, J. G., Meneses, A., & Cuéllar, M. (2011). Cogeneración con biomasa de palma de aceite en el sistema eléctrico colombiano: barreras, perspectivas y oportunidades. *Revista Palmas*, 32(3), 49–62.
- Vaskan, P., Pachón, E. R., & Gnansounou, E. (2018). Techno-economic and life-cycle assessments of biorefineries based on palm empty fruit bunches in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3655–3668. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.218.
- Zwilling, M. (2013). Estrategia 10 caminos para cruzar el “valle de la muerte” y emprender. Recuperado de: <https://www.sintetia.com/10-caminos-para-cruzar-el-valle-de-la-muerte-y-emprender/>