

## Emisiones de GEI y desempeño económico del sector palmero en Colombia: escenario actual y perspectivas a largo plazo\*

The GHG Emissions and Economic Performance of the Colombian Palm Oil Sector: Current Status and Long-term Perspectives

**CITACIÓN:** Ramírez-C., N. E., Munar-F., D. A., García-Núñez, J. A., Mosquera-Montoya, M. & Faaij, A. P. C. (2021). Emisiones de GEI y desempeño económico del sector palmero en Colombia: estado actual y perspectivas a largo plazo. *Palmas*, 42(2), 15-48.

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa, Huella de carbono, Reservas de carbono, LUC, POM, NER.

**KEYWORDS:** Biomass, Carbon footprint, Carbon stock, LUC, POM, NER.

\* Traducido del original *The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector: current status and long-term perspectives*, Journal of Cleaner Production, 258, 120757. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución Creative Commons, que permite su uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que el trabajo original se cite correctamente.

### RAMÍREZ C. NIDIA. E.

Asistente de investigación, Programa de Procesamiento, Cenipalma  
Instituto de Investigación en Sostenibilidad Energética de Groningen, Universidad de Groningen, Países Bajos  
[nramirez@cenipalma.org](mailto:nramirez@cenipalma.org)

### MUNAR F. DAVID. A.

Auxiliar de investigación, Programa de Procesamiento, Cenipalma

### GARCÍA NÚÑEZ JESÚS A.

Coordinador del Programa de Procesamiento, Cenipalma

### MOSQUERA MONTOYA M.

Coordinador de la Unidad de Validación, Cenipalma

### FAAIJ ANDRÉ P. C.

Profesor distinguido, Universidad de Groningen, Países Bajos  
Director de ciencia, TNO Energy Transition, Groningen, Países Bajos

## Resumen

La expansión de las plantaciones de palma de aceite, tanto para la extracción de aceite de palma crudo (APC) como para la elaboración de productos de origen biológico, ha generado gran preocupación en torno al impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de este

cultivo. Aunque Colombia tiene el potencial para producir bienes de origen biológico sostenibles a partir del cultivo de palma de aceite, las emisiones nacionales de GEI no han sido reportadas para este sector. Por ello, la recolección de datos primarios consolidados del sector palmicultor colombiano representa un interesante desafío. A partir de ese interés, el presente estudio logró la recolección de datos del 70 % de la producción nacional de racimos de fruta fresca (RFF) con el fin de analizar el estado actual de la producción de APC, incorporando información sobre (i) el cálculo de emisiones de GEI, (ii) la relación de energía neta (NER, por sus siglas en inglés) y (iii) el desempeño económico del proceso. Este análisis considera dos escenarios futuros en los que se optimiza la cadena de producción de APC para reducir las emisiones de GEI. El escenario futuro A contempla la producción de biodiésel (BD), biogás, compost y la cogeneración de energía. Por su parte, el escenario futuro B considera la producción de BD, biogás, pélets y la cogeneración de energía. La metodología empleada para ambos escenarios incluye una evaluación del ciclo de vida y un análisis económico. Los resultados muestran un potencial considerable para mejorar la producción de APC y lograr una reducción de 55 % en las emisiones de GEI. Así mismo, nuestros hallazgos señalan que es necesario mitigar el impacto del cambio en el uso del suelo para reducir dichas emisiones, por lo cual la expansión sostenible del cultivo de palma de aceite deberá desarrollarse en áreas con bajas reservas de carbono o en zonas aptas y disponibles para este cultivo, evitando así la deforestación de áreas naturales. Sumado a lo anterior, resulta necesario incrementar el rendimiento de este cultivo para así minimizar el uso del suelo, emplear la biomasa residual en la elaboración de productos de origen biológico y capturar biogás para reducir las emisiones de gas metano. En cuanto al ciclo de producción de BD, el análisis de la NER muestra que la energía fósil consumida es menor que la energía renovable producida. Respecto al desempeño económico, se evidencia que una cadena de producción optimizada reduciría los costos de capital y los gastos operativos en 20 %, aproximadamente.

## Abstract

Increasing oil palm plantations, both for obtaining crude palm oil (CPO) and for the production of biobased products, have generated growing concern about the impact of greenhouse gas (GHG) emissions on the environment. Colombia has the potential to produce sustainable biobased products from oil palm. Nevertheless, national GHG emissions have not yet been reported by this sector. Achieving the collection of the total primary data from the oil palm sector, in Colombia, entails a tremendous challenge. Notwithstanding, for this study, the data collection of 70% of the production of fresh fruit bunches (FFB) was achieved. Therefore, current situation of CPO production in Colombia is analyzed, including (i) GHG emissions calculation, (ii) net energy ratio (NER), and (iii) economic performance. Moreover, the analysis includes two future scenarios, where the CPO production chain is optimized to reduce GHG emissions. Future scenario A produces biodiesel (BD), biogas, cogeneration, and compost; while future scenario B produces BD, biogas, cogeneration, and pellets. The methodology, for all the scenarios, includes life-cycle assessment and economic analysis evaluation. The results show a significant potential for improving the current palm oil production, including a 55% reduction in GHG emissions. The impact of land-use change must be mitigated to reduce GHG emissions. Therefore, a sustainable oil palm expansion should be in areas with low carbon stock or areas suitable/available to the crop (e.g., cropland, pastureland). Avoiding the deforestation of natural forests is required. Besides, crop yield should be increased to minimize the land use, using biomass to produce biobased products, and capture biogas to reduce methane emissions. In the biodiesel production life-cycle, the NER analysis shows the fossil energy consumed is lower than the renewable energy produced. Regarding the economic performance, it shows that in an optimized production chain, the capital expenditure and operational expenditure will decrease by approximately 20%.

## Lista de abreviaturas

<b>bbbl</b>	Barriles de petróleo	<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno
<b>BD</b>	Biodiésel	<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización
<b>BioPB</b>	Modelo desarrollado por Cenipalma, Colombia	<b>kg</b>	Kilogramos
<b>C</b>	Carbono	<b>kW</b>	Kilovatios
<b>CAPEX</b>	Gasto de capital	<b>ACV</b>	Análisis del ciclo de vida
<b>CH<sub>4</sub></b>	Gas metano	<b>ICV</b>	Inventario del ciclo de vida
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono	<b>LUC</b>	Cambio en el uso del suelo (en inglés)
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Equivalentes de dióxido de carbono	<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>DOQ</b>	Demanda de oxígeno químico	<b>Mha</b>	Millones de hectáreas
<b>COP</b>	Pesos colombianos	<b>MJ</b>	Megajulios
<b>APC</b>	Aceite de palma crudo	<b>VAN</b>	Valor actual neto
<b>RFV</b>	Racimos de fruta vacíos	<b>NER</b>	Relación de energía neta (en inglés)
<b>AGL</b>	Ácido graso libre	<b>POM</b>	Planta de beneficio de aceite de palma (en inglés)
<b>RFF</b>	Racimos de fruta fresca	<b>POME</b>	Efluente de planta de beneficio de aceite de palma (en inglés)
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero	<b>ppm</b>	Partes por millón, que también significa miligramos por litro
<b>h</b>	Hora	<b>SBE</b>	Tierra de blanqueo gastada durante el proceso de refinación del aceite de palma (en inglés)
<b>ha</b>	Hectáreas	<b>t</b>	Toneladas
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia	<b>UPRA</b>	Unidad de Planeación Rural Agropecuaria
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	<b>USD</b>	Dólares de Estados Unidos

## Introducción

El aceite de palma es considerado como un motor económico (Thomas *et al.*, 2015) debido a su versatilidad, alta productividad por hectárea, la cual es cercana a 3,4 t de aceite de palma crudo (APC) (EPOA, 2016; Fedepalma, 2017a; Fry, 2017), y menor costo de producción en comparación con otros aceites vegetales (Khasanah *et al.*, 2015). Indonesia (12,7 Mha) y Malasia (5,2 Mha) son los países productores con mayor área sembrada con palma de aceite, concentrando aproximadamente 79 % del área total de este cultivo a escala mundial. Colombia (559.582 ha), por su parte, es el quinto país productor, con una

participación de 2,1 % en el área total de producción (Fedepalma, 2020).

Dado que la demanda actual de alimentos y productos biológicos ejerce presión sobre la producción agrícola, el sector de la palma de aceite se convierte en un actor clave para satisfacer parte de estos requerimientos (Mesa, 2017). Sin embargo, este cultivo ha suscitado controversia debido a la deforestación de bosques tropicales ocasionada por su expansión en algunos países productores (Khasanah, 2019; Ramdani e Hino, 2013). El debate en torno a este cultivo se centra en los riesgos ambientales asociados con la deforestación, tales como la pérdida de biodiversidad, el detrimento en la calidad de los suelos, afectaciones

al suministro de agua, perjuicios a los paisajes naturales, cambios en el uso del suelo (LUC, en inglés) y la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente por la remoción de reservas de carbono en el suelo (Khatun *et al.*, 2017; Thomas *et al.*, 2015).

De otro lado, el sistema de contabilización de las emisiones de GEI de esta agroindustria, especialmente la bioenergía, ha sido cuestionado al ser considerado como neutral en carbono. No obstante, para justificar el potencial de reducción de emisiones en este sector, un análisis de la bioenergía producida debe incluir la fuente de la biomasa, los efectos del cultivo sobre el uso del suelo, el proceso de producción y las emisiones del uso final de la mencionada bioenergía (Searchinger *et al.*, 2009). De esta manera, las emisiones de GEI a partir de bioenergía son representativas únicamente cuando el crecimiento y la recolección de biomasa capturan carbono por encima del nivel de secuestro de este compuesto (Searchinger *et al.*, 2009). Por lo tanto, es necesario considerar una fuerte relación entre el LUC y las emisiones de GEI, dado que el LUC en áreas que inicialmente contaban con reservas de carbono superiores a las de zonas con plantaciones de palma de aceite da como resultado un déficit de carbono en la superficie. Así, es posible que no se registre un déficit de este tipo si las plantaciones de palma de aceite son establecidas en áreas anteriormente ocupadas por arbustos o pasturas (Khasanah *et al.*, 2015), por ejemplo.

Si bien la expansión del cultivo de palma de aceite ha tenido una fuerte asociación con la deforestación de zonas naturales en los principales países productores (Khasanah, 2019), en Colombia se reporta una situación diferente, puesto que el crecimiento del área sembrada se ha dado a partir de la conversión de zonas antes ocupadas por matorrales, tierras de cultivo y pasturas para ganado (Castanheira *et al.*, 2014; Castiblanco *et al.*, 2013; Furumo y Aide, 2017; Henson *et al.*, 2012).

Diversos estudios han reportado las emisiones de GEI generadas por la producción de aceite de palma (Kusin *et al.*, 2017). No obstante, estas investigaciones emplearon varias suposiciones, límites del sistema productivo y unidades funcionales para calcular y reportar dichas emisiones. Teniendo en cuenta que las emisiones del sector agrícola deben armonizarse en torno al flujo del principal producto comercializado (Durlinger *et al.*, 2017), las emisiones de la industria

del aceite de palma deben reportarse en toneladas de APC. Como muestra de la tendencia opuesta, un estudio sobre dos sistemas de producción de APC en Malasia e Indonesia da cuenta de las emisiones generadas en toneladas de racimos de fruta fresca (RFF), en vez de utilizar toneladas de APC como punto de referencia (Stichnothe y Schuchardt, 2011). En contraste, un estudio realizado en Tailandia sobre emisiones únicamente para la fase de siembra expresa sus resultados en RFF, al ser estos el principal producto obtenido por esta agroindustria (Silalertruksa *et al.*, 2017).

Algunas investigaciones señalan que las emisiones de GEI en la producción de APC de Malasia e Indonesia (Lam *et al.*, 2019; Stichnothe y Schuchardt, 2011; Wicke *et al.*, 2008) son considerablemente superiores a las emisiones generadas por esta actividad en Colombia (Castanheira *et al.*, 2014; Garcia-Nunez *et al.*, 2016; Henson *et al.*, 2012; Rivera-Méndez *et al.*, 2017; Yáñez *et al.*, 2011). Por ejemplo, un estudio realizado en Indonesia reportó una huella de GEI para la producción de APC en un rango entre 0,7 y 26 CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC (Lam *et al.*, 2019), mientras que, para Colombia, una investigación dio como resultado un rango entre 3,0 y 5,0 CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC (Castanheira *et al.*, 2014). No obstante, existe consenso sobre el potencial de reducción de las emisiones de esta industria en todo el mundo a partir de la implementación de buenas prácticas agroindustriales. Los fundamentos de esta propuesta se basan en la cero deforestación, el manejo adecuado de suelos y paisajes, la no intervención de suelos con altas reservas de carbono, el aumento del rendimiento de este cultivo de manera sostenible y el uso de biomasa para la elaboración de productos de origen biológico (Abdul-Manan, 2017; Afriyanti *et al.*, 2016; Garcia-Nunez *et al.*, 2016; Khasanah *et al.*, 2015; Lam *et al.*, 2019; RSPO, 2017; Woittiez, 2019).

En este contexto, Colombia tiene la capacidad de expandir su área sembrada de manera sostenible y sin generar deforestación, pasando de 0,5 (Fedepalma, 2018) a 23 Mha (UPRA, 2018). Sin embargo, para ello se requiere de directrices, políticas y criterios que permitan promover y regular los recursos naturales y el uso eficiente de los suelos aptos para este cultivo (Castanheira *et al.*, 2014; Khasanah, 2019; Woittiez, 2019). Como resultado, el Gobierno Nacional está trabajando en la zonificación del sector agrícola y forestal en aras de identificar las áreas geográficas

adecuadas para la producción agrícola y ganadera (UPRA, 2019), enfatizando que el uso de estas zonas estará condicionado a las características ambientales, socioeconómicas y de gestión de cada territorio y cadena productiva (UPRA, 2016).

Por lo anterior, y a partir de un creciente interés por los asuntos sociales y ambientales (Espinosa, 2016), el sector palmero colombiano se ha adherido a varias iniciativas para mejorar la sostenibilidad de la producción de APC (MADS, 2017a), lo cual se suma a la transición de esta industria hacia un modelo de desarrollo bajo en carbono que permita reducir las emisiones de GEI, expandir las áreas protegidas, promover el desarrollo sostenible y evitar la deforestación (García-Arbeláez *et al.*, 2016; MADS, 2017b; WWF Colombia, 2017).

Aunque en Colombia se han realizado varios estudios para cuantificar las emisiones de GEI en la producción de aceite de palma, estos se basan en un número limitado de plantas de beneficio o plantaciones, sin considerar la cadena de producción del país en su conjunto. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la cadena de producción de APC en Colombia a partir del análisis de su estado actual y dos escenarios futuros propuestos. Este análisis incluye el cálculo de (i) las emisiones de GEI, (ii) la relación de energía neta y (iii) el desempeño económico del sistema (valor actual neto, tasa interna de retorno, gasto de capital y gasto

operativo). La evaluación de los escenarios futuros incluye la producción de biodiésel (BD), la cogeneración de energía, la producción de compost/pélets y la captura de biogás.

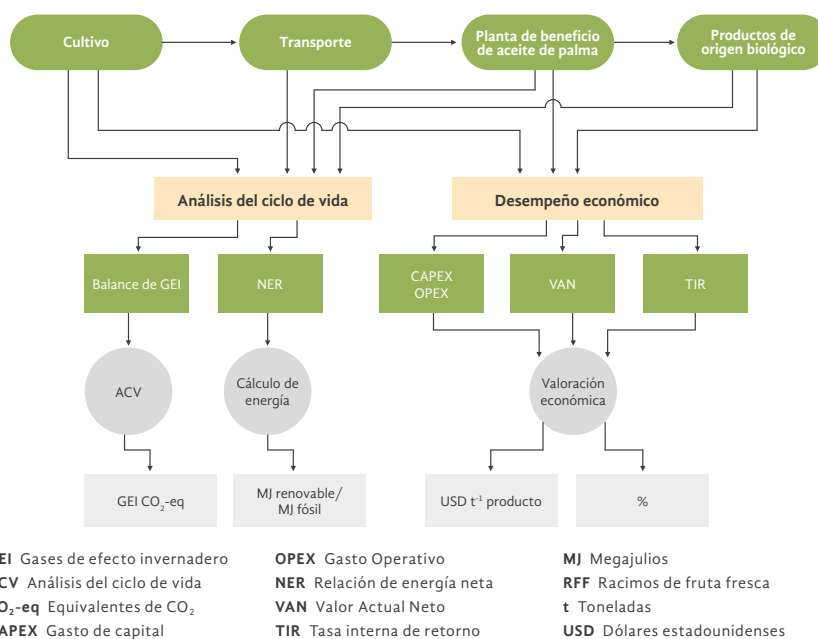
Luego de esta introducción, el apartado a continuación describe la metodología empleada, los escenarios considerados y las fuentes de recolección de datos. Posteriormente, se presentan los resultados del balance de masa y energía, el balance de GEI (a escala nacional y regional) y el desempeño económico del sistema. Seguido, se aborda la discusión de los hallazgos. Por último, se presentan las conclusiones de la investigación.

## Metodología

Este estudio analizó las emisiones de GEI y el desempeño económico del sector palmicultor colombiano frente al escenario actual (2017) y dos escenarios futuros. Adicionalmente, se evalúa el balance de energía de la cadena de producción mediante el indicador relación de energía neta (NER, en inglés). Para el desempeño económico, los indicadores evaluados son el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el gasto de capital (CAPEX) y el gasto operativo (OPEX). La Figura 1 muestra el flujo de la metodología empleada y el tipo de resultados obtenidos.

**Figura 1.** Diagrama del flujo de la metodología desarrollada para esta investigación

Fuente: elaboración propia con base en van der Hilst (2012)



Nota: los productos de origen biológico incluyen BD, biogás, compost, pélets y cogeneración de energía.

## Escenarios

### Escenario actual

Este escenario corresponde al estado actual de la cadena de producción del aceite de palma en Colombia (2017), donde se incluye el cultivo de palma de aceite, el transporte de RFF y las plantas de beneficio de aceite de palma (POM, en inglés). Las emisiones de este escenario se analizan a escala nacional y regional.

### Escenarios futuros

Se analiza una producción futura de APC optimizada que busca minimizar las emisiones de GEI y reducir los costos de producción. Los escenarios futuros incluyen la cogeneración de energía<sup>1</sup> y la producción de compostaje y pélets<sup>2</sup>, así como la captura de biogás para su uso como fuente de energía renovable. La producción de biodiésel es incluida dentro de estos escenarios dado que la legislación colombiana permite el uso de biocombustibles en la matriz de suministro de combustibles fósiles para el transporte terrestre (UPME, 2009). A continuación, se describen los dos escenarios futuros propuestos.

#### Escenario futuro A

Las mejoras propuestas dependen de un aumento en el rendimiento del cultivo de palma, una reducción en el uso de fertilizantes químicos, la mitigación del LUC y la producción de biomasa de valor agregado. Para mitigar las emisiones generadas por LUC, los cultivos de palma de aceite deben ser establecidos en suelos con bajas reservas de carbono, como suelos degradados o de uso agrícola (Castiblanco *et al.*, 2013; Wicke *et al.*, 2012). Sin embargo, cuando esto ocurre puede desplazarse la producción de alimentos y forrajes hacia otras áreas (Gerssen-Gondelach, 2015). Por lo tanto, es esencial que el uso del suelo sea complementado con un alto rendimiento de los cultivos establecidos en él, a fin de mitigar el LUC en términos de emisiones de

1 Ver figura 13, anexo A.2, en el documento de información complementaria de este artículo, disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>

2 Ver el trabajo de García-Núñez *et al.* (2016) para identificar otros usos de la biomasa.

GEI (Wicke *et al.*, 2012). Este escenario incluye el análisis de plantaciones de palma de aceite, el transporte de RFF, las POM, la planta de BD, la cogeneración de energía y el uso de racimos de fruta vacíos (RFV) para la producción de compost.

#### Escenario futuro B

Este escenario incluye todas las condiciones mencionadas en el escenario futuro A, sumadas al uso de RFV para la producción pélets, en lugar de compost.

## Emisiones de GEI

La reducción de las emisiones de GEI es un precursor de los productos sostenibles de origen biológico. Por ello, este indicador es incorporado al análisis con el fin de evaluar el estado actual y los escenarios futuros de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia; la Figura 2 muestra los límites del sistema para cada escenario. De otro lado, se realiza un inventario detallado del ciclo de vida (ICV) de la producción de APC a través del modelo BioPB<sup>3</sup>. En esta fase se utilizó una hoja de cálculo en Excel para multiplicar los insumos del ICV con el factor de emisión correspondiente para la producción de biodiésel (es decir, refinación física, transesterificación, esterificación de ácidos grasos libres (AGL), purificación de BD, purificación de glicerina y recuperación de metanol); este cálculo adopta la unidad funcional 1 t APC, al ser este producto la principal salida de la cadena de producción actual. Por su parte, el cálculo de emisiones<sup>4</sup> se llevó a cabo mediante la metodología de análisis del ciclo de vida (ACV) (ISO 14067), las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático<sup>5</sup> (IPCC, en

3 Modelo desarrollado por Cenipalma que contiene una base de datos de la cadena de producción del aceite de palma en Colombia y sus productos de origen biológico. Este permite calcular los flujos de masa y energía dentro de los límites del sistema para la producción de APC en cada uno de los escenarios considerados.

4 Los GEI analizados fueron CH<sub>4</sub> (producido durante la degradación orgánica del efluente de la planta de beneficio de aceite de palma [POME]), CO<sub>2</sub> (producido a lo largo de la cadena de producción de APC) y N<sub>2</sub>O (generado por el manejo del suelo y la fertilización química).

5 Se emplearon las ecuaciones 2.1 (calcular los cambios anuales en las reservas de carbono), 2.5 (emisiones de LUC), 11.1, 11.0 y 11.10 (emisiones de N<sub>2</sub>O).

inglés), información disponible en las bases de datos de Ecoinvent y el uso del *software* SimaPro 8.5. Por último, para determinar el impacto del LUC en las emisiones de GEI bajo el escenario actual, se analizaron los valores de las reservas de carbono en áreas convertidas al cultivo de palma de aceite en Colombia.

## Relación de energía neta (NER)

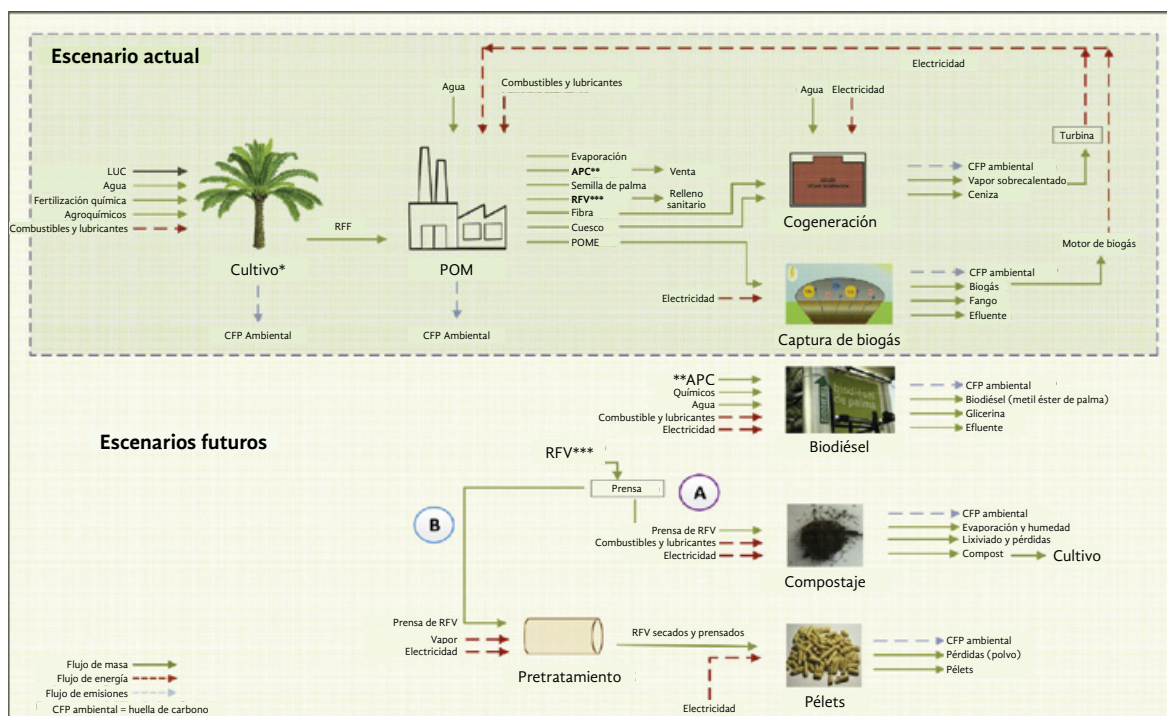
La NER es un indicador del balance de energía en el ciclo de vida de un producto que se expresa como la relación entre la energía renovable producida (productos) y la energía fósil consumida (insumos) (García-Núñez *et al.*, 2016; Yáñez *et al.*, 2009). Por lo anterior, este indicador fue seleccionado para efectuar la comparación de los distintos escenarios. En el escenario actual, la suma de los insumos de energía fósil incluye el diésel utilizado para el cultivo, el transporte de RFF y la operación de la POM. La suma de los productos de energía renovable incluye al APC y los excedentes de energía. En el escenario

futuro A, los insumos de energía fósil incluyen el diésel utilizado en el cultivo, el transporte de RFF, la operación de la POM, la producción de compost y la planta de BD. En el escenario futuro B, los insumos de energía fósil incluyen el diésel utilizado en el cultivo, el transporte de RFF, la operación de la POM, la planta de BD y la producción de pélets.

## Desempeño económico

Para evaluar el desempeño económico de la cadena del aceite de palma, se calcularon los indicadores VAN, TIR, CAPEX y OPEX para todos los escenarios, asumiendo que una plantación de palma de aceite tiene una vida útil de 30 años. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta los datos recolectados durante la fase de trabajo de campo e información de estudios previos (Mosquera *et al.*, 2018). Se asume que la inversión CAPEX tiene lugar durante el primer año (costos de adquisición, compra de predios, maquinaria y equipos, etc.). El OPEX incluye todas

**Figura 2.** Límites del sistema para el escenario actual, el escenario futuro A (producción de compost) y el escenario futuro B (producción de pélets)



Fuente: elaboración propia.

las actividades relacionadas con la producción de RFF (cultivo), APC (planta de beneficio) y planta de BD. El VAN<sup>6</sup> y la TIR se utilizan para determinar la rentabilidad del negocio.

## Fuentes de los datos

Los datos<sup>7</sup> que sirvieron de insumo para esta investigación fueron recolectados durante visitas de campo a 28 POM en tres zonas palmeras de Colombia, las cuales representaron el 70 % de los RFF procesados durante 2017. Si bien en el país se distinguen cuatro zonas palmeras, este estudio se concentró en tres de ellas, a saber: la Zona Central (10 plantas de beneficio), la Zona Oriental (10 plantas de beneficio) y la Zona Norte (8 plantas de beneficio). La Zona Suroccidental no fue incluida debido a que su producción de aceite fue considerablemente inferior a la reportada en las otras zonas. Los datos sobre producción corresponden a información de 11 plantaciones que pertenecen a los propietarios de algunas de las 28 POM analizadas.

## Datos de emisiones en el escenario actual

Las emisiones del escenario actual de esta agroindustria fueron calculadas para cada una de las 28 POM. Con el objetivo de examinar las emisiones regionales y nacionales, se calculó el volumen de emisiones pro-

6 El VAN muestra la diferencia entre todos los ingresos y gastos, expresada en la moneda actual. La TIR considera los retornos de la inversión esperados a futuro. Un VAN igual o mayor a cero indica que el proyecto es viable. Cuando la TIR es igual a la tasa de descuento y el VAN es igual a cero, es necesario considerar la viabilidad de un proyecto (Sapag y Sapag, 2008).

7 Los datos primarios son fundamentales para evaluar cualquier escenario posible, puesto que permiten reducir la suposición presentada y reducir la incertidumbre de los resultados. No obstante, obtener información completa para un sector específico no es tarea fácil. Actualmente, Colombia cuenta aproximadamente con 65 POM en operación y más de 5.000 plantaciones de palma de aceite, por lo que recolectar información de todas ellas sería una tarea monumental que demandaría además una gran inversión de recursos humanos y económicos. A pesar de ello, este trabajo logró recolectar información primaria del 70 % de los RFF procesados en el país durante la vigencia 2017 (es decir, 28 POM), lo cual es representativo y permite formular recomendaciones específicas y estratégicas para el sector en su conjunto.

medio de las 28 POM, lo cual se explica con mayor detalle en las siguientes secciones. Adicionalmente, para analizar el impacto del LUC en las emisiones de GEI en el escenario actual, se realizó una evaluación de los valores de reservas de carbono en los suelos convertidos a palma de aceite.

## LUC en el escenario actual

La Tabla 1 muestra el porcentaje de áreas convertidas a cultivos de palma de aceite a escala regional y nacional. La escala regional se enfoca en un análisis de las tres zonas palmeras mencionadas anteriormente, las cuales tienen diferencias en términos de clima, tipo de suelo, cobertura terrestre y biodiversidad (WWF Colombia, 2017), así como distintos enfoques de manejo agroindustrial (Castiblanco *et al.*, 2015; Henson *et al.*, 2012). Debido a ciertas limitaciones para obtener información completa y actualizada sobre el LUC, se emplearon datos nacionales (Torres, 2018) y regionales (Castiblanco *et al.*, 2013) reportados por otros trabajos, asumiendo que estos son representativos del tipo de LUC y de los efectos de las reservas de carbono. No obstante, es pertinente mencionar que existe cierto grado de incertidumbre frente al tema. Nuestros cálculos están basados en una vida útil de 30 años para un cultivo, e incluyen biomasa subterránea y superficial (planta de palma de aceite, coberturas terrestres y materia orgánica). Además, se asume que la asimilación de CO<sub>2</sub> en el cultivo ocurre en el tronco y las frondas de la palma, por lo que los RFF (APC, almendra, RFV, fibra y cuesco) son considerados neutrales en términos de carbono (Wicke *et al.*, 2008).

## Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para comparar el impacto de las emisiones generadas por LUC relacionadas con múltiples valores de reservas de carbono en varias categorías de uso del suelo para Colombia. La Tabla 2 muestra las categorías de uso del suelo que han sido convertidas a palma de aceite. Cada categoría tiene tres valores de reservas de carbono reportados en la literatura, los cuales se dividieron en valor máximos, valores mínimos y un valor definido como “nacional”, que corresponde a una estimación realizada para analizar el impacto de las emisiones por LUC en el escenario actual de la agroindustria palmera.



**Tabla 1.** Uso de los suelos convertidos a palma de aceite a escala nacional y regional (2000-2012)

Uso del suelo/cobertura	% cobertura terrestre convertida a palma de aceite			
	Nacional <sup>a</sup>	Regional <sup>b</sup>		
		Norte	Central	Oriental
Bosques	5,9	3,3	10,9	5,7
Cultivos estacionales	23,7	4,1	0,2	11,7
Cultivos perennes	1,4	40,6	6,4	4,3
Áreas agrícolas heterogéneas	-	23,6	20,0	5,5
Otras coberturas <sup>c</sup>	3,6	0	5,3	3

<sup>a</sup> Adaptado de Torres (2018), quien estudió datos oficiales del IDEAM y otras instituciones gubernamentales para el periodo 2000-2012.

<sup>b</sup> Adaptado de Castiblanco *et al.* (2013), quienes presentan datos del IDEAM, trabajo de campo y datos de satélite para el periodo 2002-2008.

<sup>c</sup> Incluye zonas urbanizadas, suelo con escasa vegetación y cuerpos de agua.

**Tabla 2.** Valores de reservas de carbono en las categorías de uso del suelo en Colombia

Categorías de uso del suelo	t C ha <sup>-1</sup>		
	Nacional <sup>a</sup>	Mín.	Máx.
Bosque	147,5	48,1 <sup>a</sup>	211 <sup>c</sup>
Vegetación herbácea	14,1	14,1 <sup>a</sup>	113 <sup>c</sup>
Pastos	6,4	6,4 <sup>a</sup>	7,4 <sup>b</sup>
Cultivos estacionales	4,2	4,2 <sup>a</sup>	33,1 <sup>c</sup>
Cultivos perennes	28,9	28,9 <sup>a</sup>	28,9 <sup>a</sup>
Áreas agrícolas heterogéneas	5,8	5,8 <sup>a</sup>	5,8 <sup>a</sup>
Otras coberturas (suelo despejado, vegetación escasa y cuerpos de agua)	0	0 <sup>b</sup>	16,4 <sup>b</sup>
Plantaciones de palma de aceite	113 <sup>d</sup>	113 <sup>d</sup>	129 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Datos de Yepes *et al.* (2011). Los valores de reservas de carbono solo incluyen biomasa superficial. Debido a la incertidumbre en las estimaciones de las emisiones de GEI relacionadas con LUC, el IDEAM estimó las emisiones de carbono a partir de la conversión de bosques en el país. Los valores de referencia para algunos usos del suelo utilizados en este estudio fueron clasificados como "Nacional".

<sup>b</sup> Datos de Henson *et al.* (2012).

<sup>c</sup> Datos de Castanheira *et al.* (2014).

<sup>d</sup> Datos de Rivera-Méndez *et al.* (2017). El valor de reservas de carbono incluye a la planta de palma de aceite (tronco, fronda, raíces), la cobertura vegetal y la materia orgánica relacionada.

### Manejo de la plantación en el escenario actual

En esta dimensión se incluyen insumos tales como agroquímicos, agua y electricidad. No se incluye la etapa de vivero. Se considera la aplicación de ferti-

lizante químico y el consumo de combustible (por ejemplo, diésel para el transporte de RFF y la gasolina utilizada por los supervisores en campo). El rendimiento promedio de cultivo considerado es de 19,3 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

## POM en el escenario actual

La fibra y el cuesco son utilizados como combustible para generar vapor. Sin embargo, este trabajo no tiene en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> de la quema de biomasa en caldera, dado que estas tienen una fuente biogénica. Así, se considera 30 t RFF h<sup>-1</sup> como la escala de producción de las POM. No se considera tampoco el proceso de extracción de aceite de palmiste ni la producción de torta de palmiste. Los datos recolectados durante la fase de trabajo de campo muestran que solo 8 de las 28 POM estudiadas realiza captura de biogás, y solo 4 de estas genera electricidad a partir de este compuesto<sup>8</sup>.

## Datos de emisiones en los escenarios futuros

Para ambos escenarios futuros (A y B) se calculó el volumen de emisiones teniendo en cuenta un sistema optimizado para la cadena de APC a partir de la generación de productos de origen biológico. En el escenario futuro A se analizó la producción de BD<sup>9</sup>, biogás, compost y la cogeneración de energía. En el escenario B se analizó la producción de BD, biogás, pélets y la cogeneración de energía.

## LUC en los escenarios futuros

Es necesario considerar las eventuales emisiones generadas por LUC como resultado de la expansión de las plantaciones de palma de aceite con el fin de evitar pérdidas de carbono asociadas a procesos de deforestación. La Figura 3 muestra un mapa de aptitud del suelo<sup>10</sup> para cultivos de palma de aceite en

Colombia, así como los límites de las plantaciones actuales (en púrpura). Esta figura también muestra las áreas con potencial para la expansión de este cultivo, que se estiman en aproximadamente 23 Mha y se ubican en las zonas palmeras Oriental, Central y Norte. Los puntos marcados en verde oscuro representan las áreas con alto potencial (5,2 Mha), mientras que el verde claro da cuenta de un potencial moderado (10,9 Mha) (UPRA, 2018).

De acuerdo con lo anterior, las áreas más favorables para la expansión del cultivo de palma de aceite corresponden a suelos de uso agrícola (cultivo) y ganadero (pastos) (Castiblanco *et al.*, 2013, UPRA, 2016), lo que significa que deben evitarse LUC indirectos mediante el uso de zonas aptas para este cultivo, con lo cual será posible incrementar el rendimiento de los cultivos y la producción ganadera (Gerssen-Gondelach *et al.*, 2017; Wicke *et al.*, 2012). La Tabla 3 muestra el LUC y las reservas de carbono para los escenarios futuros A y B. Nótese que las mismas condiciones de LUC y reservas de carbono aplican para los escenarios A y B. Como se mencionó anteriormente, la única diferencia entre los escenarios futuros A y B es el uso de RFV para la producción de pélets y compost.

8 Mas información en el anexo A.2 del documento de información complementaria (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>).

9 El proceso del BD implica la refinación física (refinación, blanqueado y desodorización), la transesterificación y esterificación de ácidos grasos libres (AGL), la purificación de BD, la purificación de glicerina (USP) y la recuperación de metanol.

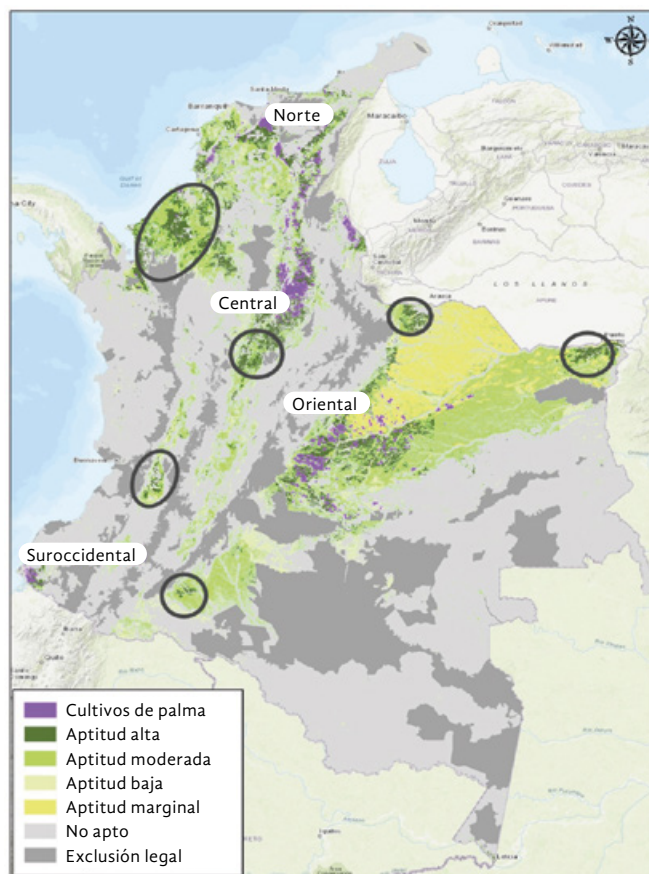
10 Mapa de aptitud del suelo (escala 1:100.000) desarrollado por la UPRA (2016) como herramienta para planear el uso eficiente del suelo desde un enfoque de desarrollo sostenible y competitivo. Para la elaboración este mapa, la UPRA llevó a cabo un análisis multi-

---

criterio de los componentes físicos, ambientales y socioeconómicos del país, los cuales fueron ponderados según las características de la cadena de producción del aceite de palma. Este instrumento permite identificar las zonas geográficas con condiciones adecuadas para establecer y desarrollar cultivos de palma de aceite. Sobre este, se aclara lo siguiente:

- Por “no apto” se hace referencia a zonas en las que el desarrollo de cultivos de palma de aceite no es viable debido a condiciones físicas o ambientales.
- No se permiten proyectos en áreas con restricciones legales.
- Los territorios colectivos requieren del abordaje de un enfoque diferente para garantizar la protección del patrimonio cultural y el derecho a la libre determinación de las comunidades residentes.
- Los cultivos de palma de aceite no pondrán en riesgo áreas naturales o la prestación de servicios ecosistémicos (por ejemplo, bosques, páramos, cuerpos de agua, zonas de recarga de acuíferos).

**Figura 3.** Mapa de aptitud del suelo para el cultivo de palma de aceite en Colombia vs. regiones palmeras actuales



Nota: Colombia tiene 114 Mha, de las cuales 74 Mha tienen restricciones de uso (por ejemplo, bosques naturales, páramos, rondas hídricas, cuerpos de agua, humedales, parques naturales, zonas urbanas y zonas de protección cultural). Esto significa que existen 40 Mha disponibles para el desarrollo agrícola en todo el país (alimentos, forraje, ganado y producción de biomasa), cuyo uso está condicionado a niveles bajos, moderados o altos de aptitud. De estas 40 Mha, actualmente se utilizan tan solo 7,6 Mha (UPRA, 2018). En 2018, el área sembrada con palma de aceite en Colombia fue de 0,54 Mha, de las cuales 41 % se encontraban en la Zona Oriental, 31 % en la Zona Central, 24 % en la Zona Norte y 4 % en la Zona Suroccidental (Fedepalma, 2019). Los círculos negros muestran un potencial interesante de nuevas áreas para la expansión de la palma de aceite (para la interpretación de las referencias a color en las convenciones de esta figura, el lector debe dirigirse a la versión web de este artículo).

Fuente: adaptado de UPRA (2018).

**Tabla 3.** Cambio en el uso del suelo y reservas de carbono en los escenarios futuros

Uso/cobertura del suelo	% convertido a palma de aceite <sup>a</sup>	Reservas de carbono (t C ha <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>
Pastos	60	6,4
Vegetación herbácea	10	14,1
Cultivos estacionales	5	4,2
Cultivos perennes	10	28,9
Áreas agrícolas heterogéneas	15	5,8

Nota: el cálculo de las reservas de carbono en plantaciones de palma de aceite corresponde a 113 t C/ha<sup>-1</sup> (Rivera-Méndez *et al.*, 2017).

<sup>a</sup> Datos recuperados del mapa de aptitud del suelo de la UPRA (2018). También se consideró el estudio realizado por Castiblanco *et al.* (2013) para determinar la expansión futura de este cultivo en Colombia.

<sup>b</sup> Datos oficiales del IDEAM (Yepes *et al.*, 2011).

La Tabla 4 muestra los datos primarios de entrada para los escenarios futuros A y B, junto con una comparación entre los datos de los escenarios futuros y el escenario actual. Es pertinente mencionar que los escenarios futuros no consideran el transporte de aceite de la planta de beneficio a la planta de BD dado que se asume que la zona industrial<sup>11</sup> se encuentra ubicada en una misma área.

En los escenarios propuestos, el POME tratado es utilizado en la plantación más cercana para riego, reduciendo así el consumo de agua limpia. En la etapa de cogeneración, el vapor de la caldera de biomasa<sup>12</sup> es enviado a la turbina de contrapresión<sup>13</sup> a fin de gene-

rar electricidad, mientras que el excedente de vapor de la turbina es utilizado en la POM y la planta de BD como combustible.

De otro lado, este trabajo considera el uso de biomasa con bajo poder calorífico (LHV, en inglés), equivalente a 13,8 MJ kg<sup>-1</sup>. Adicionalmente, se incorpora el uso de vapor con un valor de 140,6 kWh kg<sup>-1</sup> (Husain *et al.*, 2003) y de un motor de biogás para la generación de electricidad (2,2 kWh/m<sup>3</sup> biogás), por lo que las emisiones ocasionadas por el uso de biogás y el proceso de generación de energía son incluidas en este análisis. Finalmente, para el escenario futuro A se consideró la aplicación de compost con una tasa de aplicación de fertilizante químico de 10 %.

- 11 En el escenario futuro A, la zona industrial incluye el área donde se encuentran la POM, la planta de BD, la zona de cogeneración y la planta de compostaje. En el escenario futuro B, la zona industrial incluye el área donde se encuentran la POM, la planta de BD, la zona de cogeneración y la planta de producción de pélets.
- 12 Condiciones de la caldera: eficiencia de 79 %, 370 °C y 36 bar.
- 13 En Colombia, las turbinas de contrapresión se utilizan comúnmente para producir electricidad en las POM, generando vapor a partir de la combustión de biomasa en una caldera. Así, el vapor residual de la turbina es

empleado en el proceso de la planta de beneficio. En esta turbina la presión de entrada varía de 20 a 24 bar, produciendo hasta 50.000 libras de vapor por hora. La presión de salida de la turbina es de aproximadamente 8-10 bar. Según Arrieta *et al.* (2007), la tasa de calor en una POM es de 14-60 MJ kWh<sup>-1</sup>. Dependiendo del tamaño de la caldera, la energía generada por este sistema puede alcanzar una capacidad instalada de 1.200 kW, con un costo estimado de instalación de USD 690-850 kW<sup>-1</sup>.

**Tabla 4.** Resumen de los datos de entrada claves para los escenarios futuros A y B en comparación con el escenario actual

Variable	Escenario actual	Ref.	Escenario futuro A y B (valor máximo de los datos)	Ref.
Producto principal	APC	*	BD	*
<b>Manejo de plantaciones de palma de aceite</b>				
LUC	Datos de la Tabla 1		Datos de la Tabla 3	
Vida útil del cultivo	30 años	*	30 años	*
Rendimiento del cultivo	19,3 t RFF ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>		30 t RFF ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	*
Etapas de vivero	No incluida		No incluida	
Fertilización química	Urea Nitrato de amonio	*	Nitrato de calcio	*
Fertilización orgánica/biomasa	No		Aplicación de compost	
<b>Planta de beneficio de aceite de palma</b>				
Capacidad instalada	30 t RFF h <sup>-1</sup>	*	70 t RFF h <sup>-1</sup>	*

Continúa

Variable	Escenario actual	Ref.	Escenario futuro A y B (valor máximo de los datos)		Ref.	
Producto principal	APC	*	BD		*	
<b>Tasa de extracción de aceite</b>	21,35 %	*	22,11 %		*	
<b>Captura de biogás</b>	32,2 % para electricidad 67,8 % liberado a la atmósfera	*	100 % como combustible para la caldera, el motor de biogás y la quema		*	
<b>Usos de la biomasa</b>	RFV	Sin uso específico	*	Compost (escenario A), pélets (escenario B)		*
	Fibra	Combustible para la caldera (vapor)	*	Combustible para la caldera (cogeneración)		*
	Cuesco	Combustible para la caldera (vapor)	*	Combustible de la caldera para cogeneración		*
	POME	Eliminación de (DQO) Descarga a fuentes de agua	*	Eliminación de DQO Biogás para la generación de vapor, compost y uso en riego		*
	AGL	No	*	Esterificación		*
<b>Pretratamiento de biomasa</b>	No	*	RFV triturados (A), RFV triturados y secados (B)		**	
<b>Fuente de electricidad</b>	Red nacional	47 %	*	Escenario A	Escenario B	*
				0 %	10,5 %	**
	Diésel	13 %	*	0 %	0 %	* **
	Cogeneración	30 %	*	68,6 %	89,5 %	* **
	Biogás	9 %	*	31,5 %	0 %	* **

\* Datos de producción de los datos recolectados durante el trabajo de campo

\*\* Datos del modelo BioPB (Cenipalma).

## Datos de la evaluación económica

Los costos de producción de RFF fueron calculados dividiendo el costo total anual de una hectárea sembrada con palma de aceite (incluyendo costos de establecimiento y mantenimiento) por el volumen de RFF producidos por ha. Para las POM y las plantas de BD, los costos de producción del producto principal (APC o BD, respectivamente) fueron estimados al dividir el costo total anual por la cantidad de producto/año. La Tabla 5 muestra los parámetros esenciales para

calcular los costos de la cadena de producción de APC. El CAPEX fue calculado con base en los costos reportados por las empresas participantes o a criterio de los expertos. En planta de beneficio, el CAPEX se obtiene al multiplicar el costo de cada unidad instalada (capacidad de producción de una POM) por el número final de unidades instaladas ( $t \text{ RFF } h^{-1}$ ). Por lo tanto, el CAPEX depende del tamaño de la planta de beneficio. Así, este valor es de  $30 t \text{ RFF } h^{-1}$  en el escenario actual y de  $70 t \text{ RFF } h^{-1}$  en los escenarios futuros A y B.

**Tabla 5.** Parámetros para la evaluación económica de la cadena del aceite de palma en Colombia<sup>a</sup>

Tasa de descuento <sup>b</sup>	12 %
Vida útil del equipo	30 años
Gastos de inversión	100 % en el primer año
Carga anual de POM <sup>c</sup>	5.381 h (escenario actual); 6.000 h (escenarios futuros)
Materia prima <sup>d</sup> RFF	125 USD <sub>2017</sub> t <sup>-1</sup> (escenario actual); 110 USD <sub>2017</sub> t <sup>-1</sup> (escenarios futuros)
APC	735 USD <sub>2017</sub> t <sup>-1</sup> (escenario actual); 646 USD <sub>2017</sub> t <sup>-1</sup> (escenarios futuros)
<b>Costos operativos</b> <b>Costos de la plantación</b>	(% costos totales de la plantación)
Establecimiento del cultivo <sup>e</sup>	4 %
Manejo del cultivo Fertilización	29 %
Cosecha y transporte de RFF	25 %
Labores agrícolas, suministros y maquinaria	22 %
Costo de oportunidad del suelo	10 %
Costos de manejo	10 %
<b>Costos de la POM</b>	(% costos totales de la POM)
Costos fijos	42 %
Mano de obra	28 %
Mantenimiento de equipos e infraestructura	16 %
Electricidad	9 %
Costos de manejo	5 %
<b>Costos de la planta de BD<sup>f</sup></b>	(% costos totales de la planta de BD)
Materia prima	73 %
Suministros	21 %
Mano de obra	2 %
Análisis de calidad	1 %
Mantenimiento	1 %
Electricidad	2 %

<sup>a</sup> Los parámetros se obtuvieron de los datos recolectados durante la fase de trabajo de campo y del estudio de Mosquera *et al.* (2018). Los costos fueron convertidos de pesos colombianos (COP) a dólares de EE. UU. (USD) utilizando la tasa de cambio promedio de 2017 (COP 2.951/USD) (<http://www.banrep.gov.co/es/trm>).

<sup>b</sup> 8 % es la tasa real de descuento utilizada por Mosquera-Montoya *et al.* (2017), a la cual añadimos la inflación promedio para el periodo 2010-2017 (4 %), de allí la tasa de descuento nominal de 12 %.

<sup>c</sup> Horas de trabajo por año en el escenario actual, obtenidas de la mediana de los datos recolectados.

<sup>d</sup> Se estima una disminución en los precios de la materia a medida que los rendimientos de producción aumentan.

<sup>e</sup> Incluye costos de infraestructura del cultivo, viveros, siembra de palmas y coberturas, entre otros.

<sup>f</sup> Datos tomados de Acevedo *et al.* (2015). No se considera el transporte de APC desde la planta de beneficio puesto que se asume que tanto la POM como la planta de BD están ubicadas en una misma área.

## Resultados

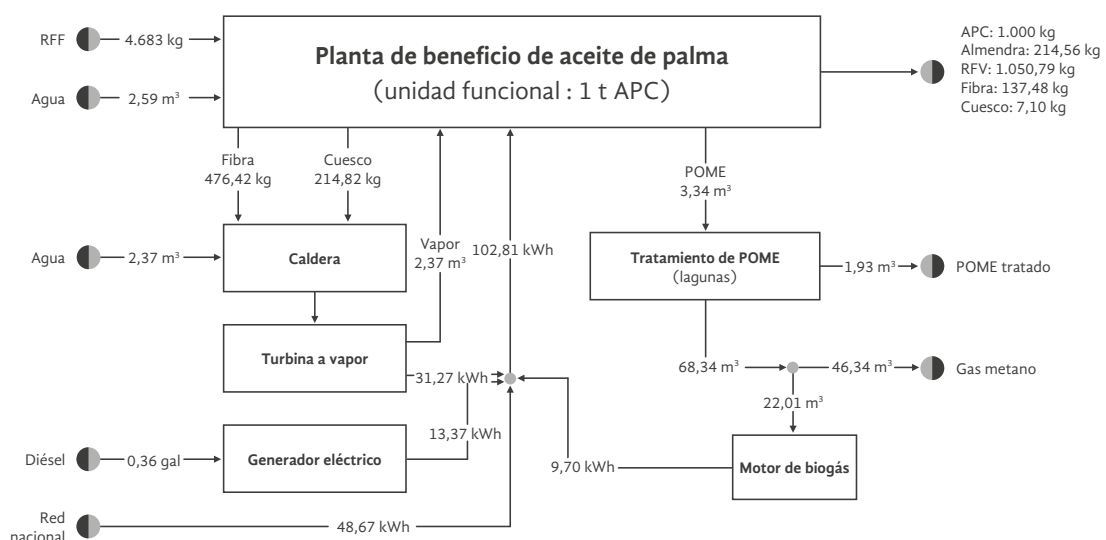
### Emisiones de GEI en el escenario actual

La Figura 4 muestra los flujos promedio de masa y energía de las 28 POM estudiadas, expresando los resultados en 1 t APC. Los hallazgos permiten determinar que en el proceso de extracción de APC se utiliza el 78 % de la fibra y el 96 % del cuesco para la generación de vapor y energía eléctrica. Además, nuestros resultados señalan que se requieren 130 kWh para operar una planta de beneficio, donde un 10 % proviene de motores de biogás, 30 % de turbinas de vapor, 13 % de generadores eléctricos (diésel) y 47 % de la red de suministro nacional. Se observa además que el 68 % del biogás es liberado a la atmósfera, es decir, más del 70 % de las plantas de beneficio no contaba con sistemas de captura de biogás al momento del levantamiento de datos.

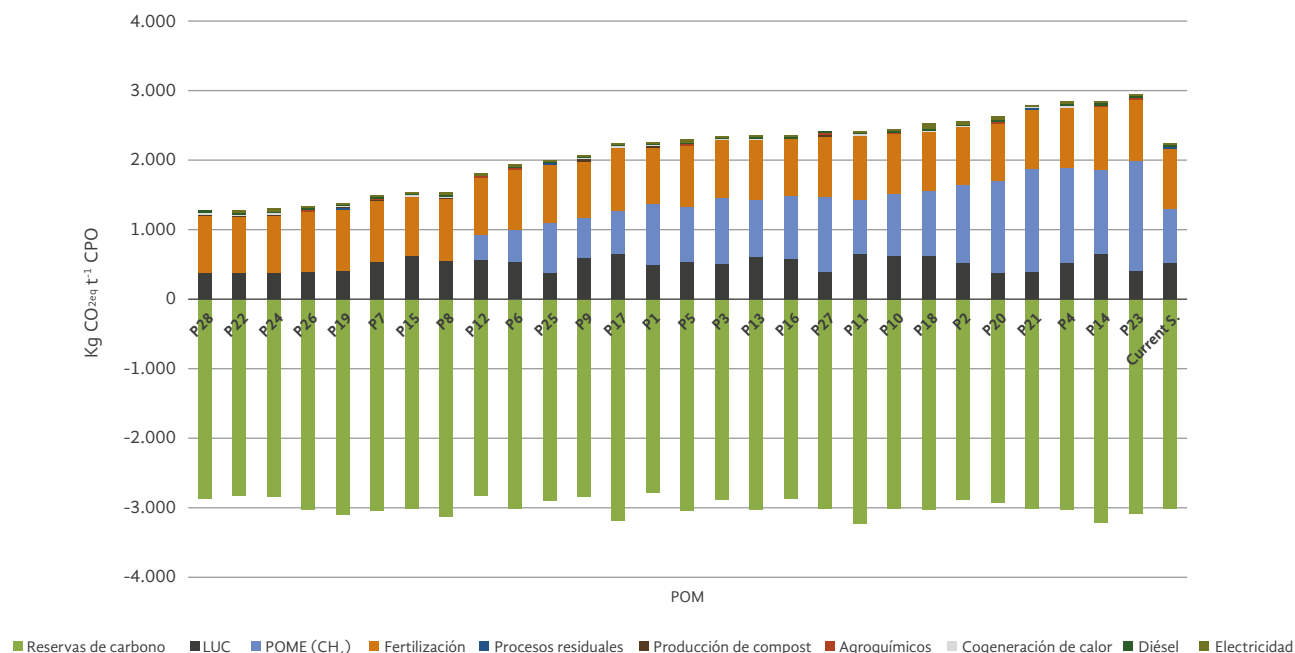
De otro lado, no se reportó un uso específico para los RFV, y si bien algunas plantas de beneficio los utiliza como acondicionador del suelo, en la mayoría de los casos esta práctica no es viable, dado que transportar RFV grandes distancias resulta ser una actividad costosa. En consecuencia, los RFV suelen ser dispuestos en el relleno sanitario más cercano, lo cual contribuye a generar emisiones adicionales de CH<sub>4</sub>.

La Figura 5 muestra las emisiones de GEI en toda la cadena de producción de APC en el escenario actual. La huella de carbono promedio es de -689,8 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC, siendo el LUC, los POME (CH<sub>4</sub>) y la fertilización química los principales factores que contribuyen a la generación de emisiones de GEI. Según los datos obtenidos, 8 plantas de beneficio han eliminado las emisiones de CH<sub>4</sub> del POME mediante la captura de biogás y su posterior quema (cuatro de ellas generan electricidad con biogás). Las emisiones de CH<sub>4</sub> variaron entre 357,4 y 1.588,4 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC. Este amplio rango muestra las diferencias en la eficiencia de la remoción de la DQO dentro de los sistemas de tratamiento de POME, ocasionadas principalmente por el contenido de materia orgánica y la operación del sistema de lagunas (por ejemplo, tiempo de permanencia, presencia de bacterias y remoción de sedimentos). Este estudio mostró que la DQO inicial del POME varió entre 19.000 y 97.777 ppm (mg l<sup>-1</sup>), mientras que la DQO en el punto de descarga osciló entre 165 y 16.572 ppm. Frente al tema, la Resolución 631/2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia estableció los niveles permitidos para la concentración de contaminantes en la descarga de aguas servidas, regulación que debe ser adoptada por las POM (MADS, 2015). Dado que el punto máximo de DQO establecido por esta norma es de 1.500 ppm en el punto de descarga, es necesario considerar mejoras en la eficiencia de la eliminación de DQO.

Figura 4. Flujos de masa y energía en el escenario actual



**Figura 5.** Balance de GEI y emisiones en el escenario actual para cada POM estudiada



Nota: cada planta de beneficio se representa con la letra P y un número de 1 al 28. El promedio nacional de emisiones de GEI se muestra en la barra "escenario actual".

La Figura 6 muestra el aporte de cada zona palmera a las emisiones nacionales de GEI. La Zona Central reportó el mayor volumen de emisiones por LUC, mientras que la Oriental registró las menores cifras por esta variable. En la Zona Oriental los pastos y los cultivos estacionales muestran una transición hacia plantaciones de palma de aceite, mientras que en la Central la mayor proporción de LUC se dio sobre pastos (52,8 %) y zonas forestales (10,9 %). Al respecto, cabe mencionar que la conversión de bosques a suelos cultivables conduce a un aumento de las emisiones por LUC. Los resultados también permiten identificar que la Zona Oriental registra el mayor número de POM con captura de biogás en lagunas (5 de 28 plantas de beneficio estudiadas), contribuyendo así a reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> cerca de 35 %.

### Análisis de sensibilidad

En la Tabla 2 se observan los datos correspondientes a las reservas de carbono por uso del suelo, insumos utilizados para determinar las emisiones derivadas de LUC. Las emisiones generadas en el resto de la cadena

de producción de APC (fertilización, POM, consumo de diésel, agroquímicos y POME) fueron tomadas de los cálculos del promedio nacional o datos del escenario actual del sector.

La Figura 7 muestra que el valor de las reservas de carbono afecta directamente las emisiones por LUC, aportando entre 16 y 28 % de las emisiones totales. Esto señala la importancia de utilizar valores específicos de reservas de carbono de áreas convertidas a cultivos de aceite de palma para la realización de este tipo de investigaciones. Por ejemplo, al utilizar los valores mínimos y máximos de reservas de carbono asumidos para las plantaciones de palma de aceite, las emisiones por LUC variaron entre 327 y 695 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC (barra gris oscuro), con una reserva de carbono de -3 a -3,4 t CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC. El valor negativo indica la captura de carbono neta en este clase de cultivos.

### Emisiones de GEI en los escenarios futuros

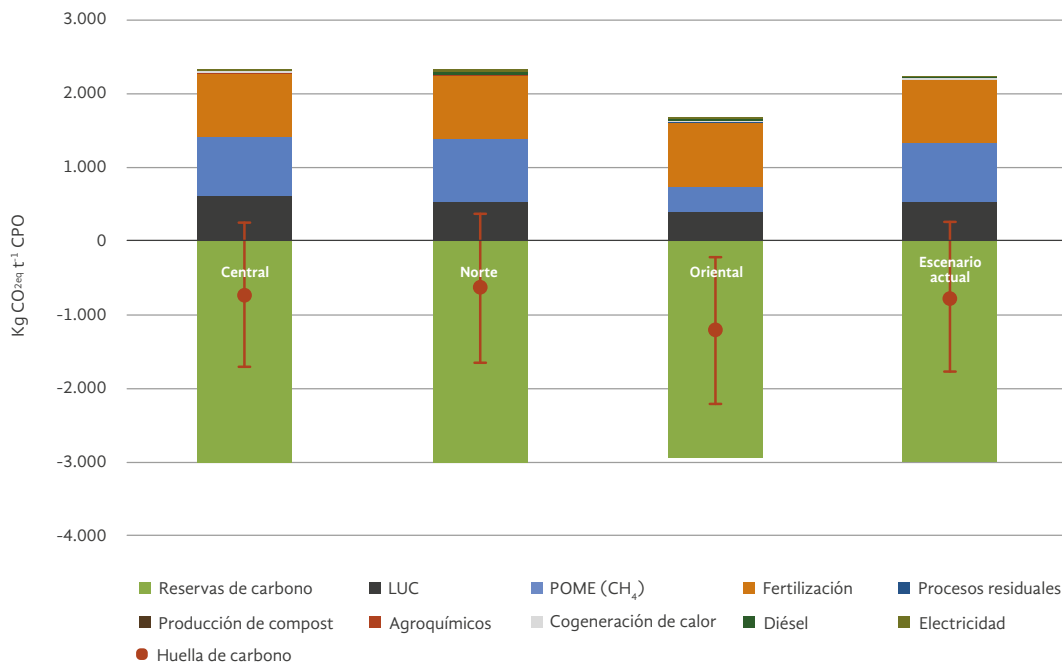
Para los escenarios futuros A y B se asumió un incremento de 3,5 % en el rendimiento del cultivo con respecto al escenario actual. Además, en ambos escenarios



futuros se consideró el uso de toda la biomasa producida durante el proceso de extracción de APC, así como la captura de biogás y la producción de BD. Las

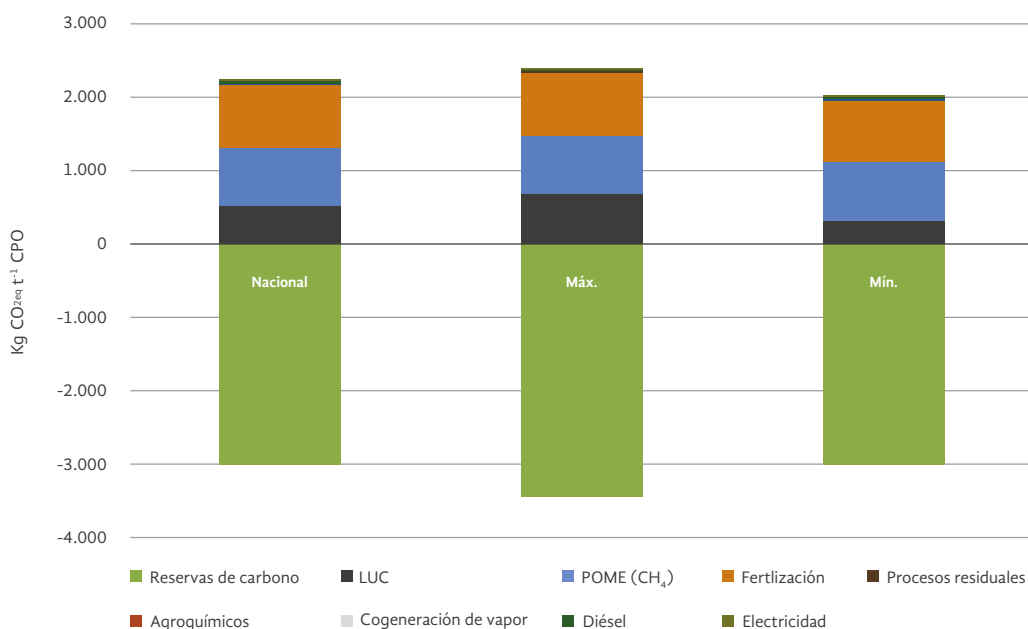
Figuras 8 y 9 muestran los flujos generales de masa y energía para los escenarios futuros A y B, respectivamente (los resultados se expresan en 1 t APC).

**Figura 6.** Emisiones de GEI en las zonas palmeras de Colombia



Nota: la barra naranja muestra la mediana, los datos mínimos y los datos máximos de huella de carbono.

**Figura 7.** Impacto del LUC en las emisiones de GEI para la producción de APC (análisis de sensibilidad)



En el escenario futuro A, la fibra, el cuesco y el biogás son utilizados para la generación de vapor (4.095 kg t<sup>-1</sup> APC) y electricidad (335 kWh t<sup>-1</sup> APC) a fin de satisfacer la demanda energética de todo el sistema. Bajo estas condiciones se genera un excedente de energía equivalente a 115 kWh t<sup>-1</sup> APC, el cual puede ser comercializado en la red nacional<sup>14</sup>. De otro lado, los RFV son pretratados mediante prensado y triturado, y compostados con el POME tratado y las tierras de blanqueo (SBE) resultantes del proceso de refinación de APC. El compost es utilizado en campo como fertilizante orgánico, siendo aplicado a una tasa de hasta 10 % con respecto a la fertilización química.

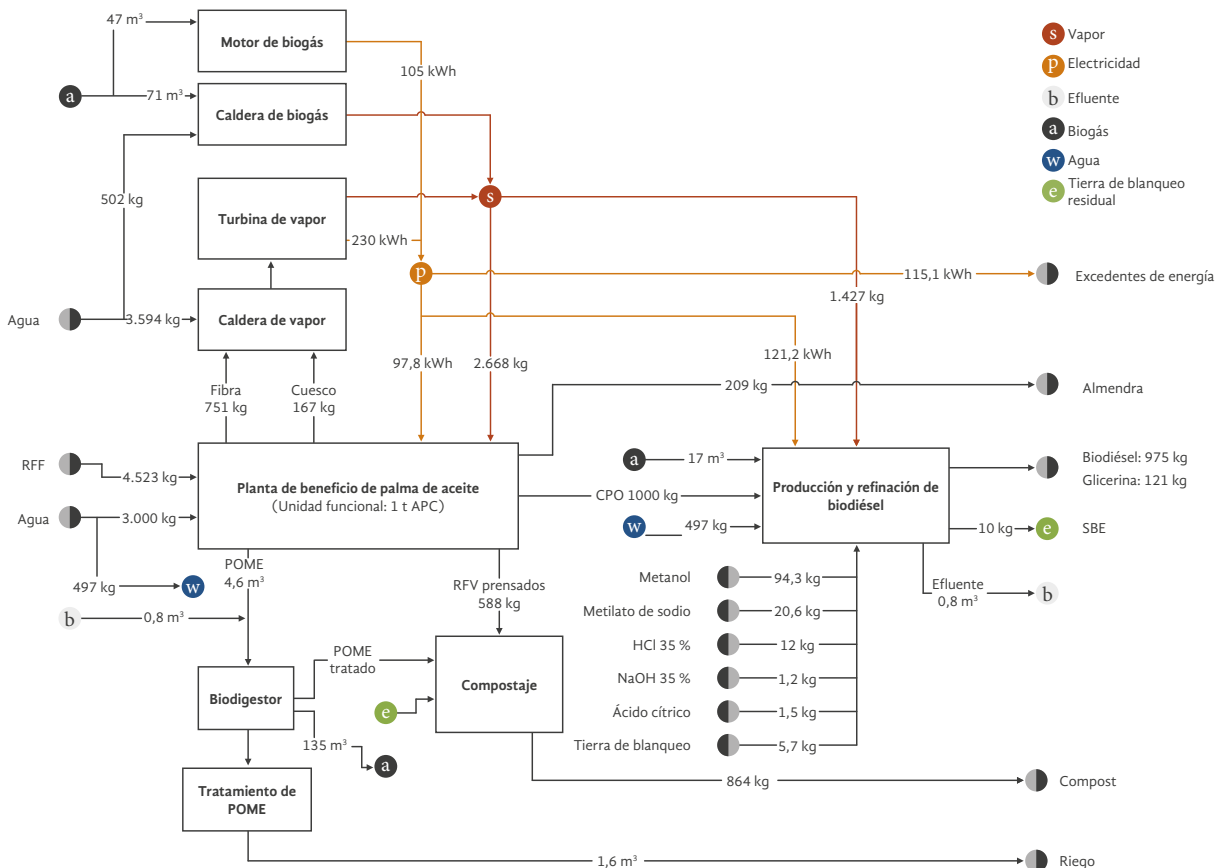
En el escenario futuro B (Figura 9), se identificó que el proceso de peletización requiere un mayor volumen

de vapor para el secado de biomasa a una tasa de 10 %. Además, se observa que 86 % del biogás producido es utilizado para la generación de vapor en la caldera, por lo cual no es posible generar electricidad únicamente a partir de biogás. Así, en este escenario se debe adquirir 27 kWh t<sup>-1</sup> APC de la red nacional para garantizar la energía requerida por el proceso. Por último, el volumen de biogás para generar electricidad a través de una turbina (140 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> APC) es mayor que el volumen de biogás disponible (118 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> APC). Por ende, no es posible obtener excedentes de energía bajo las condiciones planteadas para este escenario.

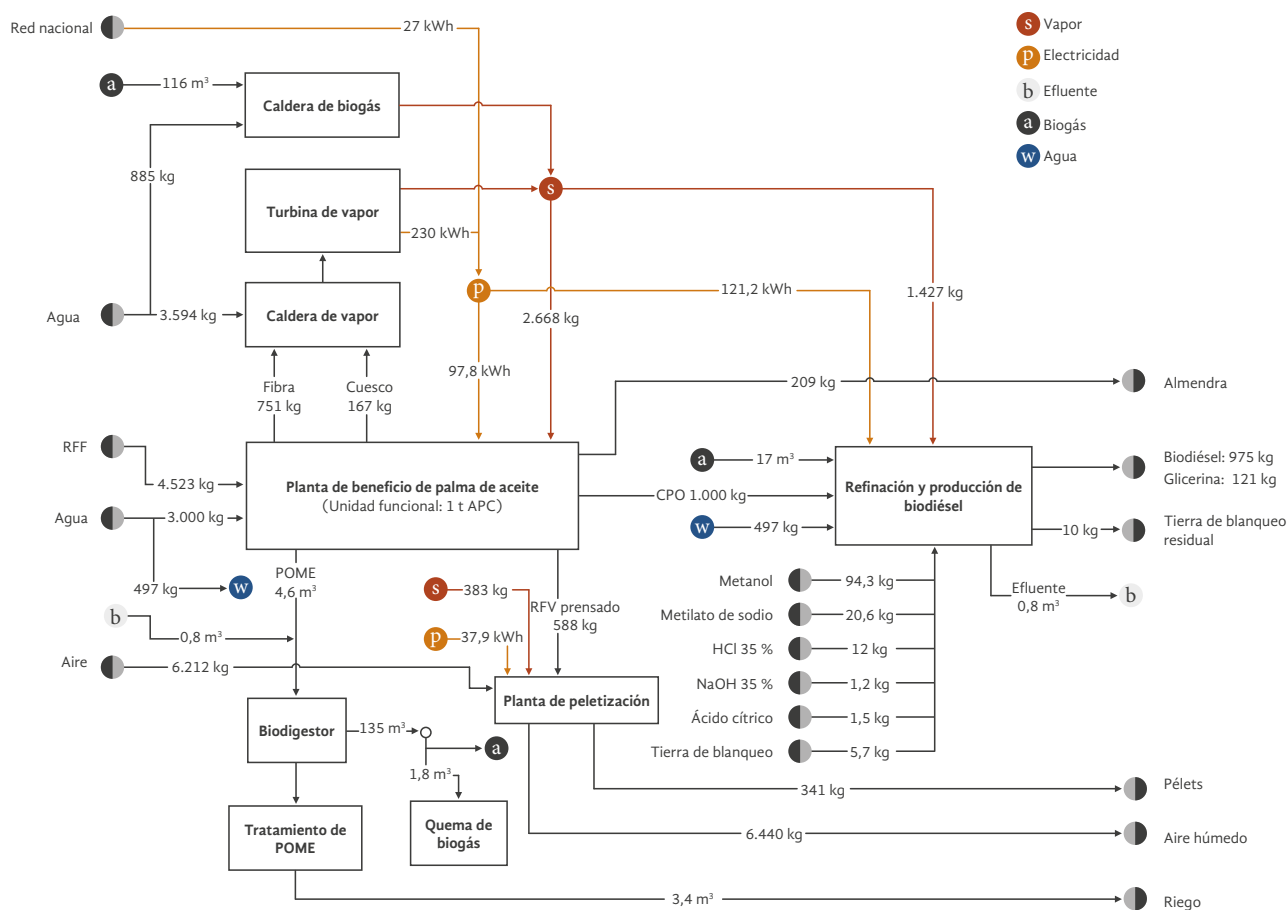
La Tabla 6 muestra el detalle de las emisiones de GEI a lo largo de la cadena de producción de APC en el escenario actual y los escenarios futuros A y B. Allí se observa que, gracias a las mejoras incorporadas, las emisiones totales en los escenarios futuros A y B son inferiores a las del escenario actual, puesto que no se registran emisiones de CH<sub>4</sub> y se logra una

14 Para más información sobre las condiciones de venta de excedentes de energía a la red nacional, consultar la Resolución 030/2018 (CREG, 2018).

**Figura 8.** Flujos de masa y energía en el escenario futuro A



**Figura 9.** Flujos de masa y energía en el escenario futuro B



disminución en las emisiones ocasionadas por LUC. Al respecto, la captura de gas metano es una práctica que contribuye a la reducción de emisiones de forma inmediata y además genera un beneficio económico para las POM, puesto que el biogás generado en este proceso puede ser empleado para la generación de energía o calor, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y sus costos asociados. En consecuencia, en los escenarios futuros, la fertilización de los cultivos será el principal factor generador de emisiones, pues los cultivos de palma de aceite demandan una gran cantidad de nutrientes (Galindo y Romero, 2012); las emisiones resultantes de la fertilización en el escenario futuro A incluyen las emisiones generadas por la aplicación de compost (3,7 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC), donde cada kilogramo de compost sustituye tan solo 0,1 kg de fertilizante químico. Es pertinente mencionar que el compost no es un sustituto total o radical de la fertilización química, dado que la liberación de nutrientes

por parte de esta materia orgánica es un proceso lento, que no logra satisfacer la alta demanda nutricional del cultivo de palma (Galindo y Romero, 2012).

Al analizar el límite del sistema hasta la planta de producción de biodiésel, la Tabla 7 muestra que la huella de carbono del escenario futuro A es ligeramente superior (679,6 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> BD) a la del escenario futuro B (771,2 kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> BD), principalmente porque las emisiones asociadas a la fertilización son mayores en el primero. Tanto en el escenario futuro A como en el B, cerca de 13 % de las emisiones se deben a LUC, 68 % a la fertilización y el uso de productos agroquímicos y 11 % al proceso de refinación y transesterificación. Al comparar estos resultados con los hallazgos de Yáñez *et al.* (2011), quienes utilizaron información de las cinco empresas productoras de BD en Colombia para 2010, se observa que las mayores diferencias en las emisiones provienen de la fertilización, los POME (CH<sub>4</sub>), el uso de diésel y la producción de vapor.

**Tabla 6.** Comparación de las emisiones de GEI y la huella de carbono en la cadena de producción de APC para los escenarios analizados (cifras en kg CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC)

Fuente	Escenario actual	Escenario A	Escenario B
<b>Reservas de carbono</b>			
Cultivo de palma de aceite	-3.014,1	-1.852,3	-1.852,3
<b>Emisiones</b>			
LUC	537,6	151,1	151,1
POME (CH <sub>4</sub> )	778,7	0,0	0,0
Fertilización	860,5	807,1	741,0
Producción de compost	0,0	3,7	0,0
Diésel	114,7	54,8	54,7
Cogeneración (energía)	14,7	0,4	0,5
Cogeneración (calor)	9,1	7,6	7,6
Agroquímicos	6,3	4,3	4,3
Procesos residuales	2,6	1,7	1,6
Emisiones totales	2.324,3	1.030,6	960,8
<b>Balance</b>			
Huella de carbono	-689,8	-821,7	-891,5

Nótese que para todos los escenarios el límite del sistema para el balance de GEI es la producción de APC.

Los procesos residuales contribuyen con menos del 1% del total de emisiones de GEI.

Las reservas de carbono en los cultivos de palma de aceite incluyen tanto a la planta (fronda, tronco y raíces) como a la cobertura vegetal y la materia orgánica asociadas. Este valor se estimó dividiendo los 30 años de vida útil de la plantación por el rendimiento promedio (t RFF ha<sup>-1</sup>). La variación en las reservas de carbono entre los escenarios se debe al rendimiento de los cultivos asignado, el cual es de 19,3 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en el escenario actual y de 30 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para ambos escenarios futuros (Tabla 4).

La relación emisión/eliminación de reservas de carbono para el escenario actual es de 0,74 (es decir, por cada kg de CO<sub>2</sub> que se absorbe, se emiten 0,74 kg). En el escenario A esta relación es de 0,54, mientras que para el escenario B es de 0,50, lo que significa una menor emisión de CO<sub>2</sub> en ambos escenarios futuros. Nótese que en el escenario A la producción de compost genera emisiones tanto en su proceso de elaboración como en su aplicación al cultivo.

Las emisiones de fertilizante en los escenarios futuros serán menores. Sin embargo, el escenario A reporta un mayor número de emisiones debido al volumen de emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O ocasionadas por el uso de compost.

Las emisiones del compost (CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) se originan por la degradación de biomasa.

Las emisiones de diésel corresponden al consumo de diésel para el transporte de RFF.

Las emisiones de cogeneración se dividen en energía (electricidad) y calor (vapor). Las emisiones de electricidad en el escenario actual corresponden a las emisiones de las cuatro fuentes (diésel, red nacional, cogeneración y biogás), mientras que las emisiones de electricidad en los escenarios futuros corresponden únicamente al uso de diésel y el proceso de cogeneración (biomasa). No se consideraron las emisiones de CO<sub>2</sub> biogénico de la biomasa. Nótese que la diferencia de calor entre el escenario actual y los escenarios futuros se debe al aumento del consumo de vapor en la planta de BD.

Las emisiones generadas por el proceso de producción de pélets representan aproximadamente 0,6 %. Estas se incluyen en las emisiones por cogeneración (energía y calor).

De acuerdo con nuestra propuesta, las emisiones de metano de los POME son inexistentes en los escenarios futuros A y B, puesto que se asume la captura de biogás para la generación de energía. Las emisiones del consu-

mo de diésel son también menores en los dos escenarios futuros planteados por este estudio, debido a que no se incluyó el transporte de APC al considerar que la POM y la planta de BD están ubicadas en una misma área.

**Tabla 7.** Balance de GEI según diversos estudios sobre la industria colombiana del aceite de palma

Proceso	Presente estudio					Estudios recientes sobre el sector <sup>a</sup>			
	Escenario actual	Escenario futuro A	Escenario futuro B	Escenario futuro A	Escenario futuro B	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4
<b>Área de estudio</b>	28 POM	Estudio de caso representativo		Estudio de caso representativo		5 plantas de BD	11 escenarios	POM hipotética	Cultivo específico
<b>Unidad<sup>b</sup></b>	kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> APC			kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> BD		kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> BD	kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> APC	kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> APC	kg CO <sub>2eq</sub> t <sup>-1</sup> APC
<b>Reservas de carbono</b>									
Cultivo de palma de aceite	-3.014,1	-1.852,3	-1.852,3	-1.883,9	-1.883,9	-6.080,8	-894	-5.372,6	-3.388,3
<b>Emisiones</b>									
LUC	537,6	151,1	151,1	153,6	153,6	34,4	343	49,1	74,9
Fertilización	860,5	807,1	741	820,9	753,7	450,5	61	224,2	351
Agroquímicos	6,3	4,3	4,3	4,4	4,3	5,3	-	6,6	-
POME (CH <sub>4</sub> )	778,7	0,0	0,0	0,0	0,0	945,6	179	1689,5	778,7 <sup>e</sup>
Producción compost	-	3,7	-	3,7	-	-	-	-	-
Vapor producido	-	-	-	-	-	332,4	-	879,8	-
Diésel	114,7	54,8	54,7	55,7	55,6	468,6	255	79,6	79,6
Electricidad	14,7	0,4	0,5	23,8	2,3	56,6	-	60,8	-
Cogeneración	9,1	7,6	7,6	10,9	10,9	-	-	355,7	-
RBD + BD <sup>c</sup>	-	-	-	130,7	130,7	40,3	-	-	-
Procesos residuales	2,6	1,7	1,6	0,6	1,6	374,2	-	0,2	46,8
<b>Emisiones totales</b>	<b>2.324,3</b>	<b>1.030,6</b>	<b>960,8</b>	<b>1.204,3</b>	<b>1.112,7</b>	<b>2.707,9</b>	<b>838</b>	<b>3.345,5</b>	<b>1.331</b>
<b>Balance</b>									
<b>Huella de carbono</b>	<b>-689,8</b>	<b>-821,7</b>	<b>-891,5</b>	<b>-679,6</b>	<b>-771,2</b>	<b>-3.372,9</b>	<b>-56</b>	<b>-2.027,1</b>	<b>-2.057,3</b>

<sup>a</sup> Datos del estudio 1 tomados de Yáñez *et al.* (2011); datos del estudio 2 basados en Henson *et al.* (2012); datos del estudio 3 basados en García-Núñez *et al.* (2016); datos del estudio 4 basados en Rivera-Méndez *et al.* (2017). Para comparar las emisiones de GEI, los resultados de los estudios de García-Núñez *et al.* (2016) y Rivera-Méndez *et al.* (2017) se expresan en toneladas de APC (se utilizó un valor de 4,68 t RFF t<sup>-1</sup> APC para los cálculos).

<sup>b</sup> APC = aceite de palma crudo; BD = biodiésel.

<sup>c</sup> El proceso RBD + BD incluye los insumos de los procesos de refinación y transesterificación (metanol, metóxido de sodio, ácido cítrico, ácido clorhídrico y SBE).

<sup>d</sup> Los procesos residuales son aquellos que contribuyen con menos de 1 % de las emisiones totales de GEI.

<sup>e</sup> Datos asumidos a partir de la situación actual con el fin de considerar el mayor volumen de emisiones posible en planta de beneficio.

## Relación de energía neta

La Figura 10 muestra un análisis comparativo de la NER para cada escenario. En todos los casos, la etapa de cultivo registró el mayor consumo de energía de origen fósil (2,8-6,7 GJ t<sup>-1</sup> BD). En el escenario actual, la NER es de 2,2 MJ renovable MJ<sup>-1</sup> fósil (C1, línea amarilla), empleando únicamente fibra y cuesco como fuentes de energía renovable. En contraste, esta variable aumenta a 8,5 MJ renovable MJ<sup>-1</sup> fósil (C8, línea amarilla), añadiendo el APC y toda la energía de los subproductos. En los escenarios futuros A y B (cadena de BD), la NER es mayor que en el escenario actual (cadena de APC) debido a un aumento en la energía renovable de los productos primarios. Por ejemplo, en el escenario futuro A, por cada unidad de energía fósil requerida para producir BD y compost se obtienen 13,72 unidades de energía renovable disponible (C1, línea verde).

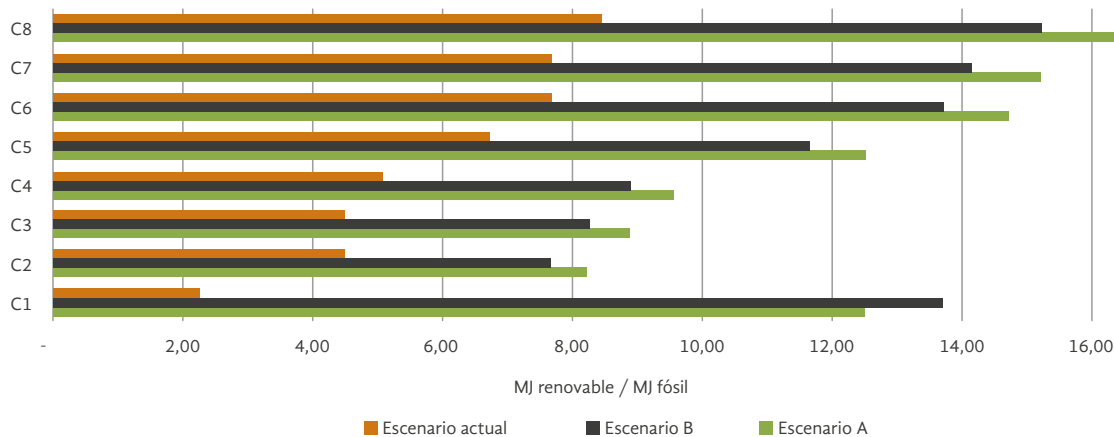
## Evaluación del desempeño económico

### Escenario actual

En el escenario actual, el CAPEX estimado es de USD 37,8 t<sup>-1</sup> APC (51 % costos de POM y 49 % costos del cultivo). El OPEX se estima en USD 519,2 t<sup>-1</sup> APC (86 % costos de producción del cultivo y 14 % costos de POM), como se muestra en la Figura 11a. Por su parte, los RFF procesados tienen un valor estimado de USD 125 t<sup>-1</sup> RFF. Además, se estima que el VAN es de USD 895 t<sup>-1</sup> APC, mientras que la rentabilidad<sup>15</sup> proyectada muestra una TIR de 34 %.

15 Las empresas deben cumplir con las regulaciones locales, regionales y nacionales para operar en territorio colombiano, incluyendo las normativas ambientales. De lo contrario, estas pueden ser objeto de cierres temporales o permanentes.

**Figura 10.** Análisis comparativo de NER para la escenario actual y los escenarios futuros



C1*	Cuesco + fibra (escenario actual)	BD + biogás + cuesco + fibra (escenario futuro A)	BD + biogás + cuesco + fibra + pélets (escenario futuro B)
C2	APC	BD	
C3	APC (sin biogás)	BD + biogás	
C4	APC + cuesco	BD + biogás + cuesco	
C5	APC + cuesco + fibra	BD + biogás + cuesco + fibra**	
C6	APC + cuesco + fibra + pélets	BD + biogás + cuesco + fibra + pélets***	
C7	APC + cuesco + fibra + pélets (sin glicerina)	BD + biogás + cuesco + fibra + pélets + glicerina	
C8	APC + cuesco + fibra + pélets + almendra	BD + biogás + cuesco + fibra + pélets + glicerina + almendra	

\* La comparación 1 (C1) corresponde a los valores de NER para los escenarios considerados en este estudio (actual, escenario futuro A y escenario futuro B). Este valor solo incluye productos que funcionen como combustibles renovables.

\*\* Escenario futuro A (los RFF prensados se utilizan para la producción de compost y no son considerados energía renovable).

\*\*\* Escenario futuro B (los pélets son producidos a partir de RFF).

Para cuantificar los posibles costos de incumplimientos en materia de normativa ambiental, asumimos que la planta de beneficio no cumplía con los máximos niveles de contaminantes permitidos en descarga y que esta realizaba un cierre que se prolongaba por una semana. Como resultado, el costo de esta semana de cierre es de USD 3,6 t<sup>-1</sup> APC, que corresponde al valor de procesar RFF en otra planta de beneficio. Esto puede implicar desventajas adicionales como gastos extra para el transporte de RFF y la reducción del precio de venta de APC al ofertar un producto de menor calidad y por debajo de las especificaciones del mercado (contenido de ácidos grasos, peróxidos y humedad).

La Figura 11a muestra que los costos de producción de APC son menores en los escenarios futuros A y B, lo cual se debe a un mayor rendimiento del cultivo, una mayor escala de producción en planta de beneficio y un menor costo de la materia prima (RFF). El ingreso estimado de USD 800 t<sup>-1</sup> APC se basa en la venta proyectada de APC (92 %) excedentes de energía (5 %) y pélets (2 %).

### Escenarios futuros A y B

El CAPEX y el OPEX son similares para los escenarios futuros A y B. El CAPEX estimado es de aproximadamente USD 49 t<sup>-1</sup> BD (cultivo 32 %, POM 29 %, biogás/cogeneración 8 %, planta de BD 30 % y producción de compost o pélets 1 %), mientras que el OPEX es de aproximadamente USD 680 t<sup>-1</sup> BD (cultivo 55 %, POM 8 %, biogás/cogeneración 2 %, planta de BD 34 % y compost o pélets 1 %). En ambos escenarios futuros, el VAN estimado está entre USD 1.825 y 2.178 t<sup>-1</sup> BD, mientras que la rentabilidad del proyecto mostró una TIR entre 38 y 43 %. Se esperan ingresos estimados de USD 1.075 t<sup>-1</sup> BD con base en las ventas esperadas de BD (95 %), excedentes de energía (4 %) y pélets (1 %).

La Figura 11b muestra que la cadena de producción de BD puede registrar menores costos en los escenarios futuros A y B para todas las etapas de la cadena de producción (cultivo, planta de beneficio y planta de BD). Esta figura también muestra los precios del BD y del diésel en Colombia. Cabe mencionar que desde 2008 el BD de aceite de palma es mezclado con diésel para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, debido a los altos costos de producción

de BD, el precio de este biocombustible es mayor que el precio del diésel. Por ejemplo, en Colombia, el precio histórico del BD<sup>16</sup> ha estado alrededor de USD 30 GJ<sup>-1</sup>, mientras que en 2017 el precio del diésel se ubicó en USD 10 GJ<sup>-1</sup>. Además, se estima que los costos de refinación de BD son 30 % superiores a los del petróleo crudo. No obstante, teniendo en cuenta que el precio del petróleo varía en el mediano y largo plazo, con fluctuaciones entre USD 30 y 119 por barril proyectadas para el periodo 2020-2030 (Hernández *et al.*, 2018a; van Vliet *et al.*, 2009), así como la imperiosa necesidad de reducir los niveles de contaminación ambiental, el Gobierno de Colombia ha creado una serie de incentivos<sup>17</sup> para reducir los costos de producción de BD.

La Figura 12 muestra el análisis de sensibilidad de los costos de producción de APC en los tres escenarios examinados. Se observa que el incremento en el rendimiento del cultivo (izquierda) genera una reducción de los costos de producción de RFF de 55 % en los escenarios futuros. Así mismo, el incremento en la producción de la POM (derecha) hace que los costos de producción muestren una contracción de 25 %.

### Discusión

La Tabla 7 presenta una comparación de algunos estudios recientes sobre el balance de GEI de la industria de aceite de palma en Colombia, incluyendo el presente estudio. Se observa que el balance de GEI

16 Según Hernández *et al.* (2018b), el precio del diésel por barril es cercano a USD 54 y el costo operativo promedio de producción es USD 16,3 por barril (47 % costos de extracción y 53 % costos de transporte).

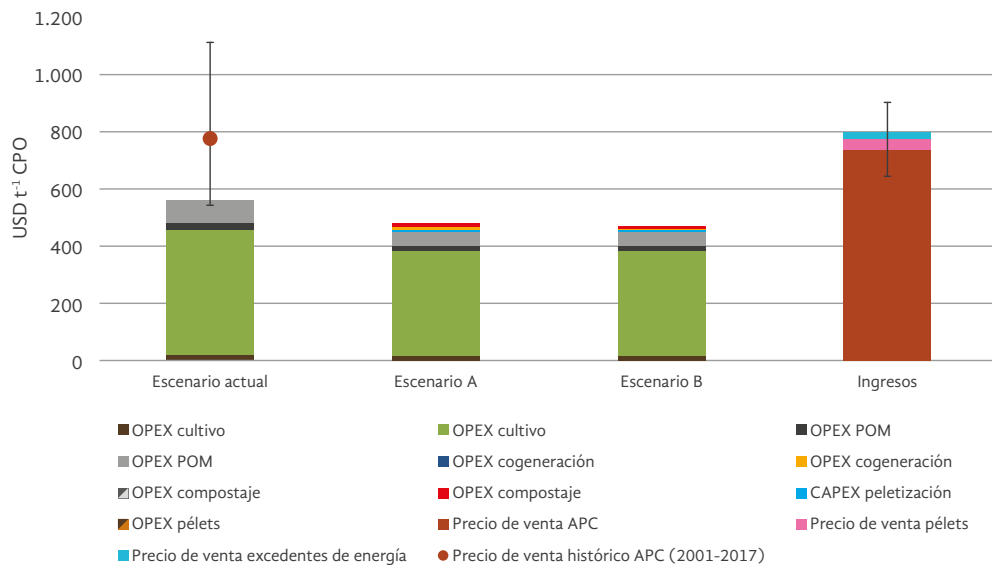
17 Eliminación de impuestos a la compra de maquinaria y equipos, reducción del impuesto sobre la renta para compañías en zonas francas, eliminación del impuesto nacional sobre la gasolina y el diésel (Ley 939/2004). Se contemplan otros beneficios, como (i) la reducción de costos logísticos debido a la disponibilidad local de biocombustible; (ii) menores costos asociados a la no utilización de aditivos para el diésel; (iii) reducción de costos asociados a la mortalidad prematura (principalmente en niños y adultos mayores) y la morbilidad (enfermedades respiratorias crónicas), generados por la reducción de la toxicidad de emisiones (PM10/PM2.5); (iv) beneficios para las poblaciones de las zonas rurales donde se cultiva palma de aceite, como, por ejemplo, empleo formal (Torres, 2014).

varía según las suposiciones hechas (por ejemplo, fuente de los datos, representatividad de los datos, parámetros incluidos). A pesar de esto, al comparar la huella de carbono de Colombia con el análisis más reciente reportado para Indonesia (0,7 y 26 t CO<sub>2eq</sub> t<sup>-1</sup> APC), según Lam *et al.* (2019), los resultados del país suramericano siguen siendo mucho

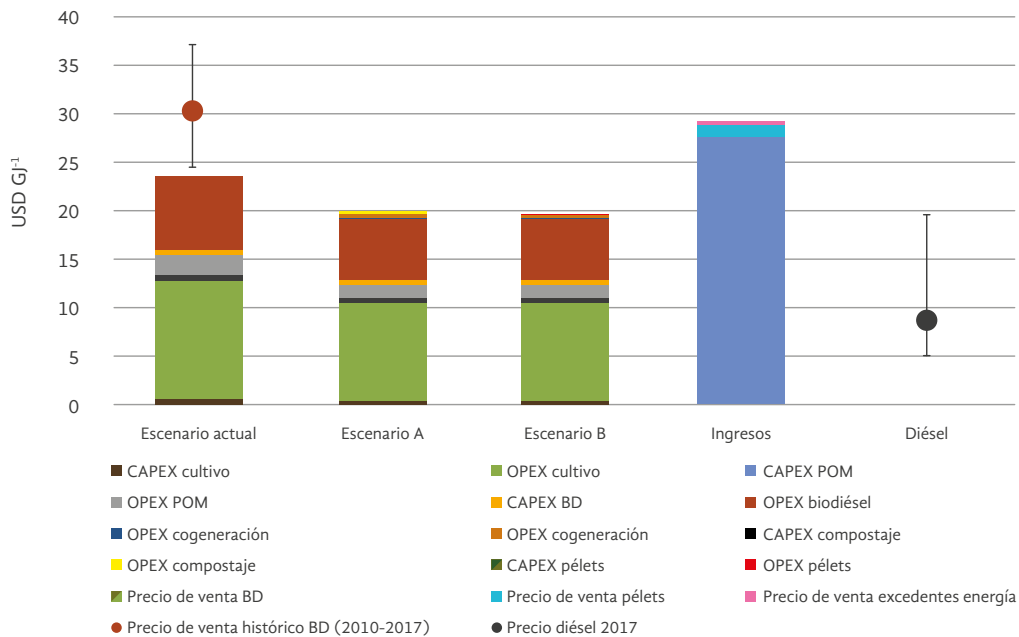
menores. Se evidencia entonces que la producción mundial de APC, el LUC, las emisiones de CH<sub>4</sub> y la fertilización química han sido los factores con mayor aporte a la generación de emisiones de GEI (Castanheira *et al.*, 2014; Garcia-Nunez *et al.*, 2016; Henson *et al.*, 2012; Lam *et al.*, 2019; Wicke *et al.*, 2008; Yáñez *et al.*, 2011).

**Figura 11.** Costos de producción de APC (a) y BD (b) en el escenario actual y los escenarios futuros

a. Análisis de costos de la cadena de producción de APC (CAPEX, OPEX e ingresos)

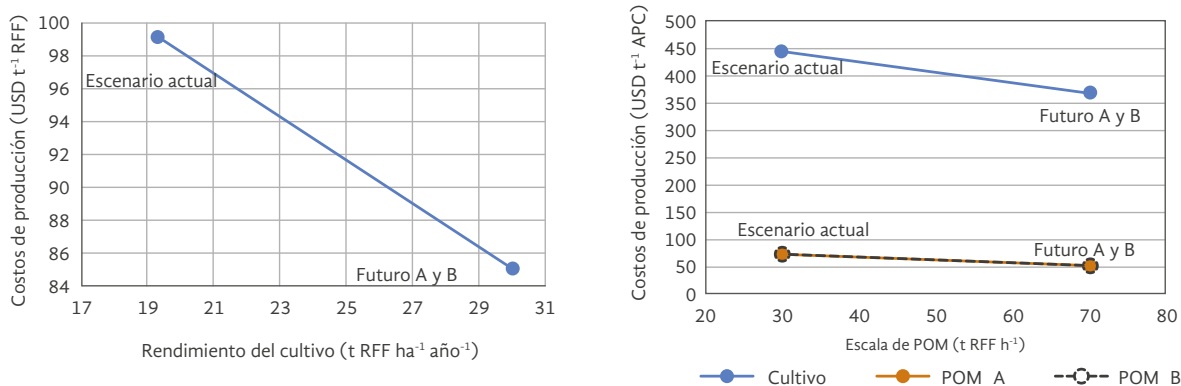


b. Análisis de costos de la cadena de producción de BD (CAPEX, OPEX e ingresos)





**Figura 12.** Costos de producción en relación con el rendimiento del cultivo (izquierda) y la escala de producción de la planta de beneficio (derecha)



Considerando que el LUC afecta fuertemente el balance de GEI (Wicke *et al.*, 2008), la expansión futura de los cultivos de palma de aceite en Colombia debe realizarse en áreas de vocación agrícola y ganadera con bajas reservas de carbono, evitando la deforestación de áreas naturales y la generación de emisiones asociadas a LUC (Castiblanco *et al.*, 2013; Pirker *et al.*, 2016). Sobre el asunto, es de resaltar que varios estudios han reportado que la asociación del cultivo de palma de aceite con la deforestación en Colombia ha sido mucho menor que en otros países productores, pues la expansión de este cultivo se ha dado principalmente en áreas de pastos, vegetación herbácea y cultivos estacionales (Castanheira *et al.*, 2014; Castiblanco *et al.*, 2013; Furumo y Aide, 2017; Henson *et al.*, 2012). No obstante, para prevenir la deforestación generada por el crecimiento de los suelos agrícolas, se requiere de directrices, políticas y criterios contundentes que promuevan y regulen el uso de los recursos naturales (Castanheira *et al.*, 2014; Khasanah, 2019; Woittiez, 2019). Por ello, en el mapa de aptitud de suelos se consideró que las restricciones a los cultivos de palma de aceite no pondrán en peligro las condiciones propias de áreas naturales o la prestación de servicios ecosistémicos (UPRA, 2016).

Continuando con el tema ambiental, el sector palmero y el Gobierno colombiano firmaron un acuerdo voluntario de “Cero Deforestación” en el que el sector se comprometió a eliminar la huella de deforestación en su cadena de suministro (MADS, 2019). Además, el Gobierno Nacional ha emitido varias leyes y

políticas<sup>18</sup> para el uso adecuado del suelo (MADR, 2018), lo que se convierte en parte de la estrategia hacia un crecimiento sostenible con bajas emisiones de carbono, la protección de la biodiversidad, mejores condiciones medioambientales y de gobernanza y la mitigación de riesgos frente a desastres naturales y el cambio climático (DNP, 2018).

Dado que el impacto de las emisiones por LUC se relaciona con cambios en las reservas de carbono, Colombia requiere de datos y mecanismos más precisos para monitorear la deforestación y calcular el volumen de emisiones. Lo anterior, teniendo en cuenta la diversidad e importancia de los bosques naturales del país (IDEAM, *et al.*, 2015), donde las reservas de carbón promedio pueden variar entre 48,1 y 147,5 t C ha<sup>-1</sup> (biomasa superficial) (Phillips *et al.*, 2011). Por ello, la implementación de buenas prácticas de manejo agronómico e incrementos en el rendimiento de los cultivos son factores determinantes para lograr una reducción de las emisiones por el uso del suelo (Gerssen-Gondelach *et al.*, 2017), además de permitir una disminución en los costos de producción de APC (Beltrán *et al.*, 2015; Fontanilla *et al.*, 2015; Mosquera-Montoya *et al.*, 2017).

Las emisiones de CH<sub>4</sub> del sistema de tratamiento de POME en el escenario actual requieren de atención, puesto que solo 8 de las 28 POM estudiadas afirmaron llevar a cabo la captura de CH<sub>4</sub> (biogás). El tratamiento

18 Por ejemplo, la Política del uso del suelo (MADS, 2013) y la definición de la frontera agrícola (MADR, 2018), entre otros.

anaeróbico de POME produce biogás, que es una mezcla de gases cuyo componente principal es metano (50-70 %) (Ohimain e Izah, 2017). Dado que el potencial de calentamiento global del CH<sub>4</sub> es superior al del CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013), su captura y manejo como fuente de energía renovable son esenciales. En el escenario actual, las emisiones del tratamiento de POME corresponden a 35 % de las emisiones totales dentro de la producción de APC, por lo que en un escenario futuro se considera una reducción considerable de este tipo de emisiones gracias a la captura de biogás.

Como se observa en los escenarios futuros A y B, la generación de energía a partir de biogás contribuye a reducir el impacto ambiental de la industria del aceite de palma, además de dar lugar a importantes beneficios económicos para el sector. Junto con la captura de biogás, se hace énfasis en el concepto de “cero residuos” a la salida del sistema de lagunas de los POME como mecanismo para reducir la contaminación de las fuentes de agua (Espinosa *et al.*, 2016); especialmente cuando en Colombia los parámetros máximos permisibles de contaminación se han hecho más exigentes durante los últimos años (MADS, 2015). Por ejemplo, el POME tratado puede ser utilizado para la producción de compost o como agua de riego gracias a su alto contenido de nutrientes (nitrógeno, potasio, magnesio y calcio), como señalan Ohimain e Izah (2017) y Ramírez *et al.* (2011). Sumado a lo anterior, el Gobierno colombiano ha fomentado el uso de biomasa y biogás para la generación de energía renovable, tanto para la demanda interna de las plantas de beneficio como para la venta de excedentes de electricidad a la red nacional, a través de incentivos fiscales que promueven el desarrollo y uso de fuentes de energía no convencionales (Fedepalma, 2017b; MADR, 2016; UPME, 2019).

El futuro de la cadena de producción de APC debe centrarse en reducir el volumen de emisiones, dando cumplimiento a las normas internacionales de sostenibilidad mediante la optimización de prácticas agroindustriales que contemplan los siguientes aspectos:

- i. Aumentar el rendimiento de los cultivos a través de la adopción de prácticas y tecnologías agrícolas sostenibles, como se ha evidenciado en el sector palmero colombiano (Cooman, 2018). El objetivo de estas prácticas es llegar a un promedio nacional de 24 t RFF ha<sup>-1</sup> y una producción de 5 t APC ha<sup>-1</sup> para 2023

(Cooman, 2018). Sin embargo, los escenarios futuros planteados en este trabajo proponen un rendimiento de 30 t RFF ha<sup>-1</sup> en los cultivos, el cual equivale a cerca de 6,6 t APC ha<sup>-1</sup> (tasa de extracción de APC de 22,11 %). En ese orden de ideas, se estima que el sector palmero colombiano debe hacer un gran esfuerzo en materia de productividad.

- ii. Reducir el consumo de diésel, principalmente en la etapa de transporte de RFF desde el cultivo a la planta de beneficio, donde el uso de vehículos más eficientes podría contribuir a reducir el volumen de emisiones.
- iii. Agregar valor a la biomasa contribuiría a mitigar los impactos ambientales adversos e incrementar los ingresos del sector. Dado que la biomasa residual del sector agrícola no requiere uso de suelo adicional ni es apta para el consumo humano, este compuesto contribuye a combatir la deforestación y la competencia por la producción de alimentos (IEA Bioenergy, 2015). En Colombia, el sector palmero tiene el potencial de producir cerca de un millón de toneladas de biomasa lignocelulósica (peso seco). Sin embargo, el uso de esta biomasa dependerá de factores como su disponibilidad y costos (Ramírez *et al.*, 2015). Al respecto, según los datos recolectados durante el trabajo de campo, la mayor parte de los RFFV no tiene un uso específico debido a los altos costos de transporte. En consecuencia, estos son dispuestos en vertederos cercanos a las POM, lo cual genera problemas ambientales como la fuga de lixiviados y mayores emisiones de CH<sub>4</sub>. Por ello, la cogeneración de energía (calor y electricidad) y la producción de compost y pélets son algunas de las propuestas de los escenarios futuros planteados por este estudio.

El análisis de la NER durante el ciclo de vida de la producción de BD muestra que la energía fósil consumida es inferior a la energía renovable producida. Los valores de NER reportados en la literatura para la cadena de BD en Brasil y Colombia varían entre 3,8 y 5,7 (de Souza *et al.*, 2010; Yáñez *et al.*, 2009). Sin embargo, una comparación del balance energético a partir de la inclusión de todos los productos y subproductos del proceso, muestra que el valor potencial de

la NER es mayor. En un análisis de diversos productos de origen biológico a base de aceite de palma, la NER oscila entre 17,7 y 22,9 (García-Núñez *et al.*, 2016). En el presente estudio, el escenario futuro B reporta una NER superior a la del escenario futuro A (13,7 y 12,5, respectivamente). Esto se debe a la producción de pélets en el escenario futuro B, la cual hace posible que aumente la energía renovable producida. En contraste, la producción de compost en el escenario futuro A ocasiona un mayor consumo de combustibles fósiles. Así, se observan valores más altos de NER cuando incrementa el uso de biomasa como fuente de energía renovable (es decir, electricidad, pélets y BD).

Con respecto al desempeño económico, el VAN y la TIR son empleados como indicadores de la viabilidad económica del negocio palmero, y varían según los precios del APC en el mercado. Por su parte, el CAPEX depende de la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio y de la vida útil de la maquinaria. En la dimensión económica, es necesario tener presente que el establecimiento de una plantación de palma de aceite, además de una inversión inicial, involucra un periodo de desarrollo vegetativo previo al inicio del ciclo productivo (tercer año). Una vez que la planta alcanza su madurez (año 7), la producción de RFF tiende a estabilizarse, generando ingresos por las ventas de fruto.

El análisis de costos de este negocio está directamente relacionado con las prácticas de manejo agronómico y el procesamiento a escala industrial, por lo que el rendimiento y los costos de cada etapa de la cadena deben ser optimizados para obtener un mayor margen de beneficio (Mosquera *et al.*, 2014). El uso de biomasa y la realización de mejoras en las condiciones de producción —que aumentan los rendimientos en la cadena de suministro— generan beneficios económicos y ambientales. Por ejemplo, en el escenario actual, el rendimiento de los cultivos es de 19,3 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, mientras que la planta de beneficio opera durante 5.381 h año<sup>-1</sup>, lo que supone la siembra de 8.400 ha. Sin embargo, al aumentar el rendimiento de los cultivos (30 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y contar con una mayor capacidad y tiempo de procesamiento en planta de beneficio (70 t RF h<sup>-1</sup> y 6.000 h año<sup>-1</sup>, respectivamente), se necesitarán solo 14.000 ha para producir un cantidad de racimos 55 % superior a la generada en el escenario actual. Esto significa una mayor producción de RFF por año en un área menor.

## Conclusiones

Esta investigación evaluó el panorama actual del sector palmicultor colombiano en cuanto a emisiones de GEI y desempeño económico. Además, se analizaron dos escenarios futuros en los que las emisiones de GEI pueden reducirse mediante el desarrollo de buenas prácticas, tales como (i) la expansión del cultivo en zonas aptas y disponibles, (ii) un menor uso de fertilizantes químicos con alta huella de carbono (por ejemplo, nitrato de amonio), (iii) la aplicación de acondicionadores de suelos como el compost, (iv) mejores cifras de productividad del cultivo y de rendimiento de APC por hectárea, (v) la reducción del consumo de diésel y (vi) la captura de biogás. Sumado a lo anterior, se recomienda el uso de las descargas del sistema POME como agua de riego en las plantaciones cercanas, siempre que esto sea posible.

Las mejoras en la cadena de producción de APC en los escenarios futuros A y B permiten una disminución de 55 % en las emisiones de GEI con respecto a las cifras del escenario actual. El análisis de la NER durante el ciclo de vida de la producción de BD mostró un aumento de la energía renovable en comparación con el aporte de energía fósil. De otro lado, en estos escenarios futuros se observa que el impacto del LUC en las emisiones totales depende no solo del cambio de la cubierta terrestre, sino también de la precisa asignación de valores para las reservas de carbono transformadas.

Para todos los escenarios, los costos operativos de los cultivos representaron la mayor inversión. Sin embargo, se estima que el CAPEX y el OPEX disminuirán cerca de 20 % en los escenarios futuros y que la venta de excedentes de energía y pélets puede aportar entre 5 y 10 % de los ingresos totales. En futuras evaluaciones económicas se podría considerar el hecho de que las inversiones serán escalonadas en el tiempo (por ejemplo, primero la fase de plantación, luego el establecimiento de la POM y la planta de BD, etc.). También podrían evaluarse escenarios en los que inversionistas adquieren la POM y compran RFF a proveedores, o aquellos que incluyen los ingresos procedentes de la venta de bonos de carbono o productos etiquetados como sostenibles respaldados por sistemas de certificación reconocidos internacionalmente.

Un punto clave de este estudio es dar cuenta del potencial de mejora en el equilibrio de los GEI generados por la cadena de producción de BD, cuya viabilidad económica puede mejorar a través de la obtención de mayores rendimientos, el uso de suelos con bajas reservas de carbono, una mayor escala de producción, la cogeneración de energía y la producción de biogás, pélets y compost. Un segundo punto clave apunta al cumplimiento de las políticas nacionales sobre el uso de tierras disponibles y la prevención de la deforestación, elementos esenciales para garantizar la sostenibilidad del sector palmero.

## Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses ni sostienen relaciones personales que pudieran influir en el desarrollo de la investigación abordada en este documento.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del programa bilateral “Towards a long-term science and innovation collaboration between Colombia and the Netherlands in Biomass Valorization” (RVO-TF-13COPP7B), suscrito entre Colombia y los Países Bajos. Así mismo, agradecen al Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma, por la cofinanciación de este estudio. Por último, agradecemos a las plantas de beneficio y plantaciones de palma de aceite de Colombia que suministraron los datos primarios para este estudio.

## Datos complementarios

Los datos complementarios de este artículo se encuentran disponibles en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>.

---

## Referencias

- Abdul-Manan, A. F. N. (2017). Lifecycle GHG emissions of palm biodiesel: Unintended market effects negate direct benefits of the Malaysian Economic Transformation Plan (ETP). *Energy Pol.*, 104, 56-65.
- Acevedo, J. C., Hernández, J. A., Valdés, F. & Kumar, S., 2015. Bioresource technology analysis of operating costs for producing biodiesel from palm oil at pilot-scale in Colombia. *Bioresour. Technol.*, 188, 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.071>
- Afriyanti, D., Kroeze, C. & Saad, A. (2016). Indonesian palm oil production without deforestation and peat conversion by 2050. *Sci. Total. Environ.*, 557-558, 562-570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.032>
- Arrieta, F., Teixeira, F., Yáñez, E., Lora, E. & Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Colombian palm oil industry: Three case studies. *Biomass Bioenergy*, 31, 503-511. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.016>
- Beltrán, J. A., Pulver, E., Guerrero, J. & Mosquera, M. (2015). Cerrando brechas de productividad con la estrategia de transferencia de tecnología productor a productor. *Palmas*, 36(2), 39-53.

- Castanheira, E. G., Acevedo, H. & Freire, F. (2014). Greenhouse gas intensity of palm oil produced in Colombia addressing alternative land use change and fertilization scenarios. *Appl. Energy*, 114, 958-967. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.010>
- Castiblanco, C., Etter, A. & Aide, T. M. (2013). Oil palm plantations in Colombia: A model of future expansion. *Environ. Sci. Pol.*, 27, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.003>
- Castiblanco, C., Etter, A. & Ramírez, A. (2015). Land use policy impacts of oil palm expansion in Colombia: What do socioeconomic indicators show? *Land Use Pol.* 44, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.10.007>
- Cooman, A. (2018). *Oportunidades y retos Cenipalma*. Bogotá: Cenipalma.
- CREG. (2018). *Resolución CREG 030 de 2018, Ministerio de Minas y Energía. Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Bogotá: CREG.
- DNP. (2018). *Estudio de Bioeconomía como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia-Fase II*. Bogotá: DNP.
- de Souza, S. P., Pacca, S., de Ávila, M. T. & Borges, J. L. B. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renew. Energy*, 35, 2552-2561. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.028>
- Durlinger, B., Koukouna, E., Broekema, R., van Paasen, M. & Scholten, J. (2017). *Agrifootprint 4.0. Part 1: Methodology and Basic Principles*. Gouda: Países Bajos.
- EPOA. (2016). *Producción de aceite de palma. Palm Oil food*. Recuperado de <http://www.palmoilandfood.eu/es/produccion-del-aceite-depalma>
- Espinosa, J. C. (2016). *Sostenibilidad ambiental en Colombia*. Bogotá: Colombia.
- Espinosa, J. C., Martínez, M. C., Oberlaender, J., Sanín, M. C., Peñaloza, L., Ortiz, J. D. & Lozano, M. (2016). *Lineamientos para la adopción del Estándar de Sostenibilidad de la Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible -RSPO- en Colombia*. Bogotá: Colombia.
- Fedepalma. (2017a). *Desempeño del sector palmero colombiano*. Bogotá: Colombia.
- Fedepalma. (2017b). *Procedimientos e incentivos para la generación y venta de energía eléctrica renovable de la agroindustria de palma de aceite en Colombia*. Bogotá: Colombia.
- Fedepalma. (2018). *Minianuario Estadístico 2018. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*. Bogotá: Colombia.
- Fedepalma. (2019). *Sispa: Sistema de información estadística del sector palmero de Colombia*. Recuperado de <http://sispa.fedepalma.org/login.aspx>
- Fedepalma. (2020). *Anuario Estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*. Bogotá: Colombia.

- Fontanilla, C., Mosquera-Montoya, M., Ruíz, E., Beltrán, J. A. & Guerrero, J. (2015). Beneficio económico de la implementación de buenas prácticas en cultivos de palma de aceite de productores de pequeña escala en Colombia. *Palmas*, 36(2), 27-38.
- Fry, J. (2017). *Oil palm and the world market for oil crops*. Oxford: LMC International.
- Furumo, P. R. & Aide, T. M. (2017). Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: Land use change and trade. *Environ. Res. Lett.*, 12, 024008.
- Galindo, T. & Romero, H. M. (2012). *Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación*. Bol. Técnico 31. Bogotá: Cenipalma.
- García-Arbeláez, C., Vallejo, G., Higgings, M. L. & Escobar, E. (2016). *El acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Bogotá: Fundación Natura, MADS & WWF-Colombia.
- García-Núñez, J. A., Rodríguez, D. T., Fontanilla, C. A., Ramírez-Contreras, N. E., Silva-Lora, E. E., Frear, C. S., Stockle, C., Amonette, J. & García-Pérez, M. (2016). Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. *Biomass Bioenergy*, 95, 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.020>
- Gerssen-Gondelach, S. J. (2015). *Yielding a fruitful harvest. Advanced methods and analysis of regional potentials for sustainable biomass value chains interlinked with environmental and land use impacts of agricultural intensification*. Utrecht: Utrecht University.
- Gerssen-Gondelach, S. J., Wicke, B. & Faaij, A. P. C. (2017). GHG emissions and other environmental impacts of indirect land use change mitigation. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy*, 9, 725-742. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12394>
- Henson, I. E., Ruíz-Romero, R. & Romero, H. M. (2012). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: A preliminary analysis. II. Greenhouse gas emissions and the carbon budget. *Agron. Colomb.*, 30, 370-378.
- Hernández, A., López, A. & Frysz, J. (2018a). *Análisis pronósticos precios internacionales del petróleo*. Bogotá: Asociación Colombiana del Petróleo.
- Hernández, A., Romero, J. & Frysz, J. (2018b). *Costos de operación del sector petrolero en Colombia en 2017*. Bogotá: Asociación Colombiana del Petróleo.
- Husain, Z., Zainal, Z. A. & Abdullah, M. Z. (2003). Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass Bioenergy*, 24, 117-124.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP & MinRelaciones (2015). *Primer informe bienal de actualización de Colombia ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Bogotá: IDEAM, PNUD, MADS, DNP & MinRelaciones.
- IEA Bioenergy (2015). *Mobilizing sustainable bioenergy supply chains. Inter-task project synthesis report*. IEA Bioenergy.

- IPCC. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. En *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Khasanah, N. (2019). *Oil Palm (Elais guineensis) production in Indonesia: Carbon footprint and diversification options*. Amsterdam: Wageningen University. <https://doi.org/10.18174/467425>
- Khasanah, N., van Noordwijk, M. & Ningsih, H. (2015). Aboveground carbon stocks in oil palm plantations and the threshold for carbon-neutral vegetation conversion on mineral soils. *Cogent Environ. Sci.*, 8, 19.
- Khatun, R., Iman, M., Moniruzzaman, M. & Yaakob, Z. (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 76, 608-619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.077>
- Kusin, F. M., Izzati, N. & Mohamat-Yusuff, F. (2017). Greenhouse gas emissions during plantation stage of palm oil-based biofuel production addressing different land conversion scenarios in Malaysia. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 5293-5304. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8270-0>
- Lam, W. Y., Kulak, M., Sim, S., King, H., Huijbregts, M. A. J. & Chaplin-Kramer, R. (2019). Greenhouse gas footprints of palm oil production in Indonesia over space and time. *Sci. Total Environ.*, 688, 827837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.377>.
- MADR. (2016). *Hoja de ruta para la definición de políticas de caracterización y valorización de biomasa en Colombia*. Bogotá: MADR.
- MADR. (2018). *Resolución No 261 de 2018*. Bogotá: MADR.
- MADS. (2013). *Política Nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS)*. Bogotá: MADS.
- MADS. (2017a). *Acuerdo de voluntades para la deforestación cero en la cadena de aceite de palma en Colombia*. Bogotá: MADS.
- MADS. (2017b). *Política Nacional de Cambio Climático. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá: MADS.
- MADS. (2019). *Acuerdos Cero Deforestación*. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/acuerdos-cero-deforestacion>
- MADS. (2015). *Resolución 0631 de 2015 - Calidad de vertimientos*. Bogotá: MADS.
- Mesa, J. (2017). Elementos para una nueva visión de la palmicultura colombiana. *Palmas*, 38(3), 55-62.
- Mosquera-Montoya, M., Ruíz-Álvarez, E., Fontanilla, C. A., Beltrán, J. A. & Arias, N. (2014). *Manual para el registro de costos en plantaciones de palma de aceite de pequeños productores*. Cenipalma & FLIPA.

- Mosquera-Montoya, M., Ruíz-Álvarez, E. & Mesa-Fuquen, E. (2017). Economic assessment of technology adoption in oil palm plantations from Colombia. *Int. J. Financ. Res.*, 8, 74-84. <https://doi.org/10.5430/ijfr.v8n3p74>
- Mosquera-Montoya, M., Valderrama, M., Ruíz-Álvarez, E., López, D., Castro, L. & González, M. A. (2018). *Costos económicos de producción para el fruto de palma aceitera y el aceite de palma en 2016: estimación para un grupo de productores colombianos*. Bogotá: Fedepalma.
- Ohimain, E. I. & Izah, S. C. (2017). A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 70, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.221>
- Phillips, J. F., Duque, A. J., Cabrera, K. R., Yepes, A. P., Navarrete, D. A., García, M. C., Álvarez, E., Cabrera, E., Cárdenas, D., Galindo, G., Ordoñez, M. F., Rodríguez, M. L. & Vargas, D. M. (2011). *Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P. & Obersteiner, M. (2016). What are the limits to oil palm expansion? *Global Environ. Change*, 40, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007>
- Ramdani, F. & Hino, M. (2013). Land use changes and GHG emissions from tropical forest conversion by oil palm plantations in Riau province, Indonesia. *PloS One*, 8, 1-6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070323>
- Ramírez-Contreras, N. E., Arévalo, A. & Garcia-Nunez, J. (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-Contreras, N. E., Silva, A. S., Garzón, E. & Yáñez, E. E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. Bol. Técnico. Bogotá: Cenipalma.
- Rivera-Méndez, Y. D., Rodríguez, D. T. & Romero, H. M. (2017). Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia. *J. Clean. Prod.*, 149, 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.149>
- RSPO. (2017). *Sustainable palm oil*. Recuperado de <http://www.rspo.org/about/sustainable-palm-oil>
- Sapag, N. & Sapag, R. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Searchinger, T. D., Hamburg, S. P., Melillo, J., Chameides, W., Havlik, P., Kammen, D. M., Likens, G. E., Lubowski, R. N., Obersteiner, M., Oppenheimer, M., Robertson, P., Schlesinger, W. H. & Tilman, D. (2009). Fixing a critical climate accounting error. *Science*, 326(5952), 527-258. <https://doi.org/10.1126/science.1178797>



- Silalertruksa, T., Gheewala, S. H., Pongpat, P., Kaenchan, P., Permpool, N., Lecksiwilai, N. & Mungkung, R. (2017). Environmental sustainability of oil palm cultivation in different regions of Thailand: greenhouse gases and water use impact. *J. Clean. Prod.*, 167, 1009-1019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.069>
- Stichnothe, H. & Schuchardt, F. (2011). Life cycle assessment of two palm oil production systems. *Biomass Bioenergy*, 35, 3976-3984. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.001>
- Thomas, M., Buchanan, J., McLaughlin, D. & Grubba, D. (2015). *Sustainable sourcing guide for palm oil users*. Washington D. C.: WWF.
- Torres, J. (2014). Beneficio-costo del biodiésel como componente en la formulación del diésel distribuido en Colombia. *Palmas*, 35(3), 41-54.
- Torres, J. (2018). *Assessing land use change dynamics over years 2000 and 2012 for oil palm and other bioenergy crops in Colombia*. Groninga: Universidad de Groninga.
- UPME. (2009). *Biocombustibles en Colombia*. Bogotá: UPME.
- UPME. (2019). *Incentivos tributarios para FNCE y eficiencia energética*. Bogotá: UPME.
- UPRA. (2016). *Zonificación de aptitud para el cultivo comercial de palma de aceite en Colombia, a escala 1:100.000*. Bogotá: UPRA.
- UPRA. (2018). *Zonificación de aptitud para el cultivo comercial de palma de aceite 1:100.000*. Recuperado de <https://sipra.upra.gov.co/>
- UPRA. (2019). *Zonificaciones de aptitud para 25 sistemas productivos: mapas de aptitud a escala 1:100.000*. Recuperado de <https://sipra.upra.gov.co/>
- van der Hilst, F. (2012). Spatial variation of environmental impacts of regional biomass chains. En *Shades of Green. Spatial and Temporal Variability of Potentials, Cost and Environmental Impacts of Bioenergy Production* (pp. 74-118). Utrecht: Universidad de Utrecht.
- van Vliet, O. P. R., Faaij, A. P. C. & Turkenburg, W. C. (2009). Fischere-Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis. *Energy Convers. Manag.*, 50, 855-876. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.008>
- Wicke, B., Dornburg, V., Junginger, M. & Faaij, A. (2008). Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass Bioenergy*, 32, 1322-1337. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.001>
- Wicke, B., Verweij, P., van Meijl, H., van Vuuren, D. P. & Faaij, A. P. (2012). Indirect land use change: Review of existing models and strategies for mitigation. *Biofuels*, 3, 87-100. <https://doi.org/10.4155/bfs.11.154>
- Woittiez, L. S. (2019). *On yield gaps and better management practices in Indonesia smallholders oil palm plantations*. Wageningen: Wageningen University. <https://doi.org/10.18174/470340>

- WWF-Colombia. (2017). *Colombia viva: Un país megadiverso de cara al futuro*. Bogotá: WWF-Colombia.
- Yacob, S., Ali-Hassan, M., Shirai, Y., Wakisaka, M. & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Sci. Total Environ.*, 366, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.07.003>
- Yáñez, E., Silva-Lora, E. E., da Costa, R. E. & Torres, E. A. (2009). The energy balance in the palm oil-derived methyl ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia. *Renew. Energy*, 34, 2905-2913. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.007>
- Yáñez, E., Martínez, L. & Gualdrón, M. (2011). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma utilizando como herramienta el análisis de ciclo de vida (ACV)*. Bogotá: Cenipalma.
- Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Phillips, J. F., Duque, A. J., Cabrera, E., Galindo, G., Vargas, D. M., García, M. C. & Ordoñez, M. F. (2011). *Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el periodo 2005-2010*. Bogotá: IDEAM.