

Emisiones de gases de efecto invernadero para diferentes métodos de cosecha, alce y transporte de racimos de fruta fresca de palma de aceite*

Greenhouse Gas Emissions for Different Harvesting, Rising, and Transportation Methods of Oil Palm Fresh Fruit Bunches

CITACIÓN: Munar-F., D. A., Chaparro-T., D. C., Ramírez-C., N. E. & García-Núñez, J. A. (2021). Emisiones de gases de efecto invernadero para diferentes métodos de cosecha, alce y transporte de racimos de fruta fresca de palma de aceite. *Palmas*, 42(2), 49-61.

PALABRAS CLAVE: Tracción animal, Mecanización, Gases de efecto invernadero, Análisis de ciclo de vida, Palma de aceite.

KEYWORDS: Draught animal power, Mechanization, Greenhouse gases, Life cycle analysis, Oil palm.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

RECIBIDO: noviembre de 2020.

APROBADO: marzo de 2021.

MUNAR F. DAVID A.

Auxiliar de investigación, Programa de Procesamiento, Cenipalma
dmunar@cenipalma.org

CHAPARRO TRIANA DIANA C.

Auxiliar de investigación, Programa de Procesamiento, Cenipalma

RAMÍREZ CONTRERAS NIDIA E.

Asistente de investigación, Programa de Procesamiento, Cenipalma

GARCÍA NÚÑEZ JESÚS A.

Coordinador del Programa de Procesamiento, Cenipalma

Resumen

La transición de métodos de tracción animal a sistemas mecanizados se ha realizado con el fin de incrementar la productividad de los cultivos de palma de aceite. Sin embargo, el impacto ambiental con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que generan este tipo de transiciones aún es desconocido. Por ello, esta investigación estimó las emisiones de GEI reportadas por cinco estudios de caso que emplearon diferentes métodos de recolección, transporte al acopio, alce y transporte de racimos de fruta fresca (RFF) hasta la planta de beneficio. Los casos analizados contemplaron métodos parcialmente mecanizados (cable vía y tractores),

el uso de búfalos y el sistema mecanizado conocido como método *grabber*. Se siguieron los lineamientos establecidos por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, en inglés) y la norma ISO 14067. Las emisiones más bajas fueron reportadas para el método *grabber* (3,2 kg CO_{2eq}/t RFF). Las emisiones de los sistemas de cable vía mostraron variaciones entre 5,7 y 7,9 kg CO_{2eq}/t RFF, dependiendo del tamaño de la plantación, el uso de combustibles fósiles y la cantidad de búfalos asociados al sistema. Los procesos que generan más GEI son la fermentación entérica, el manejo del estiércol de búfalo y el uso de combustibles fósiles. Este trabajo resalta la importancia de cuantificar las emisiones de GEI en las diferentes actividades del cultivo para tomar acciones encaminadas a disminuir el impacto negativo de las labores relacionadas con la producción de la materia prima de la cadena de producción de aceite de palma crudo en Colombia.

Abstract

Oil palm plantations have made the transition from animal traction methods to mechanized systems in order to increase crop productivity. However, the environmental impact related to the greenhouse gas (GHG) emissions generated by this type of energy-source transition is not yet known. Therefore, this study estimated the GHG emissions reported in five case studies using different methods for fresh fruit bunches (FFBs) collection, transport to the stockpile area, rising, and transport to the palm oil mill. The cases examined considered partially mechanized methods (cableway and tractors), the use of buffalos, and the mechanized system known as grabber method. The guidelines established by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the ISO 14067 standard were followed. The lowest emissions were reported by the grabber method (3.2 kg CO_{2eq}/t FFB). The emissions generated by cableway systems showed variations between 5.7 and 7.9 kg CO_{2eq}/t FFB, according to plantation size, the use of fossil fuels, and the number of buffalos associated with this system. The processes that generate the most GHG are enteric fermentation, buffalo manure management, and the use of fossil fuels. The importance of quantifying GHG emissions for different crop activities is necessary to reduce the negative effects of the tasks involved in the production of raw material within the Colombian crude palm oil supply chain.

Introducción

Con el aumento de la población mundial y la demanda de alimentos, es necesario incrementar la producción agrícola de manera sostenible a través del uso de tecnologías eficientes y hacer uso de recursos que permitan disminuir la dependencia existente hacia los combustibles fósiles. A nivel agrícola, el incremento de la producción de alimentos se ha apoyado en un mayor uso de fertilizantes, agroquímicos, semillas genéticamente modificadas, animales con elevado potencial genético y sistemas de producción intensiva basados en la mecanización y el uso de productos industriales (Chirgwin, 1997). Sin embargo, este tipo de producción también ha causado un incremento en la demanda y dependencia de combustibles fósiles, lo

que podría aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El uso de combustibles fósiles es una de las principales causas de impactos sobre las emisiones de GEI en la cadena de producción de alimentos. Al respecto, un estudio realizado por el University College de Londres, Reino Unido, menciona que “las emisiones de GEI que produciría explotar las reservas estimadas de combustibles fósiles son tres veces superiores a lo que el mundo se puede permitir, si es que se quiere evitar los peores efectos del cambio climático” (McGlade y Ekins, 2015).

El uso de maquinaria agrícola para las labores de cultivo ha incrementado en los últimos años, desplazando al uso de animales de tracción debido a la necesidad de aumentar la productividad, disminuir costos, mantener una oferta rápida de materias primas

y suplir la escasez de mano de obra en áreas rurales (Aguilera *et al.*, 2019; Subramaniam, 2019). En este escenario, un estudio muestra que la transición de la agricultura a sistemas mecanizados ha generado un importante incremento en las emisiones de GEI. Por ejemplo, en España, hacia 1990 se tenían emisiones entre 185 y 242 kg CO_{2eq}/ha (mayor uso de animales de tracción), las cuales incrementaron a un rango entre 503 y 540 kg CO_{2eq}/ha para la década de los años 2000 (Aguilera *et al.*, 2019).

La tracción animal es una de las principales fuentes de energía para los agricultores de pequeña escala y juega un papel importante dentro del contexto de la agricultura sostenible y orgánica debido a su asequibilidad, adaptabilidad a diferentes tipos de terreno y las costumbres presentes en algunos territorios (Okello *et al.*, 2015). Esta fuente de energía puede ser empleada a mayor escala mediante su asociación a métodos mecanizados dentro de sistemas de producción alternativos o en terrenos donde la mecanización no sea posible. Comúnmente, se tiene la percepción de baja tecnificación e ineficiencia frente al uso de animales de tracción, lo que conlleva a la desinformación y a minimizar los beneficios adicionales del empleo de animales en actividades agrícolas (Okello *et al.*, 2015).

Los estudios de emisiones de GEI con un enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV) son necesarios para realizar comparaciones con respecto al desempeño ambiental de diferentes fuentes de energía. Sin embargo, realizar estudios de comparación de sistemas de producción que emplean energía animal y energía mecánica es difícil (Chirgwin, 1997) debido a que algunas especies empleadas para los sistemas de tracción animal, además de producir fuerza de tiro, pueden ser consideradas como generadoras de alimento para el ser humano y proveedoras de servicios ecosistémicos, como sucede con el aporte de materia orgánica al suelo a través de su estiércol y orina.

En el caso del uso de animales de tracción, las fases de ACV que deben ser contempladas para la estimación de las emisiones de GEI son: periodo de gestación, crecimiento, mantenimiento y trabajo del animal. Un estudio sobre el tema encontró que se generan menos emisiones de GEI mediante tracción animal con mulas o burros, luego de comparar todas las fases del ciclo de vida del uso de animales de tracción con las etapas del ciclo de tracción mecánica (Cerutti *et al.*, 2014). Por su

parte, los sistemas mecanizados generan el 95 % de sus emisiones de GEI en la fase de ciclo de vida de operación, seguida por la fabricación de maquinaria y la obtención de combustible fósil (5 %) (Engel *et al.*, 2012).

Otros estudios comparan ambas tecnologías, encontrando variaciones en las emisiones de GEI a partir del sistema evaluado. Los resultados pueden cambiar según la especie animal y los límites del sistema del ACV. Para el caso de sistemas de tracción animal con bovinos, se han encontrado emisiones similares o superiores al uso de sistemas mecanizados, lo cual se debe principalmente a la fermentación entérica¹ y al manejo del estiércol producido por esta especie (Aguilera *et al.*, 2019; Gathorne-Hardy, 2016). No obstante, este tipo de investigaciones debe considerar los subproductos (además de la energía) que podrían obtenerse de un sistema basado en tracción animal (carne y leche), como señalan Okello *et al.* (2015) y Spugnoli y Dainelli (2013); sin mencionar el aporte de los animales a la transformación de los residuos agrícolas y la generación de abono orgánico en forma de estiércol (FAO, 2016).

Dentro de las principales actividades que demandan energía mecánica en el cultivo de palma de aceite se encuentran la preparación del suelo, la aplicación de fertilizantes, el control de malezas y la cosecha y el transporte de racimos de fruta fresca (RFF) (Alfonso *et al.*, 2009). Este último (el transporte de RFF) es una actividad importante debido a la cantidad de fruto que se maneja diariamente, y aunque actualmente se emplean varios métodos de recolección y transporte, su eficiencia depende de la escala de operación y de la topografía del terreno (Alfonso *et al.*, 2009; Shuib *et al.*, 2020). Usualmente, la recolección de RFF se lleva a cabo con métodos mecánicos o el uso de vehículos de tracción animal. Algunas plantaciones también han implementado el uso de cable vía para el transporte del fruto desde los lotes a los puntos de acopio (Fontanilla y Castiblanco, 2009).

En cuanto a los sistemas basados en tracción animal, los búfalos son utilizados con frecuencia para labores agrícolas en los cultivos de palma de aceite, aprovechando su fuerza de tiro. Así mismo, el uso

1 Proceso digestivo realizado por microorganismos para la descomposición de carbohidratos a moléculas más simples.

de esta especie es asequible para los agricultores de pequeña escala gracias a su viabilidad técnica y económica. Según la FAO, el uso de animales de tracción es una fuente importante de energía en los países en vía de desarrollo, proyectando que para 2030 el 45 % de la demanda de energía de los sistemas agrícolas será suministrada por animales y humanos (Spugnoli y Dainelli, 2013). Así, el futuro de la mecanización en los cultivos de palma de aceite debe ir de la mano de la descarbonización de la economía y la búsqueda de tecnologías que mejoren la producción y la rentabilidad de sus operaciones (Subramaniam, 2019).

Teniendo en cuenta el reto que plantean las dinámicas de disminución de la población rural y la búsqueda de nuevas oportunidades laborales por parte de los jóvenes rurales, el desarrollo de una mecanización sostenible, descarbonizada, eficiente en el uso de recursos y con baja huella ecológica juega un papel importante para la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. En ese escenario, la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas favorecerá la rentabilidad del negocio palmero, la disminución de su impacto ambiental y la atracción de mano de obra joven al sector rural.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue comparar las emisiones de GEI generadas por las actividades de recolección, transporte al punto de acopio, alce y transporte de racimos de fruta fresca de palma de aceite a la planta de beneficio a partir de cinco estudios de caso, los cuales involucran métodos de cosecha a través de cable vía con búfalos, el sistema *grabber* y el sistema únicamente con búfalos. Los datos fueron recolectados de plantaciones ubicadas en las zonas palmeras Oriental y Central de Colombia.

Metodología y especificaciones de los estudios de caso

Estudios de caso

Las emisiones de GEI de cinco estudios de caso con diferentes métodos de recolección, transporte al punto de acopio y alce y transporte de RFF de palma de aceite a tolva fueron evaluadas. Los estudios de caso analizados contemplaron sistemas con métodos parcialmente mecanizados, como el cable vía, que

combina maquinaria agrícola y búfalos (casos 1, 2 y 3), sistemas mecanizados, como el *grabber* (caso 4), y sistemas con solo búfalos (caso 5), como se detalla en la Tabla 1. Se evaluó la categoría de impacto de calentamiento global a través de la estimación de las emisiones de GEI de una de las etapas productivas de aceite de palma crudo (APC). Este impacto se expresa en unidades de dióxido de carbono equivalentes por tonelada de RFF ($\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{t RFF}$), con base en los lineamientos de la norma ISO 14067 para la estimación de la huella de carbono de producto mediante la metodología ACV y los lineamientos del IPCC para la estimación de emisiones de GEI, que en este trabajo corresponden a dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).

Alcance

En el ACV la unidad funcional corresponde al rendimiento cuantificado de un sistema de producto para su uso como unidad de referencia, donde el flujo de referencia corresponde a la medida de las salidas de los procesos en un sistema de producto para cumplir la función expresada por la unidad funcional (ISO, 2015). En este estudio, la unidad funcional son los racimos de fruta fresca de palma de aceite (RFF), materia prima para la producción de aceite de palma crudo, cuyo flujo de referencia es una tonelada (1 t RFF).

Límites del sistema

Para estimar las emisiones de GEI se definieron los límites del sistema teniendo en cuenta todas las actividades que hacen parte de cada uno de los métodos evaluados en los estudios de caso, desde la recolección, pasando por el desplazamiento hasta el punto de acopio, el alce de fruto y su descargue en la caja contenedora, hasta el transporte de RFF a la tolva en la planta de beneficio (Figura 1). En los casos donde se reporta el uso de búfalos, se tuvieron en cuenta las emisiones de metano asociadas a la fermentación entérica y la deposición de estiércol (sólido y líquido). Respecto a las emisiones de óxido nitroso (N_2O), se tuvieron en cuenta las emisiones directas e indirectas generadas por el manejo del estiércol de los búfalos, las cuales fueron estimadas con base en los lineamientos del IPCC.

Tabla 1. Descripción de los estudios de caso y definición del alcance del análisis de ciclo de vida para la estimación de las emisiones de GEI de las etapas de cosecha y transporte de RFF

Caso	Área de plantación (ha)	Alcance del sistema	Descripción del sistema
1	5.000		Un zorrillo acoplado a un búfalo se desplaza por los lotes en una trayectoria en forma de "U" por las calles de cosecha, recogiendo los RFF a su paso. Cuando se completa la capacidad de arrastre del búfalo, este va hasta la línea más cercana del sistema de cable vía, donde los RFF son cargados en mallas de 200 kg de capacidad. Una vez en el sistema de cable vía, los RFF son transportados hasta los puntos de acopio, donde por medio de un transportador de cadenas (<i>redler</i>) son cargados en un camión (tipo volqueta) para ser llevados a la planta de beneficio.
2	2.000	Sistema de cable vía en la cadena productiva de APC hasta la planta de beneficio.	
3	120		
4	170	Sistema con <i>grabber</i> en la cadena productiva de APC hasta la planta de beneficio.	Un remolque acoplado a un tractor se desplaza por los lotes en una trayectoria en forma de "U" por las calles de cosecha, recogiendo los RFF a su paso. Cuando se completa la capacidad de carga del remolque, el sistema va hasta el punto de acopio y descarga los RFF en una caja contenedora de 10-20 toneladas de capacidad. Luego, un camión tipo volqueta recoge dicha caja y esta es transportada hasta la planta de beneficio.
5	170	Sistemas tradicionales en la cadena productiva de APC hasta la planta de beneficio.	Un zorrillo acoplado a un búfalo se desplaza por el lote en una trayectoria en forma de "U" por las calles de cosecha, recogiendo los RFF a su paso. Cuando se completa la capacidad de arrastre del búfalo, este se dirige hasta los puntos de acopio, donde los RFF son cargados por el personal a un camión tipo volqueta para ser llevados a la planta de beneficio.

Fuentes de información

La información utilizada para este estudio fue recolectada en 2018 en algunas plantaciones de palma de aceite ubicadas en las zonas palmeras Oriental y Central de Colombia. Debido a la falta de información con respecto a ciertas variables, algunos datos fueron estimados con base en los lineamientos del IPCC y bibliografía científica. La información fue recopilada en formularios durante visitas realizadas a cada una de las plantaciones, generando un inventario de ACV para cada estudio de caso. Además de lo anterior, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El consumo de aceites hidráulicos y lubricantes se estimó como insignificante debido a su bajo consumo y bajo porcentaje de participación en las emisiones.
- Se asume que las emisiones asociadas a la alimentación de los búfalos equivalen a 16 %, como resultado de la fermentación entérica,

según estudios realizados por la FAO (Opio *et al.*, 2013).

- Las emisiones generadas por las materias primas para la producción de maquinaria agrícola no fueron consideradas en este estudio, puesto que su participación es marginal comparada con el volumen de emisiones durante la fase de ciclo de vida de operación (Alam *et al.*, 2019).
- El CO₂ biogénico emitido no es considerado en el balance de emisiones debido a que parte de las emisiones relacionadas con el ciclo natural de carbono, aplicando así el criterio de neutralidad (Singh *et al.*, 2013).
- Se considera que las plantas de beneficio en cada estudio de caso se encuentran a 10 km de distancia. Cabe recordar que si los proveedores de RFF se encuentran ubicados a mayor distancia de la planta de beneficio, mayor será el volumen de emisiones asociadas al transporte de RFF.

Figura 1. Descripción gráfica de cada uno de los métodos de cosecha analizados para los estudios de caso

Casos parcialmente mecanizados (1, 2 y 3)		
Recolección	Desplazamiento a acopio	Descarga de RFF a caja contendor
		
Caso mecanizado (4)		
Recolección	Desplazamiento a acopio	Descarga de RFF a caja contendor
		
Uso de búfalos como animales de tracción (5)		
Recolección	Desplazamiento a acopio	Descarga de RFF a caja contendor
		

Fotografías: archivo Fedepalma.

Inventario de análisis de ciclo de vida (ACV) para cada estudio de caso

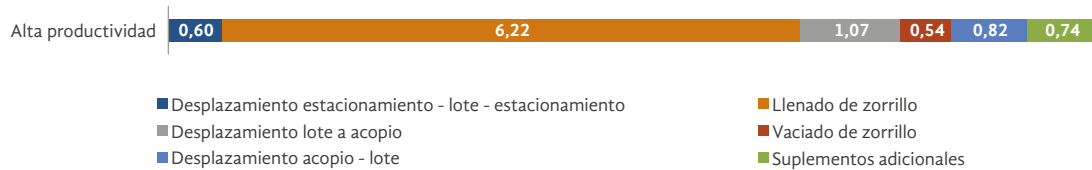
En la Tabla 2 se encuentran los inventarios ACV para los cinco estudios de caso. Los estudios de caso 1 y 2 corresponden a plantaciones de palma de aceite de 5.000 y 2.000 hectáreas, respectivamente. Los casos 3

y 5, por su parte, son plantaciones de 120 y 170 ha, respectivamente. El caso 4 corresponde a una plantación que usa el método *grabber*. Dentro de los estudios de caso están contempladas las fases de ACV de mecanización y uso de búfalos para tracción, siendo el caso 4 el único que no contempla el uso de búfalos, pues en esta plantación se aplica el método *grabber*, donde las

labores de recolección, desplazamiento a punto de acopio y descarga en cajas contenedoras se hace a través de este equipo. En el caso 1, el sistema de transporte de fruto está diseñado para una plantación de 5.000 ha, mientras que los casos 2 y 3 el sistema de cable vía tiene la capacidad de transportar la cosecha de una planta-

ción de 2.000 y 120 ha, respectivamente. Los datos del sistema *grabber* fueron tomados del trabajo de Munévar *et al.* (2020), quienes estimaron el consumo de diésel, el tiempo y la capacidad de recolección de fruto a través del uso de este método. La Figura 2 presenta el tiempo (en horas) dispuesto para realizar la labor.

Figura 2. Resultados de tiempos y movimientos para el método de cosecha con *grabber* (horas)



Fuente: Munévar *et al.* (2020).

Tabla 2. Inventario ACV de los parámetros claves para las labores de cosecha, alce y transporte de RFF en cada estudio de caso

Estudios de caso	Unidad	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4*	Caso 5
Descripción	-	Búfalo y cable vía	Búfalo y cable vía	Búfalo y cable vía	Cosecha tradicional (<i>grabber</i>)	Búfalo, mallas y tractor con brazo hidráulico
Área productiva	ha	5.000	2.000	120	170	170
Área cosechada con cable vía	ha	5.000	2.000	120	N/a	N/a
Búfalos	Cabezas	210	70	5	0	6
Producción de RFF	t RFF/año	136.940	28.656	3.004	2.916	2.916
Distancia puntos de acopio-planta	km	10	10	10	10	10
Fuente energía primaria <i>redler</i>	Electricidad o diésel	Diésel	Electricidad	Electricidad	N/a	N/a
Consumo electricidad <i>redler</i>	kWh/año	N/a	67.341	720	N/a	N/a
Consumo diésel <i>redler</i>	Galones/año	4.387	N/a	N/a	N/a	N/a
Potencia <i>redler</i>	kW	13,5	13,5	13,5	N/a	N/a
Longitud cable vía	km	149	100	9	N/a	N/a
Potencia motores aéreos	hp	9	9	9	N/a	N/a
Número de tractores aéreos	Cantidad	18	8	1	N/a	N/a
Número tractores terrestres	Cantidad	7	8	2	1	1
Consumo diésel transporte tractores aéreos	Galones/año	9.376	3.006	306	Estimación por horas de trabajo productivo	N/a

* Los datos del sistema *grabber* fueron tomados de Munévar *et al.* (2020).

Los estudios de caso 1, 2 y 3 realizan la labor de desplazamiento a puntos de acopio por medio de cable vía y el descargue de RFF a cajas contenedoras mediante transportador de cadena tipo *redler*. La principal diferencia de los sistemas *redler* entre estos tres casos radica en el uso de electricidad proveniente de la red eléctrica nacional o generada a partir de diésel para el funcionamiento del equipo.

Resultados y discusión

Emisiones de GEI

El volumen de emisiones más bajo corresponde al estudio de caso 4, con un valor de 3,2 kg CO_{2eq}/t RFF (Figura 3). En este caso, toda la labor de recolección, desplazamiento a punto acopio y descarga de RFF en cajas contenedoras fue realizada por un tractor con sistema *grabber*. Le sigue en menor volumen de emisiones el caso 1, donde se usan búfalos y sistemas mecanizados (5,8 kg CO_{2eq}/t RFF). Por su parte, el caso 3 reporta emisiones de GEI de 6,0 kg CO_{2eq}/t RFF, mientras que en el caso 5 las emisiones alcanzaron 5,8 kg CO_{2eq}/t RFF. En este último no se usaron tractores para la recolección y el desplazamiento de los racimos. Las emisiones de GEI más altas registradas por nuestro estudio corresponden al caso 2 (7,9 kg CO_{2eq}/t RFF), en el que las emisiones generadas por el uso de búfalos equivalen a 68 % del

total de emisiones, mientras que el uso de equipo con tractores aéreos representa el 14 % (Figura 3). Las emisiones asociadas al consumo de lubricantes son imperceptibles.

En la Figura 4 se detalla la contribución a la generación de emisiones de GEI de los procesos involucrados en cada uno de los casos analizados. Los procesos con mayor contribución son el uso de diésel en tractores, el transporte de RFF a planta de beneficio en camiones tipo volqueta y las emisiones generadas por búfalos. Las emisiones asociadas a la operación de los tractores aéreos en los sistemas con cable vía se ubican en el rango de 12 a 17 %. En cuanto al transportador de cadenas tipo *redler*, se encuentra que su proporción es mayor en el caso 1 con respecto al caso 2, debido a que en el primero se usa diésel para generar la energía eléctrica de operación, mientras que el transportador de cadenas del caso 2 opera directamente con electricidad proveniente de la red nacional.

Las mayores emisiones de GEI se dan en los estudios de caso donde se involucra el uso de búfalos. Realizando un análisis más detallado de las emisiones, y comparando nuestros hallazgos con resultados de la FAO, se encontró que las emisiones de metano del proceso de fermentación entérica contribuyen con 56 % del total de emisiones en este escenario, mientras que la producción de estiércol aporta 27 %, la disposición del estiércol un 6 % y el alimento de los búfalos 9 % (Opie *et al.*, 2013), como se observa en la Figura 5.

Figura 3. Emisiones de GEI asociadas a las labores de cosecha, alce y transporte de RFF para cinco estudios de caso

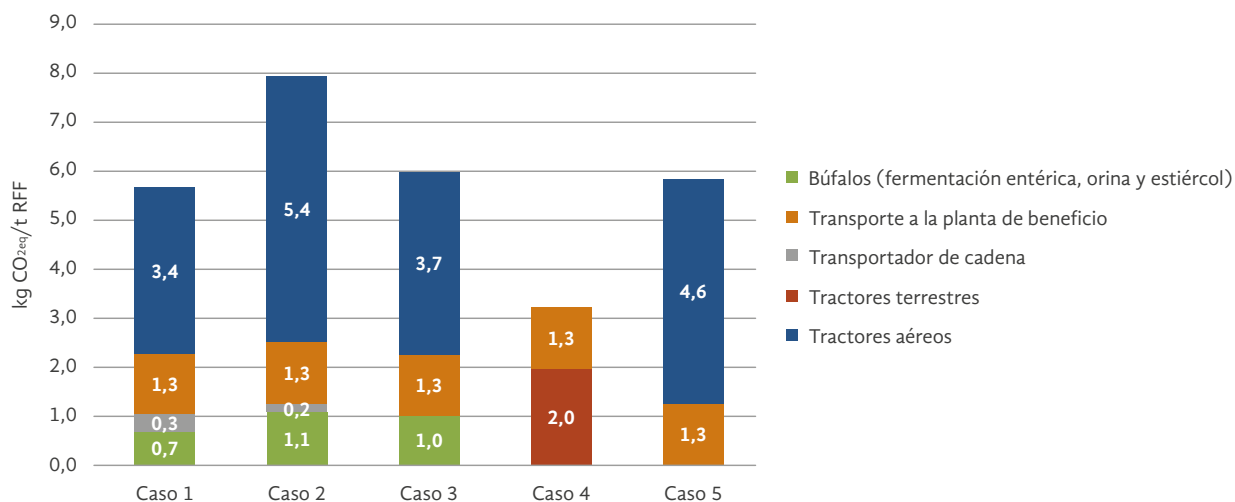


Figura 4. Contribución relativa de los diferentes procesos en cada estudio de caso a las emisiones de GEI

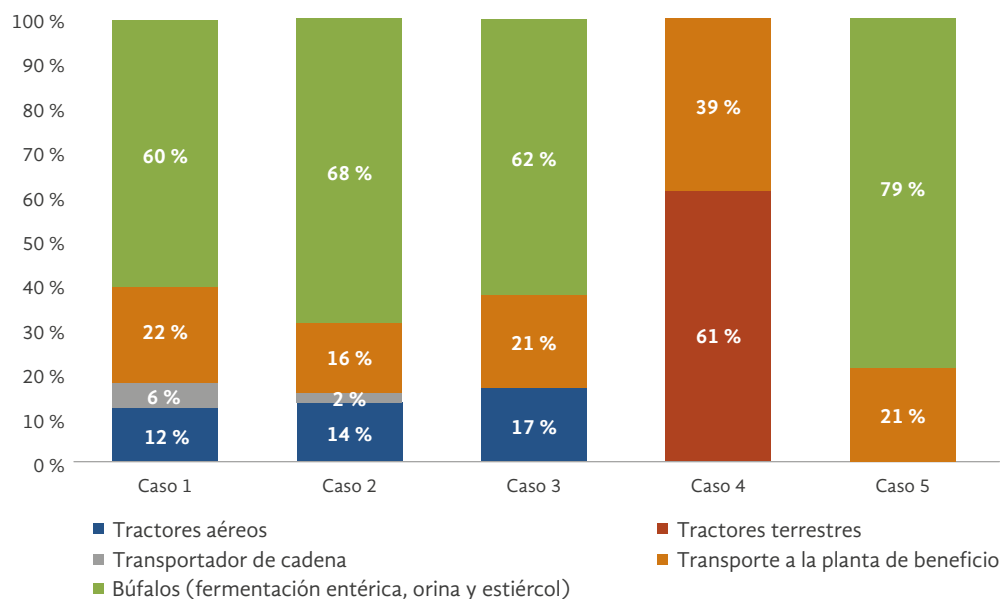
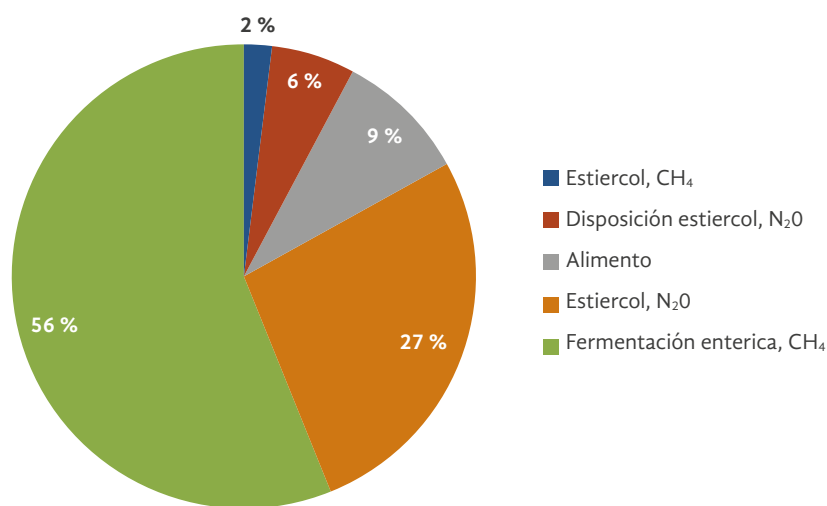


Figura 5. Contribución relativa de los diferentes procesos que involucran el uso de búfalos a las emisiones de GEI

Fuente: elaboración propia con base en Opio *et al.* (2013)



Con relación a la cantidad de búfalos y el área de la plantación, se encuentra que el caso 1 (menores emisiones de GEI) cuenta con la menor cantidad de búfalos por hectárea, lo que se traduce en menores emisiones de GEI por efecto de la fermentación entérica y el manejo de estiércol. Cabe señalar que es necesario considerar la capacidad que tiene el búfalo para trabajar, pues algunos estudios señalan que un búfalo podría cubrir 4 hectáreas por día (Muhamad y Aziz, 2018). Por ejemplo, en sistemas como el cable vía

la productividad del búfalo es mayor a la de sistemas con solo tracción animal, gracias a la disminución de las distancias a recorrer. Estos sistemas parcialmente mecanizados contribuyen a la recolección de RFF y disminuyen el esfuerzo de los búfalos, por lo que facilitan el trabajo y disminuyen el tiempo de recolección y acopio de RFF.

Considerando que en los cinco estudios de caso el cultivo se encuentra a una distancia de 10 km de la planta de beneficio, es posible realizar una comparación de

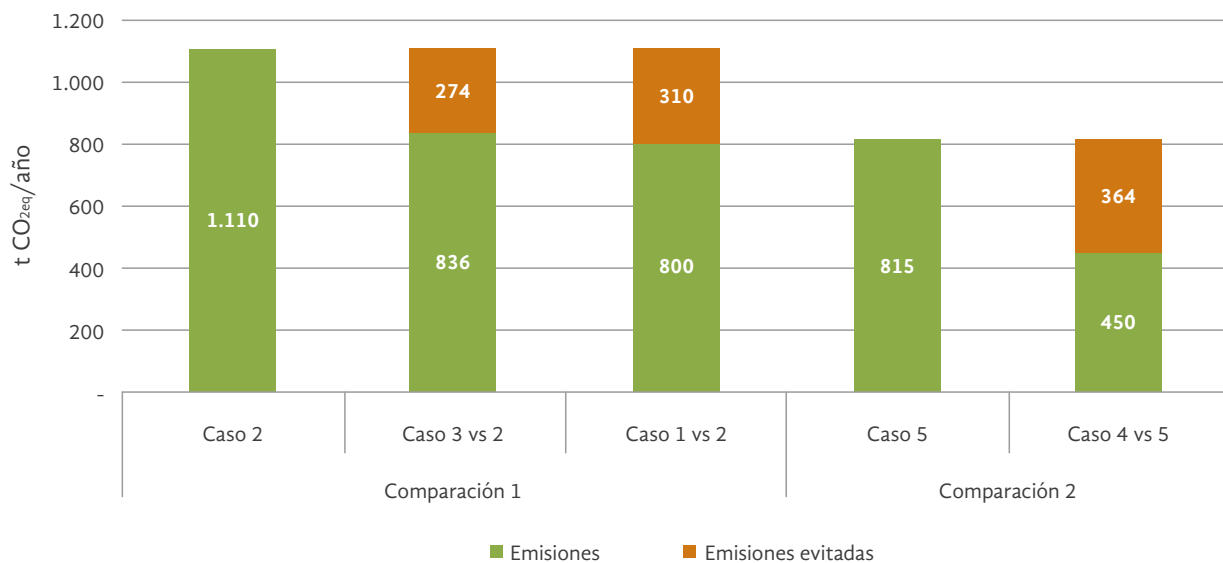
las emisiones de GEI bajo el mismo alcance y los mismos límites del sistema. Así, se encuentra que el uso de sistemas totalmente mecanizados puede llegar a ser una práctica con menores emisiones de GEI que los sistemas de tracción animal con rumiantes. Sin embargo, es pertinente destacar que el sistema de cable vía combinado con búfalos no solo permite realizar labores de cosecha, sino que adicionalmente funciona para labores como el transporte de fertilizantes, entre otras. En contraste, el uso de *grabber* solo permite la recolección de RFF y su posterior desplazamiento al punto de acopio y descarga en cajas contenedoras.

Con el fin de analizar escenarios de reducción de emisiones de GEI, se realizan dos comparaciones con un límite temporal de un año. La primera busca cuantificar la reducción de GEI del caso 2 mediante la comparación de sistemas con cable vía. La segunda pretende cuantificar la reducción de las emisiones de GEI con la transición de búfalos a *grabber*. Haciendo un análisis comparativo en una plantación hipotética con cable vía y una producción de 140.000 t RFF/año (plantación de 5.000 ha, área similar a la del caso 1), se encuentra que ante condiciones similares a las del estudio de caso 2 y una logística apropiada (programación adecuada de la cosecha, menores tiempos de desplazamiento del tractor, prevenir desprendimientos de fruto, mantenimientos programados y personal

capacitado), como sugieren Adarme-Jaimes *et al.* (2011) y Fontanilla y Castiblanco (2009), junto con un manejo eficiente de los recursos, se lograría un comportamiento similar al reportado por el estudio de caso 1, el cual registró el menor volumen de emisiones. De esta manera, se evitarían 310 t CO_{2eq}/año, lo que equivale a una reducción de 28 % en las emisiones de GEI. Una segunda comparación, esta vez entre los casos 5 y 4, en la que se asume la posibilidad de mecanización gracias a las características del terreno, da como resultado una disminución de 364 t CO_{2eq}/año, lo que representa 45 % menos emisiones (Figura 6).

Dado que el método *grabber* presentó las menores emisiones de GEI, en el caso de los sistemas con búfalos como animales de tracción surge la pregunta sobre cómo disminuir las emisiones de GEI sin necesidad de implementar un cambio tecnológico. A partir del análisis comparativo realizado, se pudo evidenciar que es posible disminuir las emisiones hasta en 28 % (310 t CO_{2eq}/año evitadas) a través de mejoras en la logística y el uso de recursos. Sin embargo, existen otras formas de reducir las emisiones de GEI asociadas al uso de búfalos, como el suministro de alimentos de buena calidad (mayor contenido de proteína), lo cual permite disminuir las emisiones de metano gracias a una mejor digestibilidad (Opio *et al.*, 2013).

Figura 6. Emisiones de GEI evitadas gracias a la aplicación de buenas prácticas en los casos 2 y 5



El desempeño ambiental de los sistemas de tracción animal frente a los sistemas de tipo mecanizado no es un tema frecuente de investigación. Algunos estudios energéticos sobre este tipo de tecnologías muestran que el consumo de insumos procedentes de fuentes no renovables es mayor en los sistemas mecanizados, en comparación con los de tracción animal (Aguilera *et al.*, 2019; Rydberg y Jansén, 2002; Spugnoli y Dainelli, 2013). Por lo anterior, la inclusión de sistemas de tracción animal dentro de un estudio de ACV debe incorporar factores adicionales para el balance de emisiones de GEI, pues los animales de tracción no solo producen potencia de trabajo, sino que también transforman alimentos no aptos para los seres humanos en alimentos nutritivos y productos útiles; por ejemplo, convierten el pasto en carne o leche y aportan materia orgánica al suelo (estiércol y orina) (FAO, 2016). No obstante, los sistemas con uso de animales consumen recursos aun cuando no se encuentran en operación, contrario a lo que sucede con los sistemas mecanizados, donde los recursos empleados están directamente relacionados con las labores a realizar.

Al analizar el consumo de energía y las emisiones de GEI por unidad de producto o hectárea, Engel *et al.* (2012) encontraron que las emisiones pueden ser 45 % menores para los sistemas con animales que no sean rumiantes, en comparación con sistemas completamente mecanizados. Sin embargo, el presente análisis se llevó a cabo con búfalos, una especie de rumiantes, los cuales, en efecto, aportaron una proporción de emisiones de GEI dentro del balance de emisiones. A partir de los resultados, se encontró que en los sistemas parcialmente mecanizados (cable vía) el porcentaje de emisiones puede llegar a ser 86 % mayor al de un sistema completamente mecanizado. En el caso de sistemas sin mecanización (plantaciones de baja escala), las emisiones pueden llegar a ser 81 % más altas que con el método *grabber*.

Bajo el alcance y los límites del sistema considerados en este estudio, se pudo evidenciar que en ciertos casos la mecanización agrícola puede tener un mejor desempeño ambiental que las labores con uso de animales de tracción. Además, se observó que la combinación de animales y sistemas mecanizados, como el cable vía, mejoran el desempeño de la labor cuando, al mismo tiempo, se despliega una logística adecuada y se hace uso eficiente de los recursos.

La decisión sobre el uso de equipos mecanizados o de animales de tracción para las labores de cosecha, alce y transporte de RFF implica analizar factores como las emisiones de GEI, el uso de combustibles fósiles, la topografía de terreno y la calidad del suelo, entre otros. Además, se debe considerar que el uso de animales de tracción es un proceso que supone años de entrenamiento y domesticación, por lo que se debe promover el bienestar, la salud y la protección de los animales involucrados en las labores agrícolas (UNCAHP, 2018). Por lo anterior, la realización de estudios como la presente investigación visibiliza el papel de los animales de trabajo en la agroindustria del aceite de palma en Colombia, proporcionando así mismo información técnica para disminuir las brechas entre la práctica y la investigación.

Conclusiones

El uso de búfalos y tractores para las labores evaluadas genera mayores emisiones de GEI en comparación con el sistema *grabber*. Este desempeño inferior se debe a que la fermentación entérica y el manejo de estiércol contribuyen a la generación de mayores emisiones de GEI. Bajo las condiciones estudiadas, una plantación de gran escala (5.000 ha) puede producir fruto con emisiones por tonelada de RFF similares a las de una plantación de pequeña escala (120 ha) para las etapas de ACV analizadas.

El uso de tecnologías que involucran la combinación de energía animal y fósil puede ser una estrategia de descarbonización debido a que el consumo de combustibles fósiles es menor. Para agricultores de pequeña escala en países en vía de desarrollo, como Colombia, el uso de búfalos es una tecnología asequible gracias a su viabilidad técnica y económica. Sumado a ello, como se observa en los resultados, las emisiones de GEI por unidad de producto en los cultivos de pequeña escala son de la misma magnitud que en las plantaciones de gran escala.

El sistema *grabber* reportó las menores emisiones de GEI, mostrando que es posible implementar sistemas completamente mecanizados que generen bajas emisiones de GEI. No obstante, la aplicabilidad de esta tecnología dependerá de la extensión del cultivo y las características del terreno.

La evaluación de la sostenibilidad de las tecnologías abordadas en este trabajo muestra la dinámica del uso de energía fósil y energía renovable en el sector palmero colombiano. Los análisis comparativos efectuados permiten identificar acciones encaminadas a disminuir las emisiones de GEI relacionadas con la producción de materia prima en la cadena de suministro de aceite de palma nacional.

Agradecimientos

Este estudio recibió apoyo del Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y el Ministerio de Ambiente de Alemania, en el marco del proyecto SuLu (Planificación climáticamente inteligente en sabanas, a través de la incidencia política, el ordenamiento y las buenas prácticas).

Referencias

- Adarme-Jaimes, W., Fontanilla, C. & Arango-Serna, M. D. (2011). Modelos logísticos para la optimización del transporte de racimos de fruto fresco de palma de aceite en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(1), 89-114. <https://doi.org/10.18359/rcin.272>
- Aguilera, E., Guzmán, G. I., González de Molina, M., Soto, D. & Infante-Amate, J. (2019). From animals to machines. The impact of mechanization on the carbon footprint of traction in Spanish agriculture: 1900–2014. *Journal of Cleaner Production*, 221, 295-305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.247>
- Alam, M. K., Bell, R. W. & Biswas, W. K. (2019). Increases in soil sequestered carbon under conservation agriculture cropping decrease the estimated greenhouse gas emissions of wetland rice using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 224, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.215>
- Alfonso, O., Romero, H. M. & Botero, R. (2009). La mecanización del cultivo de palma de aceite. *Palmas*, 30(4), 21-29.
- Cerutti, A. K., Calvo, A. & Bruun, S. (2014). Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 64, 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>
- Chirgwin, J. C. (1997). Los animales de trabajo y el desarrollo sostenible. *Revista Mundial de Animales*, 1(88), 1-12. <http://www.fao.org/AG/agA/AGAP/FRG/FEEDback/War/V8180b/v8180b0p.htm>
- Engel, A., Wegener, J. & Lange, M. (2012). Greenhouse gas emissions of two mechanised wood harvesting methods in comparison with the use of draft horses for logging. *European Journal of Forest Research*, 131, 1139-1149. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0585-2>
- FAO. (2016). *The contributions of livestock species and breeds to ecosystem services*. Roma: FAO. <http://www.fao.org/3/a-i6482e.pdf>

- Fontanilla, C. & Castiblanco, J. (2009). Cable vía en la cosecha de palma de aceite. *Palmas*, 30(4), 53-64.
- Gathorne-Hardy, A. (2016). The sustainability of changes in agricultural technology: The carbon, economic and labour implications of mechanisation and synthetic fertiliser use. *Ambio*, 45(8), 885-894. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0786-5>
- ISO. (2015). *Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos Requisitos y directrices para cuantificación y comunicación (UNE-CEN ISO/TS 14067)*. Ginebra: ISO.
- McGlade, C. & Ekins, P. (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature*, 517(7533), 187-190. <https://doi.org/10.1038/nature14016>
- Muhamad, Z. M. & Aziz, M. F. A. (2018). Mechanization in Oil palm harvesting. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 8(5), 247-256. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v8-i5/4098>
- Munévar, D. E., Ruíz-Álvarez, E., Díaz, W., Báez, D., Hernández, J., Samalanca, Ó. & Mosquera-Montoya, M. (2020). Cosecha en cultivos de palma de aceite mediante el uso del *grabber*: caso de estudio en una plantación de Colombia. *Palmas*, 41(2), 13-26.
- Okello, W. O., Muhanguzi, D., MacLeod, E. T., Welburn, S. C., Waiswa, C. & Shaw, A. P. (2015). Contribution of draft cattle to rural livelihoods in a district of southeastern Uganda endemic for bovine parasitic diseases: An economic evaluation. *Parasites and Vectors*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-1191-9>
- Opio, C., Gerber, P., Mottet, A., Falcucci, A., Tempio, G., MacLeod, M. ... & Steinfeld, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains - A global life cycle*. Roma: FAO. <http://www.fao.org/docrep/018/i3461e/i3461e00.htm>
- Rydberg, T. & Jansén, J. (2002). Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. *Ecological Engineering*, 19(1), 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)
- Shuib, A. R., Radzi, M. K. F. M., Bakri, M. A. M. & Khalid, M. R. M. (2020). Development of a harvesting and transportation machine for oil palm plantations. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(5), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.05.001>
- Singh, A., Pant, D. & Olsen, S. I. (2013). *Life cycle assessment of renewable energy sources* (Vol. 36). Londres: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1>
- Spugnoli, P. & Dainelli, R. (2013). Environmental comparison of draught animal and tractor power. *Sustainability Science*, 8(1), 61-72. <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0171-7>
- Subramaniam, K. (2019). El futuro de la mecanización en las plantaciones de palma de aceite (Experiencia en Malasia). *Palmas*, 40(Especial, Tomo I), 231-236.
- UNCAPH. (2018). *UN Convention on Animal Health and Protection (UNCAHP)*. Recuperado de <https://www.globalanimallaw.org/downloads/Folder-UNCAHP.pdf>