

Análisis de ciclo de vida para la producción primaria de caña de azúcar en seis regiones de Costa Rica

Life Cycle Analysis for sugarcane production in six regions of Costa Rica

Johnny Montenegro Ballestero¹, Marco Chaves Solera²

[Recibido: 15 de junio 2021, Aceptado: 19 de octubre 2021, Corregido: 16 de noviembre 2021, Publicado: 1 de enero 2022]

Resumen

[**Introducción**]: Diferentes prácticas agrícolas implementadas durante la fase de producción de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) generan gases con efecto invernadero (GEI), existiendo gran interés en cuantificar y en identificar su origen para determinar las prácticas que emiten las mayores cantidades. [**Objetivos**]: Utilizar el análisis de ciclo de vida para identificar las principales fuentes de emisión de GEI en el proceso de producción de la caña de azúcar, proporcionar información base para desarrollar alternativas de mitigación y conocer la eficiencia de emisión del cultivo. [**Metodología**]: Se consideraron todas las labores de campo y el transporte de tallos al ingenio. Se determinó el uso de maquinaria y de agroquímicos, fertilizantes, así como el transporte de la caña al ingenio. Para el cálculo de la emisión de metano y óxido nitroso, se utilizaron factores de emisión nacionales y sugeridos por el IPCC. Cada gas se transformó a CO₂eq, forma en que se reportan los resultados. [**Resultados**]: La mayor fuente de emisión (73.6 %) lo constituyó la fertilización nitrogenada, seguida por la quema efectuada previo a la cosecha (13.2 %). La eficiencia de emisión varía con la región productora, siendo el promedio nacional de 26.9 kg CO₂eq t⁻¹ de caña y, de 247.5 kg CO₂eq t⁻¹ de azúcar. Se presentan y discuten algunas opciones de mitigación. [**Conclusiones**]: Se demuestra que la actividad cañera costarricense tiene una eficiencia mejor que otros países productores de caña y que, de implementarse opciones de mitigación, se podría reducir la emisión GEI y ello podría contribuir a diferenciar la producción nacional en los mercados.

Palabras clave: Agricultura; cambio climático; gases con efecto invernadero; mitigación; trópico.

Abstract

[**Introduction**]: Different agricultural practices implemented during sugarcane (*Saccharum officinarum*) production phase generate greenhouse gases (GHG), and there is great interest in quantifying and identifying their origin to determine the practices that emit the highest amounts. [**Objectives**]: To use the life cycle analysis to identify the main sources of GHG emissions in the sugarcane production process, to generate base information to develop mitigation alternatives and, to know the crop emission efficiency. [**Methodology**]: All field work and transport of stems to the mill were considered. The use of machinery and agrochemicals, fertilizers, as well as the transportation of sugarcane to the mill was determined. The emissions of methane and nitrous oxide were calculated by using national emission factors and those suggested by the IPCC. Each gas was converted to CO₂eq, the way the results are reported. [**Results**]: The largest source of emission (73.6 %) was nitrogen fertilization, followed by burning carried out prior to harvest (13.2 %). Emission efficiency varies with the producing region, being the national average of 26.9 kg CO₂eq t⁻¹ of cane and 247.5 kg CO₂eq t⁻¹ of sugar. Some mitigation options

- 1 Investigador en cambio climático y agricultura. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) e Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. jmontenegro@imn.ac.cr; jmontenegro@inta.go.cr; <https://orcid.org/0000-0001-8526-570X>
- 2 Especialista en el cultivo de la caña de azúcar, Costa Rica. chavessolera@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9646-5491>



are presented and discussed. [**Conclusions**]: It is shown that Costa Rican sugarcane activity has a better efficiency than other sugarcane producing countries, and that if mitigation options are implemented, GHG emissions could be reduced, and this could contribute to differentiate the national production in the markets.

Keywords: Agriculture; climate change; greenhouse gases; mitigation; tropics.

1. Introducción

El cambio climático es un problema global que tiene implicaciones locales tanto en su génesis como en sus consecuencias. La emisión de Gases con Efecto Invernadero (GEI), causantes del calentamiento global, se presenta en diferentes actividades desarrolladas por la actividad humana, entre las cuales la agricultura no es excepción.

En diferentes prácticas agrícolas implementadas durante el proceso productivo se generan este tipo de gases, por lo que, conociendo la grave consecuencia de su acumulación en la atmósfera, existe gran interés no solo en su cuantificación sino también en conocer cuáles actividades y labores es donde se producen las mayores cantidades.

Una técnica de valoración y cuantificación que se ha utilizado en diferentes actividades agrícolas y no agrícolas con ese objetivo es el denominado Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) (Abd & Yusoff, 2015; Castañeda Suárez *et al.*, 2017). El método permite, mediante un proceso ordenado, realizar un inventario detallado y sistemático, tanto de las actividades desarrolladas durante el proceso productivo de un cultivo, como también de los GEI que se generan y emiten en este. Al final del proceso, es posible la obtención de un índice de emisión, el cual relaciona la cantidad de GEI emitidos en correspondencia a la cantidad de producto producido. Valores reportados en diferentes investigaciones muestran un rango que va desde 24.0 hasta 126.5 kg de CO₂eq t⁻¹ caña producida (Gunawan, Romli & Noor, 2019; Kaab *et al.*, 2019).

Mediante este proceso, al poder identificar y ubicar con certeza cuáles son las mayores fuentes de emisión de la actividad evaluada, es posible enfocar, concentrar esfuerzos y desarrollar alternativas de mitigación específicas, en aquella o aquellas prácticas que son las responsables de emitir las mayores cantidades de GEI. De esta manera, el proceso también contribuye con la solución de esta preocupante problemática global.

Actualmente, en Costa Rica existe gran interés, tanto de parte del Gobierno de la República como de la empresa privada, en procurar reducir la emisión de este tipo de gases a la atmósfera por el beneficio generado a nivel global; como también, por la obtención de productos ambientalmente más limpios que podrían ser comercializados y colocados en mercados preferenciales.

El sector agrícola constituye uno de los sectores interesados en disponer de este tipo de estudios por las implicaciones positivas que de estos se derivan, y especialmente, para poder demostrar mediante evaluaciones, las bondades ambientales ligadas a la producción primaria. En este sentido, la agroindustria vinculada con la caña de azúcar costarricense ha mostrado ser proactiva y visionaria en esta iniciativa y emprendimiento, ya que se ha preocupado por desarrollar e implementar medidas y regulaciones protocolarias orientadas a establecer tanto buenas



prácticas agrícolas (BPA), como las dirigidas a la reducción del uso de agroquímicos durante el proceso productivo.

Una de las preocupaciones vigentes está relacionada con la emisión de GEI y su mitigación, razón por la cual se abocó a la formulación de un LCA como primer paso en ese proceso, y con ello, identificar la o las principales fuentes de emisión de GEI.

El LCA ha sido utilizado en diferentes países como Australia (Renouf & Wegener, 2007), Indonesia (Gunawam *et al.*, 2019), Colombia (Castañeda Suárez *et al.*, 2017) y Ecuador (Novoa-Romero *et al.*, 2018), todos con el propósito fundamental de conocer no solo las implicaciones ambientales ligadas al cambio climático, en el caso particular de la actividad cañera; también para tratar de mejorar la ecoeficiencia en el proceso productivo. En Costa Rica, a la fecha, no se ha realizado ningún estudio en este cultivo utilizando este enfoque metodológico.

Por esta razón, la presente investigación se ha enfocado en la realización de un LCA en el cultivo de la caña de azúcar, con los objetivos de: identificar las principales fuentes de emisión de GEI en el proceso productivo primario; cuantificar el aporte de GEI para cada fuente; determinar la eficiencia de emisión aplicada a la producción primaria y generar información que sirva de base para la propuesta de alternativas de mitigación viables y efectivas.

2. Metodología

2.1 Actividades incluidas

Las actividades incluidas en este análisis se presentan en la **Figura 1**, el cual incluye exclusivamente la fase de producción primaria, que involucra labores diversas que van desde la preparación del suelo hasta la cosecha y el transporte de la materia prima al ingenio, para su procesamiento y extracción del azúcar contenido en los tallos.

En Costa Rica, la Legislación Nacional (LAICA, 1998, 2000) vinculada con la agroindustria cañero-azucarera ha dividido y organizado esta actividad en seis regiones productoras, todo con fundamento en las condiciones agroclimáticas y de organización prevalecientes, las cuales son: Guanacaste, Pacífico Central, Valle Central, Zona Norte, Zona Sur y Turrialba/Juan Viñas. Cabe destacar, que esa organización aplica exclusivamente para la caña destinada a la fabricación de azúcar, no a otros usos alternativos (dulce, pecuario, humano).

Considerando esta estratégica segregación geográfica y territorial, se desarrolló una hoja de cálculo en Excel detallada por región productora, con el fin de introducir toda la información relacionada con las diferentes prácticas y las variantes que se realizan durante el ciclo productivo de la caña de azúcar. Los datos recabados y la zafra utilizada como referencia corresponden al periodo 2018-2019 (Chaves Solera, 2019b).





Figura 1. Representación esquemática de las labores consideradas en el LCA de caña de azúcar³.

Figure 1. Schematic representation of tasks considered in the sugarcane LCA³.

Para el correcto manejo e interpretación de la información recabada a partir de las diferentes labores efectuadas durante el ciclo vegetativo de la caña, se consideraron dos condiciones particulares que se presentan en el manejo de las plantaciones comerciales (Chaves Solera, 2019d). La primera, conocida como caña planta o plantilla, la cual se refiere al primer ciclo productivo comercial luego de la siembra o renovación de la plantación, mientras que la denominada caña soca o retoño se refiere a los siguientes ciclos sucesivos de cosecha y retoñamiento, hasta que ocurra la subsiguiente renovación de la plantación (Figura 1).

La renovación de las plantaciones comerciales de caña de azúcar se realiza para reactivar áreas con agotamiento productivo y de vigor, las que disminuyen ostensiblemente la rentabilidad de la plantación y competitividad del sector (Chaves Solera, 2021b). Uno de los grandes retos de la agroindustria es prolongar la vida comercial de las plantaciones en un marco de rentabilidad, competitividad y ecoeficiencia.

La renovación de las plantaciones se realiza por lo general cada 5-6 años, cuando el ciclo vegetativo es anual, pues en el caso de ciclos bianuales este se da cada 10-12 años. En el presente ejercicio se estableció que la renovación ocurre cada 5 años.

3 La fuente de las imágenes son las siguientes:

1. <https://agrotendencia.tv/agropedia/wp-content/uploads/2019/04/imagen26-150x150.gif>
2. [https://www.nacion.com/resizer/mtOL2tDz7_o0B5fH3NBXK3YBEFo=/400x225/filters:format\(jpg\):quality\(70\)/cloudfront-us-east-1-images.arcpublishing.com/gruponacion/QUJl4PMB7JFQ3CNTQAJUKB2NEM.jpg](https://www.nacion.com/resizer/mtOL2tDz7_o0B5fH3NBXK3YBEFo=/400x225/filters:format(jpg):quality(70)/cloudfront-us-east-1-images.arcpublishing.com/gruponacion/QUJl4PMB7JFQ3CNTQAJUKB2NEM.jpg)
3. <https://mercadoazucar.com/la-fertilizacion-define-el-exito-del-canaveral/>
4. Fotografía facilitada por Marco Chaves.
5. <https://yaraurl.net/ky3g>
6. https://www.inder.go.cr/noticias/comunicados/2020/PG013278_archivos/image002.jpg



2.2 Preparación de suelo

Para efectos de la investigación, se estimó con criterio experto, que anualmente esta práctica agrícola se realiza aproximadamente en el 8 % del área total cosechada en el país. Esta labor considera acciones como arranque de las cepas viejas, paso profundo de arado, subsolado, pases de rastra afinadora y finaliza con el surcado del terreno para realizar la siembra. Esas labores se realizan con equipos apropiados, normalmente tractor de llantas de 80-120 HP y en algunos casos muy calificados como el subsolado, con tractores de oruga.

Debido a que el tipo de suelo y la topografía (grado de pendiente) varían significativamente entre las regiones productoras, y en algunos casos también dentro de la misma región (Chaves Solera & Chavarría, 2017; Chaves Solera, 2017ab; 2019ac), el tiempo utilizado en cada una de las labores antes mencionadas no es uniforme y varió entre 8 y 17 horas ha⁻¹.

Debido a que no se dispone de registros de consumo de diésel utilizado por el equipo mecánico empleado en cada una de las labores consideradas, se utilizó el valor empleado por Valerín (2015).

2.3 Siembra

La siembra se realiza mayoritariamente en el país en forma manual, aunque usualmente se utiliza tractor de llantas (conocido como chapulín) para transportar la semilla desde el lugar de producción (usualmente la misma finca) hasta el lugar de siembra, donde la misma se distribuye, incorpora, troza en esquejes y tapa.

El transporte de la semilla se asume que ocurre internamente dentro de la misma finca, estimando un recorrido de 1 km. Se consideraron las toneladas a sembrar por hectárea, el número de hectáreas a sembrar, las toneladas transportadas por viaje utilizando un tractor de llantas y, con ello, se calculó el número de viajes realizados. Este valor se multiplicó por los kilómetros recorridos y se estimó el gasto de combustible efectuado por el tractor según valoraciones realizadas por expertos.

2.4 Aplicación de agroquímicos

Se consideró que los agroquímicos se aplican en toda el área sembrada, tanto en caña planta como en caña soca. Para aplicarlos, se requiere de agua, la cual es transportada al campo en tanquetas de 500 galones movilizadas por tractor de llantas, con un recorrido promedio de 5 km, lo cual significa un total de 10 km entre ida y regreso. Se asumió que el agua transportada en cada viaje alcanza para aplicar agroquímicos a 5 ha. El consumo de diésel se estimó de manera particular para cada zona productora, siguiendo la misma metodología utilizada para la siembra y con información aportada, por el personal técnico profesional de DIECA destacado en las respectivas regiones productoras.



2.5 Encalado

El encalado se realiza en toda el área de caña planta de las regiones cuyos suelos requieren corrección de acidez, exceptuando Guanacaste y el Pacífico Central, donde ese indicador no es problema, aplicándose para ese fin los productos y dosis indicados por Chaves Solera (1999a, 2017b, 2020c).

2.6 Aporca

Esta práctica se realiza estrictamente con tractor de llantas o de orugas considerando que la labor se realiza exclusivamente en el ciclo de caña soca y en el 100 % del área cosechada. Para el cálculo del consumo de combustible se estimó el tiempo requerido para realizar la labor, lo cual al igual que en el caso de la preparación del suelo, se realizó de acuerdo con las características del suelo y su relieve, variando el tiempo entre 1 y 2 horas ha⁻¹.

2.7 Fertilización nitrogenada

Para conocer la cantidad real de fertilizante nitrogenado que los productores de caña aplican e incorporan en sus plantaciones comerciales, se realizó una consulta específica y diferenciada por zona agrícola que involucró tanto ingenios como productores independientes, determinándose un rango de aplicación (valores mínimos y máximos, Cuadro 1). Por esta razón, se decidió utilizar tanto el valor del promedio aritmético para cada región, como también los valores extremos para estimar la emisión de óxido nitroso.

La fertilización requiere la utilización de maquinaria, normalmente tractor de llantas, para el transporte del fertilizante desde la bodega al lugar de aplicación y su distribución en la plantación. Para estimar el consumo de combustible se siguió la metodología utilizada para el transporte de la semilla para la resiembra (ver sección: 2.3 Siembra).

Cuadro 1. Fertilizante nitrogenado aplicado, kg ha⁻¹, según región productora.

Table 1. Nitrogen fertilizer applied, kg ha⁻¹, according to producing region.

Región productora	N (kg ha ⁻¹)
Guanacaste	110 – 126
Pacífico Central	126 – 136
Valle Central	71 – 125
Zona Norte	78 – 95
Zona Sur	116 – 128
Turrialba/Juan Viñas	174 – 212



2.8 Quema

La práctica de la quema se realiza previo a efectuar la cosecha de la plantación (Chaves Solera, 2021a). De acuerdo con criterio experto, esta práctica se realiza en el área a cosechar en índices aproximados a: 90 % en la Zona Sur, 85 % en el Pacífico Central, 60 % en Turrialba/Juan Viñas, 50 % en la Zona Norte, 40 % en el Valle Central y 75% en Guanacaste.

2.9 Cosecha y transporte al ingenio

En Costa Rica, la cosecha de las plantaciones comerciales de caña se realiza de manera tanto mecánica como manual. En el caso de las cosechadoras mecánicas, la información se contabilizó de acuerdo con la consulta realizada por región productora, el tiempo empleado y el consumo aproximado de combustible utilizado por hectárea. El área cosechada mecánicamente se calculó con base en datos aportados por Chaves Solera (2019a).

Al lugar de la cosecha se desplazan tractores de llantas para recoger la caña cortada, la cual transportan sea al centro de acopio o también directamente hasta el respectivo ingenio. Camiones y furgones de diversa capacidad son también utilizados. En todo caso, para las tres opciones, se estimó el consumo de combustible empleado durante la labor de transporte de la materia prima hasta el ingenio.

Para el cálculo de consumo de diésel se consideró la distancia promedio existente entre las fincas en cada región con respecto al o los ingenios que operan en ellas, involucrando tanto la ida como el retorno.

Para estimar el número de viajes, se consideró el peso de la carga acarreada en cada viaje de acuerdo con los diferentes medios de transporte normalmente utilizados en cada localidad tractor de llantas, camiones y furgones. Con esta información y conociendo la cantidad de caña cosechada en la región, se estimó la cantidad total de viajes. Sabiendo la distancia recorrida por viaje y el consumo de combustible estimado por kilómetro, se estimó el consumo para cada viaje y para cada medio particular de transporte.

Adicionalmente, se estimó la cantidad de combustible total utilizada al multiplicar el número de viajes de cada medio de transporte por el combustible gastado (litros), los cuales se sumaron, con lo cual se obtuvo el combustible utilizado en el transporte de toda la caña producida en cada región productora.

2.10 Cálculo de la emisión de gases con efecto invernadero

Para estimar la emisión de los diferentes GEI que se generan en las diferentes prácticas y labores consideradas en el estudio, cada fuente fue totalizada y se utilizaron los factores de emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2006), o los disponibles y provenientes de investigaciones nacionales vinculadas con la actividad cañero-azucarera (Montenegro & Chaves Solera, 2012; 2013).



Para calcular la emisión de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera, generados por el diésel durante la combustión interna, se utilizaron los factores de emisión del IPCC (2006).

Los resultados particulares de cada gas se transformaron de manera individual en equivalentes de dióxido de carbono (CO_2eq), de acuerdo con los valores establecidos por la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCCNU, Naciones Unidas, 1992).

2.11 Eficiencia de emisión

Para calcular la eficiencia de emisión (cantidad de gas CO_2eq emitido por tonelada métrica de caña producida o azúcar extraída, también conocida como Intensidad de la Emisión), se totalizó el CO_2eq de las diferentes fuentes evaluadas, proveniente tanto de caña planta como de caña soca, la cual se dividió entre la cantidad total de toneladas de caña procesadas, así como también entre la cantidad de azúcar obtenida, que fueron reportadas por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA) para cada región (Chaves Solera, 2019b).

2.12 Límites y limitaciones del estudio

Esta evaluación se desarrolló considerando las emisiones generadas en la finca y hasta el ingenio, dado que consideró el transporte de la materia prima desde el punto de cosecha hasta el lugar de su procesamiento.

Con respecto a las limitaciones de la investigación, no se incluyen como parte del estudio las emisiones generadas durante la manufactura de maquinaria, repuestos, agroquímicos, controladores biológicos, fertilizantes; tampoco lo generado durante el transporte de estos de su lugar de origen hasta el país, ni desde el lugar de compra en el país a la finca.

3. Resultados

3.1 Aspectos productivos

3.1.1 Producción de tallos

El tallo es la sección vegetal de valor comercial de la planta, el cual es cortado y llevado a los ingenios para proceder con la extracción y recuperación de la sacarosa contenida, utilizada para fabricar el azúcar comercial; en consecuencia, es el punto focal de personas agricultoras y empresarias, quienes dan el manejo técnico a la plantación con el objeto de favorecer e incrementar la cantidad y peso de los tallos y la acumulación de azúcares en estos.



La producción de tallos industrializables, expresada en toneladas totales por región para la zafra 2018-2019, presenta tres grupos. El primero está conformado solo por Guanacaste (Gte), donde se concentra la mayor producción nacional (59 %); el segundo grupo está representado por la Zona Norte (ZN) y el Pacífico Central (PC), con 11 y 10 % de la producción nacional, respectivamente. Finalmente, el tercer grupo lo conforman el Valle Central (VC), la Zona Sur (ZS) y Turrialba/Juan Viñas (Tlba/JV), con una participación del 8, 7 y 5 % de la producción, respectivamente (**Figura 2**).

La mayor producción de tallos en la región de Gte, tal y como lo muestra la (**Figura 2**), se explica por el hecho de que es la región donde existe la mayor área sembrada y cosechada (**Figura 3**), existiendo una relación directa entre ambas variables.

Al determinar la relación entre el área cosechada con respecto a la sembrada, con la excepción de la región de Tlba/JV, donde se detectó la menor proporción (63 %) y de la ZN con 85 %, las restantes regiones presentaron relaciones superiores a 93 % (**Figura 3**). En Turrialba, buena parte de la cosecha se realiza en ciclo bianual (16-24 meses), por razones de altitud de las plantaciones (> 1 000 m s n m), y en la ZN fue un asunto coyuntural particular de esa zafra, que no permitió por circunstancias ambientales la cosecha de toda el área prevista y programada (Chaves Solera, 2019b).

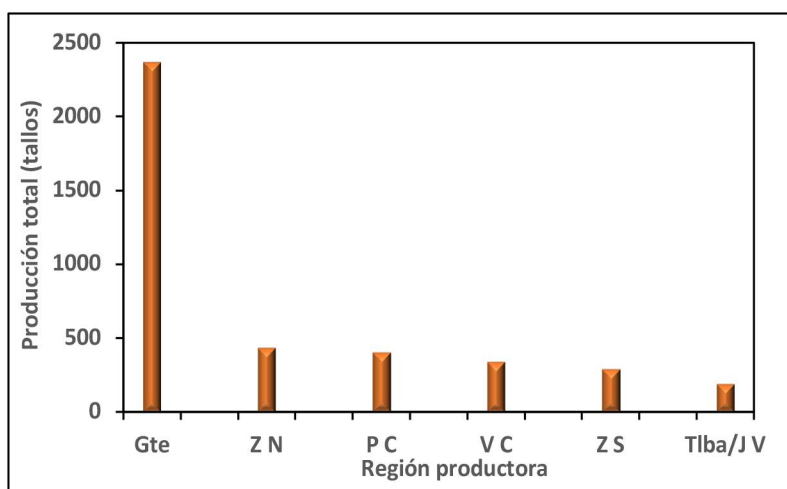


Figura 2. Producción total de tallos industrializables (t) según región productora para la zafra 2018-2019.

Figure 2. Total production of industrializable sugarcane stems (t) according to producing region for the harvest 2018-2019.



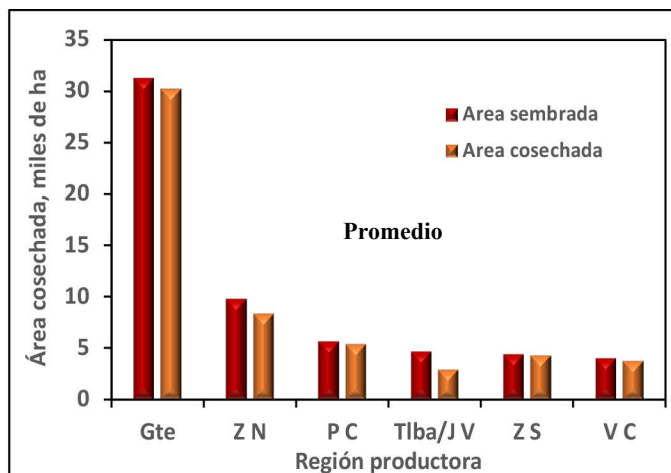
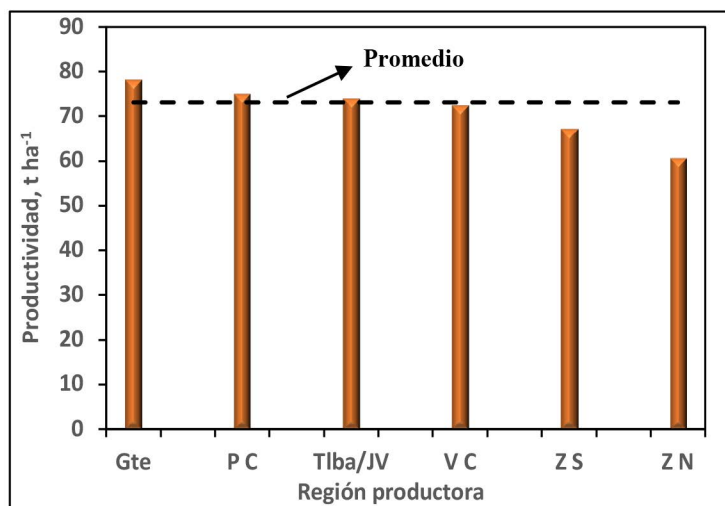


Figura 3. Área sembrada y cosechada, ha, de caña de azúcar según región productora para la zafra 2018-2019.
Figure 3. Planted and harvested area, ha, of sugarcane according to producing region for the 2018-2019 harvest.

En cuanto a la productividad agrícola (t de caña ha^{-1}), el promedio nacional para la zafra 2018-2019 fue de $73.1 t$ de caña ha^{-1} , presentando Gte valores superiores al promedio (**Figura 4**). La menor productividad se determinó en la ZS y ZN, mientras que las restantes regiones presentaron valores muy cercanos al promedio nacional.



La línea segmentada muestra el promedio nacional

Figura 4. Productividad, t caña ha^{-1} , según región productora para la zafra 2018-2019.
Figure 4. Productivity, t sugarcane ha^{-1} , according to producing region for the 2018-2019 harvest.



3.1.2 Relación fertilizante nitrogenado aplicado: productividad

La cantidad de nitrógeno aplicado a las plantaciones comerciales de caña de azúcar varía con la región (**Cuadro 1**), determinándose un rango entre 1.37 y 2.04 kg de N aplicado t⁻¹ caña producida (**Figura 5**).

La diferencia observada en la aplicación del fertilizante nitrogenado entre regiones, de alguna manera refleja las condiciones propias y particulares de cada una en convergencia con los entornos de producción implicados, siendo inducidas básicamente por las condiciones edáficas, la amplitud del piso altitudinal (0-1 550 m s n m) y las propias del clima del lugar, así como también por causa de las variedades sembradas, la fitosanidad y el manejo agronómico diferenciado proporcionado a las plantaciones (**Chaves Solera, 2019a, b, c**).

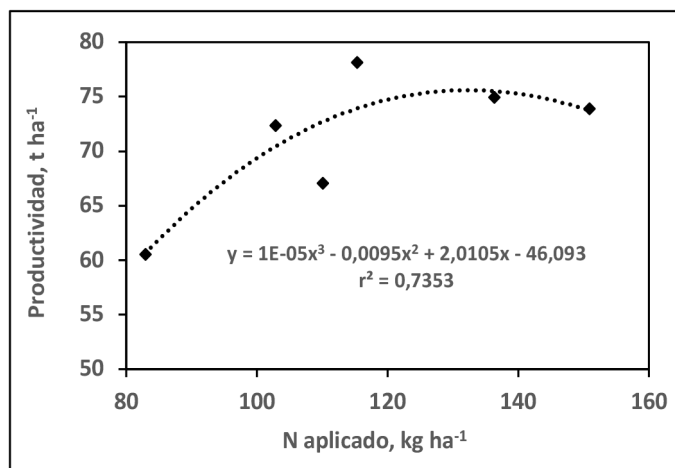


Figura 5. Productividad agrícola, t caña ha⁻¹, según cantidad de nitrógeno aplicado, kg ha⁻¹, en la Zafra 2018-2019.

Figure 5. Productivity, t sugarcane ha⁻¹, according to nitrogen applied, kg ha⁻¹, in the 2018-2019 harvest.

3.1.3. Producción de azúcar

La mayor producción de azúcar (59 %) se genera en Gte, mientras que la menor en Tlba/JV con 4 % del total (**Figura 6**). Las restantes regiones mostraron valores similares, promediando 9 %. El patrón de producción de azúcar observado (**Figura 6**) siguió una tendencia similar a la determinada con el área sembrada/cosechada (**Figura 3**), donde Gte fue la que presentó la mayor área sembrada y cosechada, y las restantes regiones valores inferiores para esas variables.



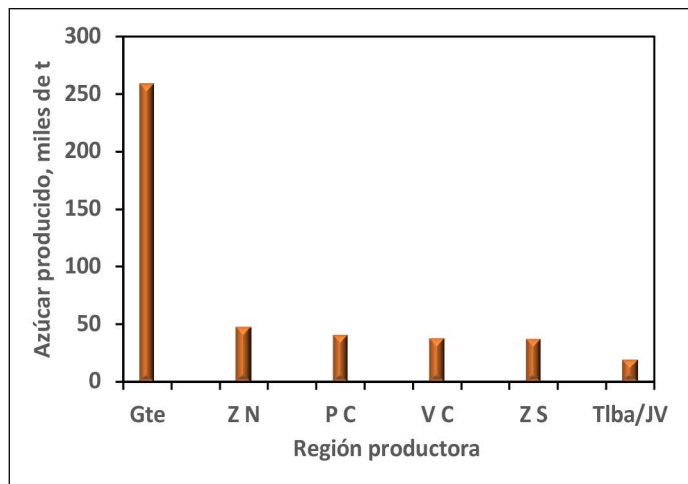


Figura 6. Producción total de azúcar comercial, t, según región productora para la zafra 2018-2019.

Figure 6. Total sugar produced, t, by producing region for the 2018-2019 harvest.

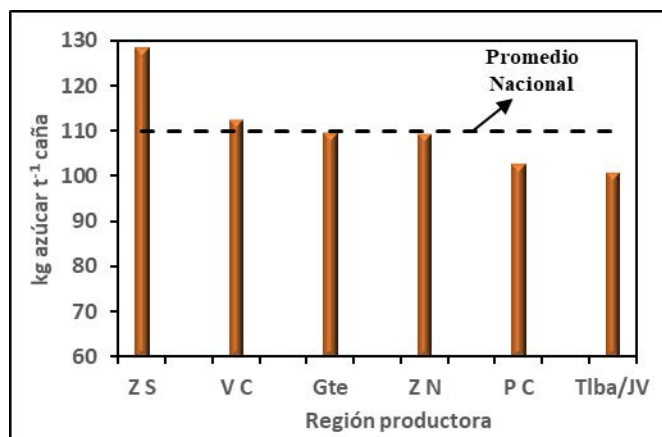
En cuanto al rendimiento industrial (cantidad de sacarosa recuperada por tonelada de caña molida en el ingenio), se determinó que esta variable agrupa las regiones en tres categorías, en la primera con valores muy superiores al promedio nacional se ubicó la Zona Sur. En un segundo nivel, se encuentran el VC, la ZN y Gte con valores intermedios y muy similares al promedio nacional. Adicionalmente, en un tercer grupo se ubicaron el PC y Tlba/JV (**Figura 7**). El promedio nacional para la zafra 2018-2019 fue de 109.8 kg de azúcar t⁻¹ de caña procesada (Chaves Solera, 2019b).

3.2 Aspectos ambientales

3.2.1 Emisión de CO₂eq por fuente

En el desarrollo de la actividad primaria de la caña de azúcar, las principales fuentes de emisión de GEI lo constituyeron la aplicación de fertilizantes nitrogenados (73.6 %), seguido por la práctica de la quema con 13.2 % (**Figura 8**).





La línea segmentada muestra el promedio nacional

Figura 7. Rendimiento industrial, kg de azúcar t⁻¹ de caña, según región productora para la zafra 2018-2019.
Figure 7. Industrial yield, kg of sugar t⁻¹ of sugarcane, according to producing region for the 2018-2019 harvest.

La emisión que se produce por la aplicación de enmiendas correctoras de acidez del suelo representó solamente el 1.6 % del total. Las restantes prácticas de cultivo evaluadas, como fueron la preparación del suelo, labores de mantenimiento, cosecha de plantaciones y transporte de la materia prima, en conjunto totalizaron 11.7 % de las emisiones, con lo que se evidencia que la combustión interna de hidrocarburos (diésel) tiene un peso importante en la contribución a los GEI.



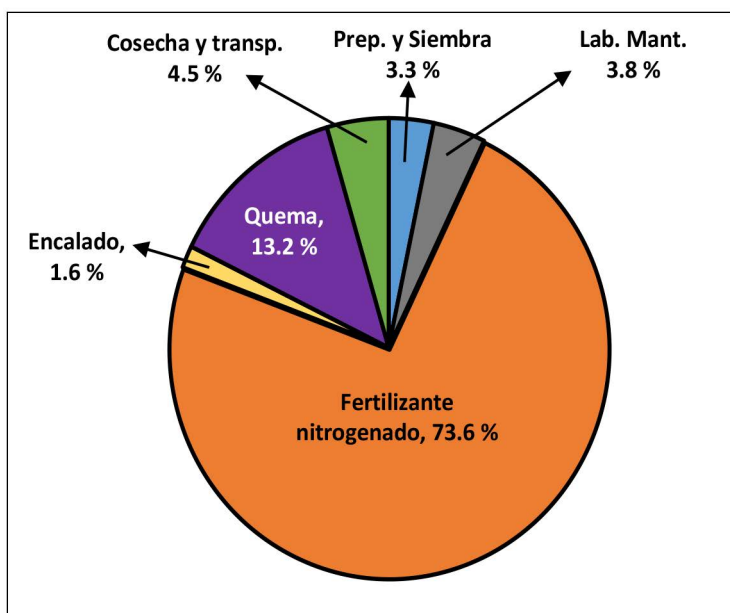


Figura 8. Emisión de CO₂eq, %, según fuente para toda la actividad primaria de la caña de azúcar para la zafra 2018-2019.

Figure 8. CO₂eq emission, %, according to source in sugarcane fields for the 2018-2019 harvest.

De acuerdo con el análisis realizado, las acciones de mitigación que se implementen deben enfocarse y concentrarse prioritariamente en regular y optimizar el uso de los fertilizantes nitrogenados, y procurar la reducción de la práctica de quemar las plantaciones para realizar su cosecha, que de manera conjunta representan el 87 % del total de la emisión identificada en la actividad primaria.

3.2.2 Eficiencia de emisión según componente productivo

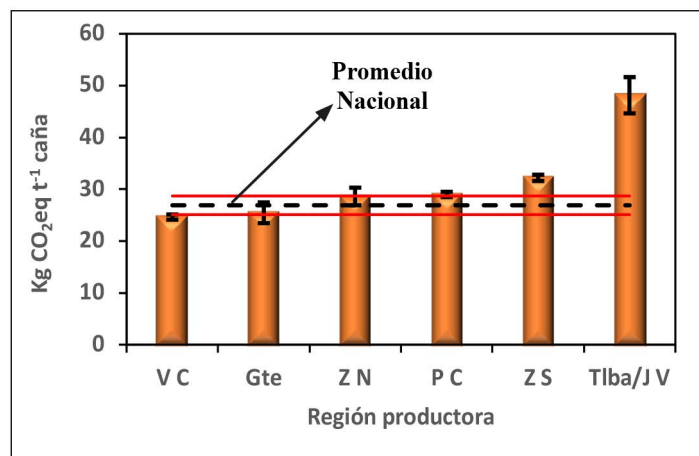
3.2.2.1 Tallos

La cantidad de CO₂eq emitido por unidad de peso de tallos mostró ser de 23.5 kg de diferencia entre la región de menor (14.4 kg) y mayor emisión (33.6 kg) (**Figura 9**). En este sentido, el VC fue la región más eficiente, ya que presenta la menor emisión por tonelada de tallo producido.

Dado que la eficiencia de emisión está fuertemente influenciada por aquella proveniente de la fertilización nitrogenada (**Figura 8**), es importante considerar y tener presente en las inferencias e interpretaciones que se formulen al respecto, que, en las zonas con plantaciones ubicadas



a altitudes superiores a 1 000 m s n m, como sucede con la localidad de Juan Viñas, la dosis de nitrógeno incorporada es por lo general superior por tratarse de ciclos vegetativos bianuales (16-24 meses) y por tanto más prolongados y con mayor producción de biomasa (Calderón Araya, & Chaves Solera, 2020; Chaves Solera, 1999b, 2016a,b, 2017b, 2019a,d).



Las líneas rojas muestran el rango de emisión utilizando la mínima y máxima fertilización nitrogenada, la línea entrecortada el promedio.

Para cada región productora las barras muestran la emisión considerando los rangos de fertilizante nitrogenado. **Figura 9.** Eficiencia de emisión, CO₂eq kg t⁻¹ caña, según región productora para la zafra 2018-2019.

Figure 9. Emission efficiency, kg CO₂eq t⁻¹ sugarcane, according to producing region for the 2018-2019 harvest.

Es interesante observar que, de las seis regiones productoras de caña, Gte presenta valores de emisión similares al rango determinado como promedio nacional, tres (ZN, PC, ZS) son ligeramente superiores, y de las dos restantes, VC presenta un valor muy bajo y Tlba/JV uno muy alto (**Figura 9**).

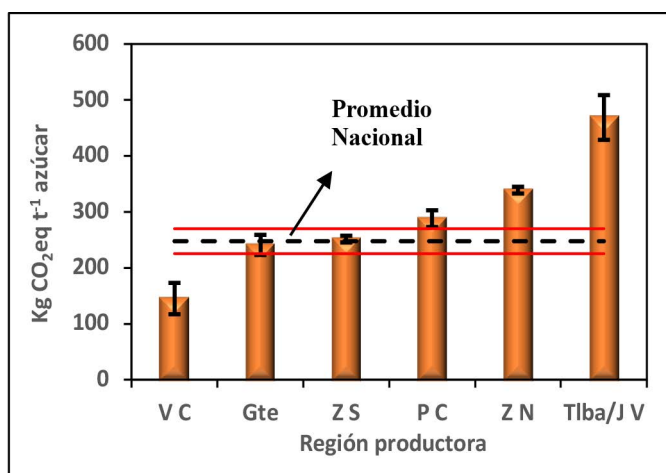
Cuando se incluye en el cálculo de la eficiencia de emisión aquella proveniente de la aplicación del promedio aritmético de la cantidad de fertilizante nitrogenado, el promedio nacional fue 26.9 kg CO₂eq t⁻¹ de caña cosechada (**Figura 9**). Cuando se utilizan la emisión proveniente de las cantidades extremas en la aplicación del fertilizante nitrogenado, el valor promedio de la eficiencia productiva presenta valores mínimos y máximos de 25.1 y 28.7 kg CO₂eq t⁻¹ de caña.



3.2.2.2 Azúcar

La emisión de CO₂eq producida por tonelada de azúcar (**Figura 10**) presenta un patrón similar al determinado con la producción de tallos (**Figura 9**), debido a la relación que existe entre ambas variables, donde la mejor y menor relación se determinó en el VC y la más alta en Tlba/JV.

La cantidad de CO₂eq emitido por tonelada de azúcar evidenció una diferencia muy importante (323.7 kg) entre la región de menor (VC: 144.9 kg) y la de mayor emisión (Tlba/JV: 468.6 kg) (**Figura 10**). Las cuatro regiones restantes, con excepción del PC, presentan valores similares al promedio nacional (**Figura 10**), el cual como se indicó, está influenciado principalmente, por la aplicación de nitrógeno a las plantaciones de caña.



Las líneas rojas muestran el rango de emisión utilizando la mínima y máxima fertilización nitrogenada, la línea entrecortada el promedio.

Para cada región productora las barras muestran la emisión considerando los rangos de fertilizante nitrogenado.

Figura 10. Eficiencia de emisión de CO₂eq t⁻¹ azúcar, según región productora para la zafra 2018-2019.

Figure 10. Emission efficiency, kg CO₂eq t⁻¹ sugar, according to producing region for the 2018-2019 harvest.

De acuerdo con *Herrera et al. (2015)*, y considerando la emisión de GEI obtenida en Brasil (27.2 kg CO₂eq t⁻¹ caña) como valor de referencia para calificar la producción de caña de azúcar, el valor determinado en la presente investigación (26.9 kg CO₂eq t⁻¹ caña producida) es similar al referenciado en ese país. Esto demuestra que la emisión de GEI en Costa Rica en la caña de azúcar, se ubica dentro de un rango que podría ser considerado como de bajo a nivel medio, lo que es ambientalmente satisfactorio, pero puede y debe mejorarse.

La aseveración anterior es apoyada por el hecho de que en diferentes partes del mundo se han determinado valores muy superiores de CO₂eq t⁻¹ caña producida, como acontece en



Australia (77.9 kg, *Renauf et al.*, 2010), Uruguay (47.8 kg, *Herrera et al.*, 2015), Indonesia (24.0 kg, *Gunawan, Romli y Noor*, 2019), India (28.5 kg, *Tsiropoulos et al.*, 2014) e Irán (126.5 kg, *Kaab et al.*, 2019).

Un aspecto común y coincidente de todas esas investigaciones, al igual que lo mencionara claramente *Cardoso Lisboa et al.* (2011), es el hecho de que la fertilización nitrogenada mostró ser una de las mayores fuentes de emisión GEI, lo que denota consistencia en los resultados. Esto también coincide plenamente con lo determinado en la presente investigación, donde la emisión proveniente del fertilizante nitrogenado representó la mayor fuente de emisión y sobre la que, debe actuarse si se desea impactar positivamente el ecosistema desde esta perspectiva.

4. Algunas opciones de mitigación

La caña de azúcar es una especie vegetal excepcional por las características, propiedades y atributos de carácter genético, anatómico y fisiológico que posee, lo cual hace que presente gran potencial de adaptación y resiliencia a condiciones adversas del entorno donde se encuentre cultivada (*Chaves Solera*, 2020b). Por lo anterior y por la continuidad del cultivo aun con los cambios en el clima producidos por el calentamiento global, es importante el tener presente opciones de mitigación, de manera que su cultivo se convierta en parte de la solución de esta problemática global.

Como se demostró, la principal fuente de emisión de GEI en el cultivo de la caña lo constituye la fertilización nitrogenada (73.6 %), razón por la cual es en esta práctica donde se deben enfocar y concentrar prioritariamente los esfuerzos de campo para la mitigación.

En este sentido, una posibilidad para mitigar lo constituye el empleo de fertilizantes de lenta liberación, que permitiría disminuir la gran disponibilidad instantánea de nitrógeno que se presenta cuando se aplican los fertilizantes nitrogenados convencionales, disponibilidad que favorece la formación y liberación a la atmósfera del óxido nitroso como gas.

El fertilizante de lenta liberación, debido a la acción controlada de liberación del nitrógeno al medio, favorece la disponibilidad gradual y limitada del nutrimento en el tiempo, tornando el proceso más congruente con lo que realmente acontece en la naturaleza con su liberación a partir de la mineralización y descomposición de los residuos orgánicos (*Chaves Solera*, 2020d). Además, en teoría, esta propiedad le permite a la planta de caña absorber mayor proporción del nitrógeno incorporado, evitando pérdidas del nutrimento, con lo que se mejoraría la eficiencia de asimilación y utilización del nutriente aplicado, pudiendo esto también con menores dosis incorporadas, traducirse tanto en menos emisión del gas en mención, como también en una significativa disminución de costos al productor tornando la actividad más rentable (*Chaves Solera*, 1999b). Lo anterior ha sido comprobado en banano (*Montenegro et al.*, 2012) y en pasturas (*Montenegro y Herrera*, 2013).

Otra posibilidad que puede ser aplicada para reducir la adición de fertilizantes nitrogenados al suelo, es la utilización de plantas fijadoras de nitrógeno, para lo cual diferentes especies, tanto arbustivas como rastreras tienen esa capacidad (*Chaves Solera*, 2019a, 2020e). En el caso



del cultivo de la caña de azúcar sería recomendable la siembra de especies leguminosas de porte bajo para evitar problemas de competencia por la luz solar. Resultados de la siembra de *Cana- valia ensiformis*, comparado con el manejo de la fertilización tradicional en México, no mostró diferencias significativas en la producción de tallos, tanto en caña planta como en caña soca, ni se observó tampoco desmejora de la calidad del jugo (Córdoba-Gamas *et al.*, 2016). En esto hay que tener presente que, aun utilizando este tipo de plantas siempre ocurre emisión de óxido nítrico, aspecto que además de cuantificar, hay que considerar en cualquier emprendimiento de esta naturaleza que se desarrolle en el país.

De igual forma y en la misma orientación, la utilización de bacterias fijadoras de nitrógeno es otra opción tecnológica que se está actualmente investigando y que podría ser de gran valía para mitigar los GEI en este cultivo, como lo demuestran los trabajos realizados por Taulé *et al.* (2014) en Uruguay.

Por otra parte, la quema es una práctica que representó la segunda fuente de emisión de GEI (13.2 %), por lo que el manejo correcto y técnico de la práctica y la disminución del área donde se realiza tendrá, sin lugar a duda, un impacto favorable muy significativo en la mitigación. Factores institucionales, culturales y económicos asociados con esta ancestral práctica deberán ser solventados para que la reducción del área quemada sea pronto una realidad. Algunas investigaciones han mostrado los beneficios obtenidos en el incremento del carbono del suelo mediante la disminución de las quemas (Montenegro y Chaves Solera, 2019; Sornpoon *et al.*, 2013), lo cual constituye otro factor viable y accesible a considerar con respecto a la reducción o eliminación potencial de esta práctica actualmente regulada, no prohibida, en el país (Chaves Solera, 2021a).

Se deben realizar estudios que demuestren si se está produciendo un cambio en el contenido de carbono del suelo con el tiempo de establecimiento de la plantación de caña, debido a la incorporación sistemática y continua de importantes cantidades de materia orgánica, mayoritariamente hojas durante el desarrollo del cultivo, así como hojas, tallos tiernos (mamones) y cogollo al momento de la cosecha. A lo anterior, debe sumarse el aporte del sistema radical que es reemplazado cada año luego de realizada la cosecha de los tallos. Esta incorporación continua y sistemática de biomasa al suelo debería estar incidiendo positivamente en el sistema, particularmente en el contenido del carbono orgánico del suelo, situación que se debería tener claro en cada una de las regiones productoras, y, en caso positivo, orientarse correctamente para que se convierta en una importante opción de mitigación de muy bajo costo y relativa fácil implementación (Chaves Solera, 1999b, 2020ade).

Las emisiones generadas por la utilización de equipo y maquinaria, tanto para realizar la preparación del suelo, como las labores de mantenimiento propias del cultivo, así como también, para la cosecha y el transporte de la materia prima cortada al ingenio fueron en promedio casi 4 % para cada una de ellas. En este sentido, el empleo de maquinaria eficiente y con motores en buen estado y con buen mantenimiento y afinamiento, dotados de la potencia requerida, son factores que contribuirían a reducir ostensiblemente el consumo de combustible. Tampoco se debe descartar la opción de emplear la bioenergía como el bioetanol o el biodiesel, para ser



utilizados en motores de combustión interna. Esta alternativa contribuiría a mitigar significativamente los GEI generados en esas importantes labores.

Finalmente, la aplicación de enmiendas correctivas de la acidez del suelo mediante encalado representa otra importante fuente de emisión (1.6 %) determinada por el estudio, la cual es tecnológicamente muy importante y casi insustituible para crear y establecer condiciones apropiadas en el suelo, que estimulan y favorecen el desarrollo del sistema radicular y, por ende, del cultivo (Chaves Solera, 2020acd). Por esto, esta práctica se debe optimizar y aplicar estrictamente con criterios técnicos, de manera que los resultados de esta se puedan manifestar en mayores producciones y así ser costo-efectiva, lo cual tendría también un efecto positivo al reducir las emisiones por unidad de caña producida.

5. Conclusiones

Debido a que el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica tiene gran importancia social y económica, los estudios que se realicen para contribuir a su sostenibilidad y su ecoeficiencia son de gran valía y necesidad. En este sentido, el LCA desarrollado contribuyó a identificar cuáles son las fuentes de emisión más significativas en la fase primaria de producción agrícola y, por ende, donde se deben priorizar las medidas y acciones que conduzcan al desarrollo de opciones de mitigación de los GEI en el campo.

La fertilización nitrogenada, principal fuente de emisión, dispone de alternativas tecnológicas viables y factibles de implementar, así como de manejo agronómico potenciales, para que, mediante su correcta adopción e implementación, se pueda mejorar y optimizar la eficiencia de utilización del nutrimento aplicado, con beneficios ambientales cuantificables ligados al cambio climático y la ecoeficiencia.

La eliminación de la quema precosecha de las plantaciones representa una alternativa necesaria de implementar para mitigar con impacto significativo la emisión de GEI, pero se deben evaluar, sin embargo, los factores económicos asociados a dicha medida, así como también el factor cultural intrínseco vinculado, en procura de lograr la disminución sistemática y razonable de la práctica en el tiempo, sin provocar efectos adversos contraproducentes que afecten la estabilidad de la actividad y el sector.

La eficiencia de emisión ($\text{kg CO}_2\text{eq t}^{-1}$ caña) determinada por el estudio es similar o mejor a la reportada por diversas investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo, lo cual sin duda demuestra que la actividad cañera costarricense viene desarrollando una gran labor; sin embargo, de implementarse opciones de mitigación como las referenciadas, mejorarían el potencial para reducir el valor estimado y se podría diferenciar aún más la producción nacional.

Es importante reconocer que el presente estudio es pionero en la materia abordada y procura mostrar un procedimiento de cálculo y estimación de las emisiones asociadas a las distintas prácticas del cultivo.



6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos, y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

7. Referencias

- Abd Rashid, A., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Calderón Araya, G., & Chaves Solera, M. (2020). *Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Turrialba*. LAICA-DIECA. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/LgtmpPwEZTIDQoalVkesZIxqTYKHjwll>
- Cardoso Lisboa, C., Butterbach-Bahl, K., Mauder, M., Kiese, R. (2011). Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – known and unknowns. *GCD Bioenergy*, 3(4), 277-292. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01095.x>
- Castañeda Suárez, J., González Dumar, A., Usma Rojas, C., & Cano Londoño, N. (2017). Análisis de ciclo de vida aplicado a la producción panelera tradicional en Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*, 6(1), 107-122. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.63316>
- Chaves Solera, M. (1999a, setiembre). *La práctica del encalado de los suelos cañeros en Costa Rica*. [Memoria]. Congreso de ATACORI “Randall E. Mora A.”, 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, (pp. 216-223). Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI)
- Chaves Solera, M. (1999b). *El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar*. LAICA-DIECA
- Chaves Solera, M. (2016a, setiembre). *Resultados de investigación con el uso del Nitrógeno en la caña de azúcar en Costa Rica* [Memoria]. Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y El Caribe (ATALAC) y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM), Veracruz, México. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/EttOHvERMSaayRwCQhtZsgJldlyBgJNi>
- Chaves Solera, M. (2016b, octubre). *El nitrógeno como factor de productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica* [Memoria]. Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental, Centro de Conferencias del Hotel Wyndham Herradura, Heredia, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/article/28680>



- Chaves Solera, M. (2017a, agosto). *Taxonomía de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica: Ordenes y Subórdenes presentes* [Memoria]. Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Honduras (ATAHON), San Pedro Sula, Honduras. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/LXqvnqRESYlrocpHUGdilTnlNfNwliEy>
- Chaves Solera, M. (2017b, octubre). *Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica* [Memoria]. Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, Puntarenas, Costa Rica. Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/xznuAsbXHGPzjuDRWFDDwEOtAUrWraua>
- Chaves Solera, M. & Chavarría Soto, E. (2017). *Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica. I. Órdenes de suelo*. LAICA-DIECA. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/bKkHwijyPFkqGFyANxJqzHxCWDaLMdMq>
- Chaves Solera, M. (2019a, octubre). *Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica* [Memoria]. Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/article/AA19B978B5BD0EA0E053E8E1A9C05DDB>
- Chaves Solera, M. (2019b). *Resultado final de la Zafra 2018-2019: un periodo agroindustrial con grandes diferencias y contrastes*. LAICA-DIECA
- Chaves Solera, M. (2019c). Ambiente agroclimático y producción de caña de azúcar en Costa Rica. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 1(18), 5-10.
- Chaves Solera, M. (2019d). Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica) 1(7), 5-6.
- Chaves Solera, M. (2020a). Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo. *Revista Entre Cañeros*, 17, 51-71.
- Chaves Solera, M. (2020b). Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 2(11), 5-14.
- Chaves Solera, M. (2020c). Clima, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 2(18), 8-17.



- Chaves Solera, M. (2020d). Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 2(21), 6-16.
- Chaves Solera, M. (2020e). Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica) 2(22), 5-19, octubre.
- Chaves Solera, M. (2021a). Cuidados y prevenciones con la quema de plantaciones de caña de azúcar. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 3(3), 5-14, febrero.
- Chaves Solera, M. (2021b). Deterioro de las variedades de caña de azúcar de uso comercial en Costa Rica: afectación por clima. *Boletín Agroclimático* (Costa Rica), 3(8), 5-20, abril.
- Córdova-Gamas, G., Salgado-García, S., Castelán-Estrada, M., Palma-López, D., García-Moya, E., Lagunes-Espinoza, L., Córdova-Sánchez, S. (2016). Opciones de fertilización para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 9(3), 27-34.
- Gunawan, T., Romli, M. & Noor, E. (2019). Life cycle assessment of Cane-sugar in Indonesia sugar mill: Energy use and GHG emissions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012059>
- Herrera, I., de la Rúa, C. & Lechón, Y. (2015). *Análisis del ciclo de vida del proceso de transformación de la caña de azúcar para la producción de bioetanol en la planta de Bella Unión de la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR)*. Ministerio de Industria, Energía y Minería, Gobierno de España. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00979.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, 4. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A. & Chau, K. (2019). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. *Science of Total Environment*, 664, 1005-1019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.004>
- Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. (1998). *Ley orgánica de la agricultura e industria de la caña de azúcar N° 7818 del 22 de Setiembre de 1998*. LAICA. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param2=NRTC&nValor1=1&nValor2=44897&strTipM=TC
- Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. (2000). Decreto N° 28665 - MAG. Reglamento Ejecutivo de la Ley Orgánica de la Agricultura e Industria de la Caña de Azúcar N° 7818 de 2 de setiembre de 1998. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=44908&nValor3=101273&strTipM=TC



- Montenegro Ballestero, J., & Chaves Solera, M. (2013). La quema en el cultivo de la caña de azúcar y su impacto en la emisión de gases con efecto invernadero en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12, 35-51. <https://agriperfiles.agri-d.net/display/n240215>
- Montenegro Ballestero, J., & Herrera, J. (2013). Determinación de la emisión de óxido nítrico en pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) bajo pastoreo: Efecto de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12, 9-21. <https://agriperfiles.agri-d.net/display/n251550>
- Montenegro Ballestero, J., Laprade, S., Ortega, R., & Sandoval, J. (2012). *Desarrollo de opciones de mitigación de óxido nítrico en el cultivo de banano: Evaluación de diferentes fuentes nitrogenadas* [Ponencia]. IV Congreso Internacional sobre el Banano, San José.
- Montenegro Ballestero, J., & Chaves Solera, M. (2012). *Estimación de la emisión de óxido nítrico (N₂O) por región productora de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación*. [Ponencia]. V Congreso Tecnológico DIECA, Grecia, Alajuela, Costa Rica.
- Montenegro Ballestero, J., & Chaves Solera, M. (2019). Efecto de la quema en caña de azúcar sobre el carbono de un Andisol. *Revista Alcances Tecnológicos INTA* (Costa Rica). <https://doi.org/10.35486/at.v0i0.185>
- Naciones Unidas (1992). *Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas*. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>
- Novoa-Romero, P., Parra, A., Campoverde, C., & Mendoza, I. (2018). Análisis del ciclo de vida del azúcar: Caso Ecuador. *Revista Inclusiones*, 5, 117-135. <https://revistainclusiones.org/index.php/inclu/article/view/874>
- Renouf, M., Wegener, M. & Pagan R. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 927-937. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0226-x>
- Renouf, M., & Wegener, M. (2007). Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of sugarcane production and processing in Australia. *Proceedings of The Australian Society of Sugar Cane Technologist*, 29, 1-15. https://www.researchgate.net/publication/43479268_Environmental_life_cycle_assessment_LCA_of_sugarcane_production_and_processing_in_Australia
- Sornpoon, W., Bonnet, S., & Garivait, S. (2013). Effect of open burning on soil carbon stock in sugarcane plantation in Thailand. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 7(11), 775-779. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1089004>
- Taulé, C., Mareque, C., Barlocco, C., Hackembruch, F., Sicardi, M., & Battiston, F. (2014). *Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas a caña de azúcar*. INIA. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3914/1/uy24-15462.pdf>





Tsiropoulos, I., Faaij, A., Seabra, J., Lundquist, L., Schenker, U., Brriois, J. & Patel, M. (2014). Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0714-5>

Valerín, C. (2015). *Cálculo y medidas de mitigación de la huella de carbono de la infraestructura urbana de un proyecto de vivienda de interés social* [Tesis Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica]. Sibdi <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/2668>

