



Comparación de los escenarios de emisiones de GEI por combustión móvil y fertilización en un cultivo de caña comercial y orgánica a través de modelos de simulación¹

Lina Marcela Rodríguez², Claudia Marcela Lubo³,
Julieth Abadía⁴, Óscar Orozco⁵, Andrés López⁶, Gonzalo Llano⁷

Comparison of GHG emissions scenarios from fossil combustion and fertilization in commercial and organic sugar cane crops through simulation models

Comparação dos cenários de emissões de GEI por combustão móvel e fertilização em um cultivo de cana comercial e orgânica através de modelos de simulação

RESUMEN

Introducción. La combustión móvil y la descomposición de los fertilizantes en el suelo son las fuentes principales de emisiones de gases de efecto invernadero en los cultivos de caña de azúcar. **Objetivo.** Realizar un análisis comparativo de escenarios de huella de carbono en un cultivo de caña de azúcar comercial y orgánica. **Materiales y métodos.** La huella de carbono se calculó de acuerdo con las directrices del IPCC; la proyección

¹ Artículo derivado de proyecto de investigación “Comparación de los escenarios de emisiones de GEI por combustión móvil y fertilización en un cultivo de caña comercial y orgánica” realizado entre abril de 2015 y agosto de 2016 en el Valle Geográfico del río Cauca, financiado por Colciencias

² Ingeniera Industrial. MSc. Asistente de Investigación. Grupo ICUBO, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0003-4010-857X

³ Ingeniera Industrial. MSc. Asistente de Investigación. Grupo ICUBO, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0003-1483-1123

⁴ Química. Msc (C). Asistente de Investigación. Grupo ICUBO, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0001-7991-4494

⁵ Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. MSc. Joven investigador. Grupo I2T, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0002-6944-4529

⁶ Administrador de empresas. PhD (c). Director de la investigación. Grupo ICUBO, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0002-7108-1034

⁷ Ingeniero eléctrico y electricista. PhD. Aliado a la investigación. Grupo I2T, Universidad Icesi, Valle del Cauca, Colombia ORCID: 0000-0001-7231-9510

de las emisiones se obtuvo a través de la dinámica de sistemas y las oportunidades de reducción de gases por medio de análisis de sensibilidad. **Resultados.** El primer modelo de simulación de emisiones de CO_2 , a partir de la combustión móvil, permite evidenciar un nivel de 1,87 t de CO_2 -eq / ha, en un cultivo comercial y 1,67 t de CO_2 -eq / ha, en un cultivo orgánico, proyectados a 25 años. El segundo modelo de simulación de emisiones de N_2O por descomposición de los fertilizantes en el suelo alcanzó un nivel de 6,18 t de CO_2 -eq / ha, en un cultivo comercial y 4,62 t de CO_2 -eq / ha, en un cultivo orgánico, simulados a 5 años. **Conclusión.** La adopción de prácticas agrícolas

específicas por zona agroecológica representa una oportunidad de reducción de emisiones de CO_2 , correspondiente a 31 % para el cultivo comercial, y 0,49 % para el cultivo orgánico. Asimismo, una adecuada aplicación de fertilizantes de acuerdo con las características del suelo y el ciclo de cosecha del cultivo contribuye a una reducción en las emisiones de N_2O de máximo el 40 % para el cultivo comercial, y 25 % para el orgánico.

Palabras clave: emisiones de dióxido de carbono, emisiones de óxido nitroso, modelación dinámica, huella de carbono, cultivo de caña de azúcar.

ABSTRACT

Introduction. Fossil combustion and fertilizer decomposition are the main sources of greenhouse gas emissions in sugarcane crops. **Objective.** Perform a comparative analysis of Carbon Footprint scenarios in commercial and organic sugarcane crops. **Materials and Methods.** Carbon Footprint was calculated based on IPCC Guidelines; emission projections were obtained through system dynamics and the opportunities for emissions reductions were obtained with sensitivity analysis. **Results.** The first CO_2 emission model for fossil combustion obtained a level of 1.87 t CO_2 -eq/ha in a commercial crop and 1.67 t CO_2 -eq/ha in an organic crop, projected for 25 years. The second N_2O emissions model for fertilizer

decomposition achieved a level of 6.18 t CO_2 -eq/ha in a commercial crop and 4.62 t CO_2 -eq/ha in an organic crop, simulated for 5 years. **Conclusion.** The adoption of specific agricultural practices in each agro-ecological zone represents an opportunity to reduce CO_2 emissions, which corresponds to 31% for commercial crop and 0.49% for organic crop. A proper fertilizer application according to soil characteristics and the crop's harvest cycle contributes to reducing N_2O emissions by up to 40% for commercial crop and 25% for organic crop.

Key words: carbon dioxide emissions, nitrous oxide emissions, dynamic modeling, carbon footprint, sugarcane crop.

RESUMO

Introdução. A combustão móvel e a decomposição dos fertilizantes no solo são as fontes principais de emissões de gases de efeito estufa nos cultivos de cana de açúcar. **Objetivo.** Realizar uma análise comparativa de cenários de rastros de carbono num cultivo de cana de açúcar comercial e orgânica. **Materiais e métodos.** O rastro de carbono se calculou de acordo com as diretrizes do IPCC; a projeção das emissões se obteve através da dinâmica de sistemas e as oportunidades de redução de gases por meio de análise de sensibilidade. **Resultados.** O primeiro modelo de simulação de emissões de CO_2 , a partir da combustão móvel, permite evidenciar um nível de 1,87 t de CO_2 -eq / ha, num cultivo comercial e 1,67 t de CO_2 -eq / ha, num cultivo orgânico, projetados a 25 anos. O segundo modelo de simulação de

emissões de N_2O por decomposição dos fertilizantes no solo alcançou um nível de 6,18 t de CO_2 -eq / ha, num cultivo comercial e 4,62 t de CO_2 -eq / ha, num cultivo orgânico, simulados a 5 anos. **Conclusão.** A adoção de práticas agrícolas específicas por zona agroecológica representa uma oportunidade de redução de emissões de CO_2 , correspondente a 31 % para o cultivo comercial, e 0,49 % para o cultivo orgânico. Assim mesmo, uma adequada aplicação de fertilizantes de acordo com as características do solo e o ciclo de colheita do cultivo contribui a uma redução nas emissões de N_2O de máximo 40 % para o cultivo comercial, e 25 % para o orgânico.

Palavras chave: emissões de dióxido de carbono, emissões de óxido nitroso, modelação dinâmica, rastro de carbono, cultivo de cana de açúcar.

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola es considerado uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero (GEI), ya que contribuye con el 74 % al 80 % de las emisiones antropogénicas de N_2O en Colombia y el mundo (FAO, 2015). Las principales fuentes provienen del suelo por la descomposición de los fertilizantes nitrogenados, residuos de los cultivos, así como de la quema de biomasa y la gestión del estiércol. Uno de los principales GEI es el óxido nitroso, el cual proviene principalmente de la descomposición en el suelo de los fertilizantes nitrogenados y la gestión del estiércol (Scheer et al., 2014) although it tended to overestimate seasonal fluxes during the cotton season. DayCent accurately predicted soil moisture dynamics and the timing and magnitude of high fluxes associated with fertilizer additions and irrigation events. At the daily scale we found a good correlation of predicted vs. measured N_2O fluxes ($r^2 = 0.52$). En suborden, el metano (CH_4) es considerado el segundo GEI, producido principalmente en el proceso digestivo de los rumiantes y en la descomposición de la materia orgánica en los cultivos y potreros de pastoreo (Denmead et al., 2010) that research has been mostly short-term. This paper describes recent work aimed at quantifying exchanges of CH_4 and N_2O from fertilised sugarcane soils over whole growing seasons. Micrometeorological and chamber techniques provided continuous measurements of gas emissions in whole-of-season studies in a burnt-cane crop on an acid sulfate soil (ASS). Finalmente, el dióxido de carbono (CO_2) es liberado al ambiente por la combustión móvil y la descomposición de fertilizante ureico durante el proceso de mineralización en el suelo (Andres et al., 2012).

Dado el nivel de impacto de las emisiones de GEI al fenómeno de cambio climático, provenientes principalmente de los procesos de fermentación entérica y actividad agrícola, se diseñó una herramienta para modelar escenarios del comportamiento de tales emisiones y, así, proponer oportunidades de reducción a partir de pruebas de análisis de sensibilidad. De esta forma, se siguió la metodología de dinámica de sistemas (Sterman, 2002) the tendency for well-intentioned interventions to be defeated by the response of the system to the intervention itself. The field of system dynamics, created at MIT in the 1950s by Jay Forrester, is designed to help us learn about the structure and dynamics of the complex systems in which we are embedded, design high-leverage policies for sustained improvement, and catalyze successful implementation and change. Drawing on

engineering control theory and the modern theory of nonlinear dynamical systems, system dynamics often involves the development of formal models and management flight simulators to capture complex dynamics, and to create an environment for learning and policy design. Unlike pure engineering problems if any exist human systems present unique challenges, including long time horizons, issues that cross disciplinary boundaries, the need to develop reliable models of human behavior, and the great difficulty of experimental testing. Successful change in social systems also requires the active participation of a wide range of people in the modeling and policy design process, people who often lack technical training. In this paper I discuss requirements for the effective use of system dynamics and illustrate with a successful application to a difficult business issue. en la que se desarrollaron diagramas de causales e hipótesis dinámicas como base fundamental de los modelos de Forrester (flujos y niveles), haciendo uso del software licenciado Vensim PLE x32®.

El trabajo tuvo como propósito presentar un análisis comparativo de emisiones de GEI a partir de dos fuentes de emisión: combustión móvil y fertilización agrícola. Se consideraron dos tipos de cultivo en el ciclo de cosecha soca: cultivo de manejo comercial propio de un ingenio azucarero y un cultivo de manejo orgánico perteneciente a una hacienda panelera, ambos ubicados en el departamento de Valle del Cauca. A diferencia de los cultivos orgánicos pertenecientes a los ingenios de producción convencional, este tipo de cultivo tiene como base fundamental el manejo de una agricultura de conservación (Knowler & Bradshaw, 2007). Este tipo de agricultura se compone de un sistema de prácticas agrícolas que procuran la menor perturbación posible del suelo y la acumulación de una cobertura de residuos de caña sobre su superficie, en pro de una producción más limpia a partir de la conservación, mejora y uso eficiente de los recursos naturales, sin la utilización de fertilizantes ni herbicidas, y el uso de prácticas de control manuales con ganado bovino, así como el corte en verde, conservando elevados niveles de producción en períodos de tiempo más largos.

Dentro de los límites de la investigación conviene mencionar que se abarcaron los procesos de preparación de suelos y levante de los cultivos de caña de azúcar, con el fin de sentar las bases para el desarrollo de una herramienta sistémica que permita evaluar la interacción de las emisiones no solo en la etapa de campo, sino, a su vez, integrar todas las

etapas productivas del sector azucarero, así como la adaptación de futuras herramientas a los procesos productivos de otros sectores agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones de los modelos de simulación

Modelo de emisiones de CO₂ por combustión móvil

En primer lugar, se desarrolló un modelo dinámico para proyectar las emisiones de CO₂ en el largo plazo, es decir, a 25 años, haciendo referencia al plazo promedio de proyección de las emisiones en el ámbito mundial. Esta modelación se realizó tanto para un cultivo de caña comercial de un ingenio azucarero como para un cultivo orgánico de una hacienda panelera de producción agro-silvopastoril. A continuación, se describen las condiciones particulares de cada suerte en estudio, las cuales, a pesar de encontrarse en la misma zona geográfica del valle geográfico del río Cauca, presentan diferencias en sus procesos mecánicos de preparación de suelos y levante de los cultivos.

Para el caso de la caña de azúcar comercial se tuvo en cuenta un ciclo de renovación de suelos correspondiente a 5 años, dado que este es el promedio nacional estipulado para los cultivos de los ingenios azucareros tradicionales. A partir de los 6 tipos de preparación de suelos (TPS) manejados por el ingenio en estudio, se consideró, para la simulación base, el TPS de mayor representatividad, es decir, Convencional I. Finalmente, se consideró la zonificación agroecológica perteneciente a la suerte en estudio, como es la ZAE 6HI, la cual, a su vez, se encuentra en el primero de los nueve grandes grupos de preparación de suelos de Cenicaña (Carbonell et al., 2011).

A diferencia de las condiciones de modelación descritas para el cultivo de caña comercial, el cultivo orgánico se encuentra dentro de un sistema de producción agro-silvopastoril, en el cual el ciclo de renovación de suelos es más extenso, correspondiente a 27 cortes en promedio por cada suerte. En este caso se puede evidenciar que la mayoría de tipos de preparación de suelos se realiza en socas, y solo ingresa maquinaria para la incorporación de materia orgánica en suelo. Cada vez que se requiere preparar una plantilla, la hacienda en estudio subcontrata maquinaria para realizar principalmente la labor de subsolada. Sin embargo, el resto de labores se realiza de forma manual. En cuanto al tipo de zonificación

agroecológica de la suerte en estudio, se tuvieron en cuenta las condiciones de la ZAE 10H3, perteneciente al segundo de los nueve grandes grupos de preparación de suelos de Cenicaña (Carbonell et al., 2011).

Modelo de emisiones de N₂O por fertilización

En segundo lugar, se desarrolló otro tipo de modelo dinámico para proyectar las emisiones de N₂O, pero en el corto plazo, es decir, a 60 meses o 5 años, dado que sobre la base de la dinámica del ciclo del nitrógeno, las reacciones suceden en períodos cortos de días y máximo en meses y, por tanto, no se podría evidenciar una dinámica en el largo plazo si se llegase a proyectar las emisiones a 25 años, como en el caso de las emisiones generadas por la maquinaria agrícola. Asimismo, este modelo se desarrolló tanto para el cultivo comercial como para el orgánico. Ambos casos se basaron en la dinámica del ciclo del nitrógeno como se mencionó previamente y se tuvo en cuenta, además, el % de nitrógeno contenido en cada uno de los fertilizantes, el cual se obtuvo de forma experimental en laboratorios propios del ingenio y la hacienda en estudio. Igualmente, se obtuvieron las tasas de absorción de nitrógeno por parte de la planta de caña en cada una de las etapas de crecimiento y desarrollo (germinación, crecimiento, formación y maduración), brindados por personal de Cenicaña, para estudio interno de la presente investigación.

La diferenciación de las condiciones del modelo depende principalmente de la edad de la caña y el tipo de suelo. Un cultivo de caña comercial dura en promedio 12 meses, mientras que un cultivo orgánico dura en promedio 14 meses, dada una mínima utilización de maquinaria agrícola y un mayor uso de prácticas agrícolas manuales que interactúan en un sistema agro-silvopastoril de producción más lenta, además del uso de ganado ovino en procesos de control de arvenses, en lugar de la utilización de procesos mecánicos y aplicación de herbicidas.

Por otro lado, estudios del laboratorio de suelos de Cenicaña, en muestras recolectadas en cada una de las suertes en estudio, reportaron que la suerte de caña comercial posee un suelo franco-arcilloso con 31,4 % de arena, 31 % de arcilla y 37,6 % de limo, y un contenido de materia orgánica (MO) de 3,05 %; por su parte, la suerte de caña orgánica posee un suelo arcilloso compuesto de 31,4 % de arena, 41 % de arcilla y 27,6 % de limo, y un contenido de MO de 2,76 %. Este tipo de análisis permite establecer las

cantidades adecuadas de fertilización y el contenido de nitrógeno que requiere cada tipo de cultivo y que permite obtener una mayor eficiencia en términos económicos, productivos y ambientales, como se analizará en mayor detalle en la sesión de resultados y discusión.

En la figura 1 se puede observar las labores agrícolas y el tipo de fertilizantes aplicados sobre el cultivo de caña de azúcar comercial y orgánica, así como el tipo de emisión de GEI generada en cada uno de los procesos modelados.

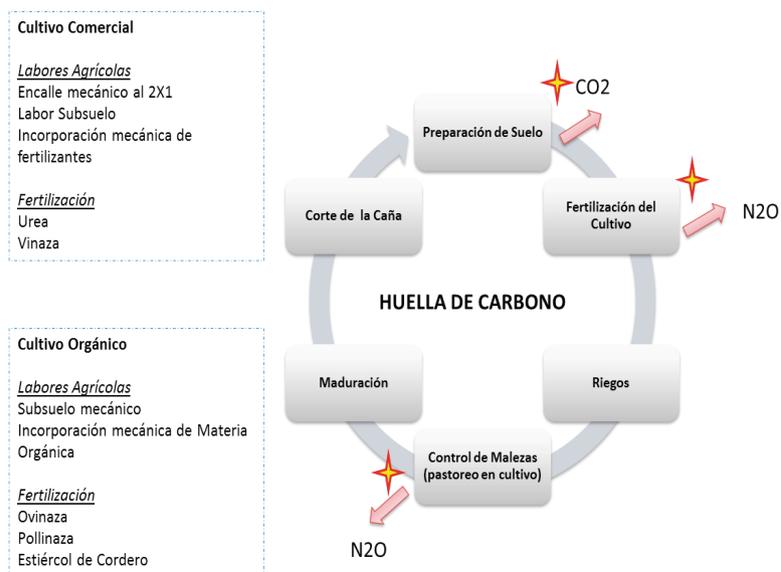


Figura 1. Labores agrícolas, fertilización y emisiones de GEI

global del CO₂,

Donde:

$Combustible_j$ = Cantidad consumida del combustible j ; EF_j = Factor de emisión del combustible j ; PC_j = Poder calorífico del combustible j ; PCG_{CO_2} = Potencial de calentamiento global del CO₂.

Ecuaciones de cálculo de la huella de carbono

Cálculo de las emisiones de CO₂

El cálculo de las emisiones de CO₂ por combustión móvil se desarrolló de acuerdo con el segundo volumen de las directrices del IPCC de 2006 (Waldron et al., 2006).

La ecuación 1 permite calcular las emisiones de CO₂, que dependen del producto entre el combustible diésel colombiano, establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), por el factor de emisión y el poder calorífico de este tipo de combustible, así como del potencial de calentamiento

Por otro lado, en la ecuación 2 se presenta el cálculo de las emisiones de CO₂ debidas a la descomposición de urea en los cultivos de caña, según los lineamientos del IPCC 2006 (De Klein et al., 2006), la cual depende de la cantidad de urea anual aplicada por el factor de emisión de CO₂.

Donde:

$$Emisiones\ de\ CO_2 = \left[\sum_j (Combustible_j \times EF_j \times PC_j) \right] \times PCG_{CO_2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Emisiones de CO_2-C = emisiones anuales de C por aplicación de urea; M = cantidad anual de fertilización con urea; EF = Factor de emisión de CO_2 .

Adicional al cálculo teórico del IPCC, en la modelación se consideró un contenido de 46 % de nitrógeno que posee la urea y, por tanto, genera un aporte

significativo en términos de emisiones de N_2O .

Cálculo de las emisiones de N_2O

El cálculo de las emisiones de N_2O por descomposición de los fertilizantes nitrogenados en el suelo, como la vinaza, la ovinaza y la pollinaza, se basó en el cuarto

$$CO_2 - C \text{ Emisión} = M \times EF \quad \text{Ecuación 2}$$

volumen de las directrices del IPCC 2006 (De Klein et al., 2006).

En la ecuación 3 se describen las emisiones directas provenientes del proceso de mineralización en suelo:

Donde:

$N_2O_{(Directas)}-N$ = emisiones directas anuales de N_2O-N producidas a partir de suelos gestionados; F_{SN} = cantidad

anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos; F_{ON} = cantidad anual de compost y otros agregados de N orgánico aplicado a los suelos; EF = factor de emisión de las emisiones de N_2O de aportes de N.

En la ecuación 4 se presentan las emisiones indirectas por pérdidas de N por medio del proceso de volatilización ocurrido en el suelo, mientras que en la ecuación 5 se presentan las emisiones indirectas por medio del proceso de lixiviación en el suelo. Se tuvieron en cuenta los porcentajes de volatilización y lixiviación brindados por el IPCC, así como los

$$N_2O_{(Directas)} - N = [(F_{SN}) + (F_{ON})] \times EF \quad \text{Ecuación 3}$$

factores de emisión de estos, dado que su medición experimental se encuentra por fuera del alcance del presente modelo.

Donde:

$N_2O_{(ATD)}-N$ = cantidad anual de N_2O-N producida por deposición atmosférica de N volatilizado de suelos

gestionados; F_{SN} = cantidad anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos; $Frac_{GASF}$ = fracción de N de fertilizantes sintéticos que se volatiliza; F_{ON} = cantidad anual de compost y otros agregados de N orgánico aplicado a los suelos; $Frac_{GASM}$ = fracción de fertilizantes de N orgánico que se volatiliza; EF = factor de emisión de las emisiones de N_2O de deposición atmosférica de N en los suelos.

Donde:

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} \times Frac_{GASF}) + (F_{ON} \times Frac_{GASM})] \times EF \quad \text{Ecuación 4}$$

$N_2O_{(L)}-N$ = cantidad anual de N_2O-N producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de N a los suelos gestionados; F_{SN} = cantidad anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos en regiones donde se produce lixiviación; F_{ON} = cantidad anual de compost y otros

agregados de N orgánico aplicado a suelos en regiones donde se produce lixiviación; $Frac_{LIXIVIACIÓN-(H)}$ = fracción de todo el N agregado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación; EF = factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento de N.

$$N_2O_{(L)} - N = (F_{SN} + F_{ON}) \times Frac_{LIXIVIACIÓN-(H)} \times EF \quad \text{Ecuación 5}$$

Por otro lado, en el caso del cultivo orgánico al cual ingresan en promedio 53 corderos por hectárea para realizar el control de malezas de la caña, es necesario tener en cuenta que el estiércol generado por el ovino también genera emisiones de N_2O a la atmósfera, y por tanto, su cálculo se desarrolló de acuerdo con las ecuaciones 3, 4 y 5. Adicionalmente, se tuvo en cuenta un valor por defecto para la tasa de excreción de N brindado por el IPCC, de acuerdo con el peso del animal (27 kg en promedio), así como el factor de emisión de N_2O proveniente del ganado ovino (De Klein et al., 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cultivo de caña comercial

Simulación base de las emisiones de CO_2

En primer lugar, se desarrolló la proyección de las emisiones acumuladas de CO_2 según un período de simulación de 25 años. En este caso, las labores mecánicas de preparación de suelos alcanzaron un nivel de emisiones correspondiente a 1,02 t de CO_2 -eq / ha, a partir del cual el 76 % de las emisiones corresponde a la preparación del suelo en el ciclo de cosecha tipo plantilla, y el 24 % de estas a la preparación del suelo en el estado tipo soca. Mientras que las labores mecánicas de levante del cultivo alcanzaron un valor de 0,85 t de CO_2 -eq / ha.

Análisis de sensibilidad de reducción de las emisiones de CO_2

Con el fin de obtener una reducción en las emisiones de CO_2 por combustión móvil, generadas principalmente por la preparación del suelo en el ciclo de cosecha tipo plantilla, como se observó en la simulación base, se desarrolló un análisis de sensibilidad modificando el tipo de preparación de suelo de convencional I a

liviana I, según recomendaciones de labores agrícolas para la ZAE 6HI; esto permitió obtener una reducción del 31 % en las emisiones (0,32 t de CO_2 -eq / ha), lo cual permitió alcanzar un nivel en las emisiones de 0,69 t de CO_2 -eq / ha.

Simulación base de las emisiones de N_2O

En segundo lugar, se desarrolló la proyección de las emisiones acumuladas de N_2O según un período de simulación de 60 meses, como se explicó previamente en las condiciones del modelo. La descomposición del fertilizante ureico más el fertilizante nitrogenado vinaza, aplicados al cultivo, dio como resultado un nivel de emisiones correspondiente a 6,18 t de CO_2 -eq / ha.

Análisis de sensibilidad de reducción de las emisiones de N_2O

Con el propósito de reducir la huella de carbono generada por el proceso de fertilización, se evaluó un primer análisis de sensibilidad en el que se fraccionó la dosis de fertilización actual a los 30 y 60 días después de la siembra o corte de la caña anterior. Esta estrategia puede ser positiva en términos de eficiencia y productividad, dado que al realizar la aplicación de las dosis de fertilizantes en dos tiempos y durante los dos primeros meses de la caña, se favorece el crecimiento de la planta y engrosamiento del tallo. Sin embargo, al realizar el primer análisis de sensibilidad no se obtuvo una solución positiva en términos de reducción de emisiones, uno de los principales objetivos a abarcar en este estudio.

Por tanto, se decidió evaluar un segundo y tercer análisis de sensibilidad en los cuales se consideró la frecuencia de aplicación de las dosis de fertilización según lo requerido en el ciclo de cosecha del cultivo. Dado que, a mayor número de cortes, mayor es el requerimiento de nitrógeno en el suelo, en el caso

de las socas se recomienda realizar la mayor parte de la aplicación a los 30 días después del corte de la caña. Adicionalmente, se consideraron las dosis recomendadas según las características del suelo en estudio (franco-arcilloso), el cual posee un contenido medio de materia orgánica de 3,05 %, obtenido en el laboratorio de suelos. Este análisis de sensibilidad se desarrolló fraccionando en dos tiempos de aplicación las dosis recomendadas por Cenicaña y utilizadas en un estudio de Guatemala (Pérez, 2001), pero teniendo en cuenta una mayor aplicación de fertilizante nitrogenado a los 30 ddc o dds. Para efectos del estudio, en el que solo se está trabajando con una soca (primer ciclo), se desarrollaron dos análisis de sensibilidad en los que se consideró la aplicación de las dosis mínima y máxima de fertilizante (90 y 130 kg de N/ha, respectivamente); además, se tuvo en cuenta una cantidad máxima de urea de 50 kg N / ha. De esta forma, al considerar una dosis mínima de fertilización, se obtuvo una reducción del 39 % de las emisiones de GEI, obteniendo así una huella de carbono equivalente a 3,77 t de CO₂-eq / ha. Por otro lado, al tener en cuenta la dosis máxima de fertilización recomendada, la cual sería frecuentemente aplicada por los ingenios

en búsqueda de mayor productividad, se alcanza una reducción de las emisiones de GEI en un 27 %, y por tanto un nivel de huella de carbono de 4,51 t de CO₂-eq / ha.

En la figura 2 se presenta el comportamiento de la huella de carbono base y reducida después del segundo y tercer análisis de sensibilidad descritos previamente.

Figura 2. Oportunidad de reducción de las emisiones de GEI en el cultivo comercial

t CO₂-eq/ha

Por otro lado, en la tabla I se puede observar de forma resumida el nivel de emisiones acumuladas de CO₂ por combustión móvil y N₂O por fertilización en el cultivo de caña comercial, así como el nivel reducido de emisiones después de la evaluación de escenarios desarrollada por medio de análisis de sensibilidad.

Tabla I. Emisiones de GEI y oportunidades de reducción en el cultivo de caña comercial

| Cultivo de caña comercial | | | |
|--|-----------------|--|---|
| Labores mecánicas | | Emisiones acumuladas de CO ₂ a LP (t CO ₂ -eq/ha) | Oportunidades de Reducción (t CO ₂ -eq/ha) |
| Labores mecánicas de preparación de suelos | Plantilla Soca | 0,78 0,23 | 0,69 (31%) |
| Labores mecánicas de levante del cultivo | | 0,85 | |
| Fertilización | | Emisiones acumuladas de N ₂ O a CP (t CO ₂ -eq/ha) | Oportunidades de reducción (t CO ₂ -eq/ha) |
| Descomposición de urea y vinaza | Cantidad mínima | 6,18 | 2,41 (39 %) |
| | Cantidad máxima | | 1,67 (27 %) |

Cultivo de caña de azúcar orgánica

Simulación base de las emisiones de CO₂

La proyección de emisiones acumuladas de CO₂ por combustión móvil permitió evidenciar un aporte de 1,63 t de CO₂-eq / ha, por parte de las labores mecánicas de levante del cultivo, mientras que las labores mecánicas de preparación de suelos tan solo alcanzaron un nivel de 0,04 t de CO₂-eq / ha, a partir del cual el 75 % de las emisiones corresponde a la preparación de las plantillas, y el 25 % restante, a la preparación de las socas. Al comparar los resultados con respecto a los escenarios de emisiones de CO₂ del cultivo comercial se observó que, en este caso, el nivel de emisiones por preparación de suelos es menor con respecto a las emisiones de levante del cultivo. Este resultado se debe, en gran parte, a que el principal aporte a las emisiones proviene de la preparación de las plantillas; sin embargo, el proceso de renovación de suelos ocurre cada 27 cortes en la que se subcontrata maquinaria para estas labores y anualmente tan solo se requiere maquinaria para el transporte de los fertilizantes orgánicos, dado que la mayor parte de labores se realiza de forma manual.

Análisis de sensibilidad de reducción de las emisiones de CO₂

Igualmente, con el fin de obtener una reducción en las emisiones de CO₂ por combustión móvil provenientes principalmente de la preparación del suelo en el ciclo de cosecha tipo plantilla, se desarrolló el mismo análisis de sensibilidad considerado para el cultivo comercial, es decir, modificando el tipo de preparación de suelo de convencional I a liviano I, el cual también es el recomendado para la ZAE 10H3 en estudio. Sin embargo, en este caso tan solo se observó una reducción en las emisiones correspondiente al 0,49 % (0,008 t de CO₂-eq / ha), lo cual permite alcanzar un nivel en las emisiones de 0,032 t de CO₂-eq / ha proveniente de la preparación de suelos. Este resultado se debió principalmente a que en el cultivo de caña orgánica no existe una diferenciación significativa entre los tipos de preparación de suelos, debido a que se realizan pocas labores mecánicas y tan solo varía el número de pases por labor. **En cuanto a las labores de levante de cultivo no es posible proponer una reducción, dado que las emisiones solo dependen del transporte de los fertilizantes como se mencionó previamente, y la mayor parte de labores se realiza de forma manual, como el encalle de residuos, el repique de brotes**

altos, la resiembra, la aplicación de fertilizantes, hasta el control de malezas por medio del ingreso de ganado ovino al cultivo

Simulación base de las emisiones de N₂O

La proyección de las emisiones acumuladas de N₂O alcanzó un nivel de 4,62 t de CO₂-eq / ha, en un período de simulación de 60 meses, producto de la descomposición de los fertilizantes nitrogenados pollinaza y ovinaza más el estiércol de ovino que entra al cultivo para realizar el proceso de control de malezas.

Análisis de sensibilidad de reducción de las emisiones de N₂O

Igualmente, con el fin de reducir el nivel de emisiones de GEI generado durante el proceso de descomposición de los fertilizantes en el suelo, se hizo inicialmente el mismo análisis de sensibilidad descrito previamente para el cultivo de caña comercial, el cual permitió obtener una respuesta similar en la que no se logra una solución positiva al problema de reducción de emisiones.

Por tanto, se adelantó de la misma manera, un segundo y tercer análisis de sensibilidad en los que se consideraron las recomendaciones de dosis según el ciclo de cosecha del cultivo y las características de un suelo con contenido bajo de materia orgánica. En este caso se presentó un tipo de suelo arcilloso que, a su vez, requiere un contenido mayor de nitrógeno con respecto al cultivo comercial debido al contenido de materia orgánica bajo de 2,76 % obtenido en el laboratorio de suelos. A diferencia del cultivo comercial, en el segundo análisis de sensibilidad se consideró una dosis mínima de fertilizante correspondiente a 100 kg N / ha, y en el tercer análisis de sensibilidad se analizaron las emisiones a partir de la aplicación de una dosis máxima de 150 kg N/ha. De esta manera, al considerar la dosis mínima se tuvo una reducción del 24,2 % obteniendo así un nivel de 3,51 t de CO₂-eq / ha, y al tener en cuenta la dosis máxima recomendada, se alcanzó una reducción del 3,7 %, para una huella de carbono de 4,45 t de CO₂-eq / ha. En este caso, al considerar la dosis máxima de aplicación la reducción no es significativa, dado que actualmente aplican una dosis similar a la limitante, lo que indica que se encuentran dentro del límite máximo permitido, a diferencia del cultivo

comercial que sí supera significativamente el límite y, por tanto, la propuesta de reducción genera mayor impacto. Además, cabe mencionar que el estiércol de bovino que ingresa al cultivo no se modificó para el análisis de escenarios, dado que esta es una acción no controlable en el campo.

En la figura 3 se puede observar el comportamiento de las emisiones de N₂O en la simulación **base** y el segundo y tercer análisis de sensibilidad descrito anteriormente.

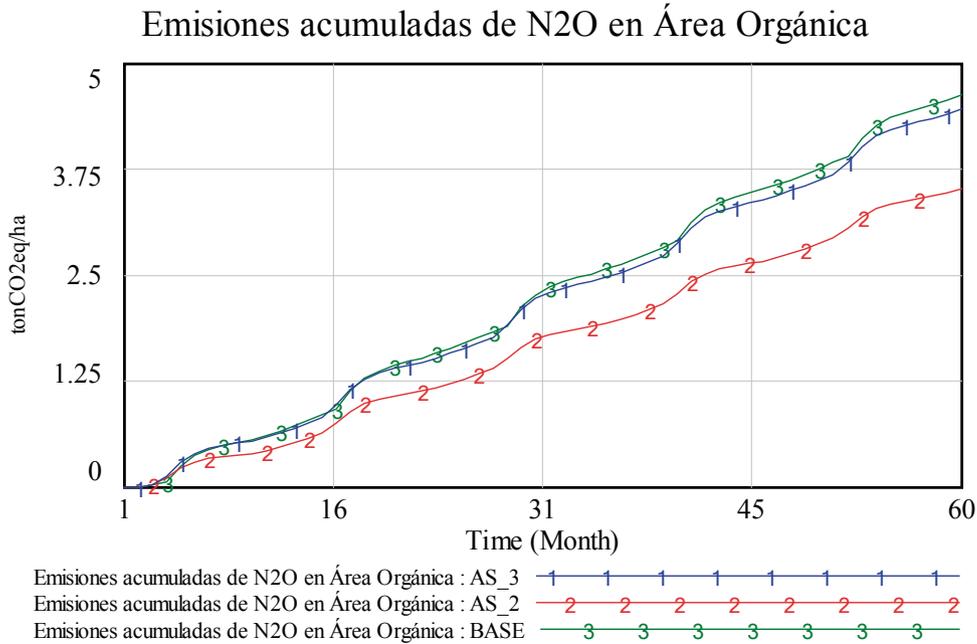


Figura 3. Oportunidad de reducción de las emisiones de GEI en el cultivo orgánico

Asimismo, en la tabla 2 se puede observar de forma resumida el nivel de emisiones acumuladas de CO₂ por combustión móvil y N₂O por fertilización en el

cultivo de caña orgánica, así como el nivel reducido de emisiones después de la evaluación de escenarios desarrollada por medio del análisis de sensibilidad.

Tabla 2. Emisiones de GEI y oportunidades de reducción en el cultivo de caña orgánica

| Cultivo de caña orgánica | | | |
|---|------------------------------------|--|---|
| Labores mecánicas | | Emisiones acumuladas de CO ₂ a LP (t CO ₂ -eq / ha) | Oportunidades de reducción (t CO ₂ -eq / ha) |
| Labores mecánicas de preparación de suelos | Plantilla soca | 0,03 0,01 | 0,03 (0,49 %) |
| Labores mecánicas de levante del cultivo | | 1,63 | |
| Fertilización | | Emisiones acumuladas de N ₂ O a CP (t CO ₂ -eq / ha) | Oportunidades de reducción (t CO ₂ -eq / ha) |
| Descomposición de pollinaza, ovinaza y estiércol de ovino | Cantidad mínima Cantidad máxima | 4,62 | 1,11 (24,2 %) 0,17 (3,7 %) |

Los resultados previamente descritos, a partir del modelo que consideró como fuente de emisión la fertilización,

presentan el comportamiento de las emisiones indirectas de N_2O por volatilización y lixiviación. La adición de pruebas considerando las emisiones directas de N_2O por mineralización, obtuvo los siguientes resultados: en el cultivo comercial las emisiones alcanzarían un nivel de 23,8 t de CO_2 -eq / ha, y en el cultivo orgánico correspondería a 21,4 t de CO_2 -eq / ha. A partir de estas pruebas, se esperaba poder reemplazar los factores de emisión dados genéricamente por el IPCC por los factores de emisión medidos experimentalmente durante un ciclo de cosecha del cultivo a partir del flujo de gases de GEI obtenido en campo. Sin embargo, no se lograron realizar los escenarios de huella de carbono a nivel experimental, dado que no se contó con una cantidad controlada de N_2O a nivel teórico para países tropicales, y tan solo se encontraron datos de un estudio realizado en Australia (Wang, Reeves, Salter, Moody, & Dalal, 2016); además, no se encontró el factor de emisión experimental de CO_2 . Por tanto, solo se consideró la modelación del cálculo de la huella teórica, adicionando algunas variables a la dinámica del proceso que el IPCC no considera como el N_2 atmosférico absorbido por el suelo, el N_2 disponible en suelo y la tasa de desnitrificación, los cuales fueron obtenidos a partir de estudios de laboratorio y mediciones en campo.

A pesar de que el nivel de emisiones de GEI por parte de un cultivo orgánico y de producción agro-silvopastoril es inferior en un 34 % con respecto a las emisiones provenientes del cultivo de caña comercial, es igualmente importante destacar oportunidades de mejora en prácticas agrícolas ejecutadas en un cultivo que funciona dentro de un sistema sostenible y de producción más limpia. Una de ellas sería la aplicación de "compostaje" (FAO, 2013) con los residuos de la caña y el estiércol de ganado ovino y bovino, dado que estos permiten aumentar el contenido de materia orgánica de los suelos, fijando carbono y reduciendo así los requerimientos de nitrógeno, lo que se traduce en una reducción significativa de emisiones de GEI.

CONCLUSIONES

En cuanto al modelo de simulación de las emisiones de GEI por fuentes móviles, se encontró que las emisiones acumuladas de CO_2 por combustión móvil durante las labores de levante y preparación de suelos del cultivo orgánico son menores a las estimadas para un cultivo de caña comercial, dado que el cultivo comercial tiene ciclos de renovación de cepa más cortos y mayor cantidad de labores mecanizadas en el

proceso de cultivo. En cuanto al modelo de simulación de las emisiones de GEI por fertilización, se encontró un aporte del 94 % de emisiones de GEI por parte de la fertilización ureica y nitrogenada, con respecto a las emisiones generadas por fuentes móviles en las etapas de preparación de suelos de un cultivo de caña de azúcar comercial y orgánico, ambos ubicados en el valle geográfico del río Cauca.

El desarrollo de modelos dinámicos sobre el comportamiento de las emisiones de GEI en diferentes ámbitos les permite a las organizaciones establecer planes de reducción de las emisiones en el largo plazo, al evaluar periódicamente el impacto de sus actividades antropogénicas en un contexto de simulación, sin generar un impacto directo sobre el campo de estudio, pero que permita proyectar datos reales de huella de carbono según la puesta en marcha de diferentes prácticas agrícolas. Por medio de los análisis de sensibilidad se pueden comprender las causas estructurales y el grado de sensibilidad de las variables que genera un patrón de comportamiento en el sistema. Esto permitirá enriquecer el conocimiento científico, al comprobar la consistencia de hipótesis dinámicas definidas inicialmente y la efectividad de políticas planteadas. A partir del modelo propuesto se pueden generar modelos más complejos, extrapolables a otros softwares de simulación como Ithink y Stella, lo cual permitirá una mejor comprensión de interacciones entre variables para generar modelos al nivel de agricultura de precisión y sistemas de recomendación, desarrollados por la comunidad científica nacional e internacional.

En conclusión, los cultivos de caña de azúcar son considerados un gran motor económico para Colombia, y principalmente para el departamento del Valle del Cauca el cual mueve el 0,7 % del PIB de Colombia y genera más de 180.000 empleos directos. Por tanto, a partir de la investigación realizada sobre uno de los cultivos de mayor impacto no solo económico sino también ambiental, es necesario hacer extensiva la invitación a los ingenios acerca del mejoramiento de sus prácticas agrícolas actuales y la transformación de sus cultivo de un sistema de producción tradicional a un sistema de producción netamente orgánica, el cual, como se demostró en este estudio, genera menos emisiones de GEI y, por tanto, es mucho más amigable con el medio ambiente. Finalmente, para futuras investigaciones que incluyan el cálculo de la huella de carbono a través de toda la cadena (cultivo e industria) se recomienda evaluar el cultivo de caña de azúcar como captador de CO_2 , y así poder realizar

un balance más acertado acerca del nivel de GEI presente en el ambiente.

abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo. Roma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) por la financiación del proyecto en el marco de su programa nacional de desarrollo tecnológico industrial y calidad, durante el periodo 2015-2016 con contrato # 588-2014. Contó con el apoyo de un ingenio azucarero y una hacienda panelera de producción agro-silvopastoril, ambos ubicados en el valle geográfico del río Cauca.

REFERENCIAS

- Andres, R. J.; Boden, T. A.; Bréon, F.-M.; Ciais, P.; Davis, S.; Erickson, D. & Treanton, K. (2012). A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion. *Biogeosciences*, 9(5), 1845–1871. <http://doi.org/10.5194/bg-9-1845-2012>
- Carbonell, J. A.; Quintero, R.; Stember, J.; Osorio, C. A.; Isaacs, C. & Victoria, J. I. (2011). *Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca (tercera aproximación)*. Cali: CENICANA.
- De Klein, C.; Novoa, R.; Ogle, S.; Smith, K.; Rochette, P. & Wirth, T. (2006). *Capítulo 11: Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cal y urea*. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Denmead, O. T.; Macdonald, B. C.; Bryant, G.; Naylor, T.; Wilson, S.; Griffith, D. W. T. & Moody, P. W. (2010). Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(6), 748–756. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.018>
- FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: FAO.
- FAO. (2015). *Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para*
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Hayama, Japón: IGES.
- Knowler, D. & Bradshaw, B. (2007). Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, 32(1), 25–48. <http://doi.org/10.1016/j.foodpol.2006.01.003>
- Pérez, O. (2001). *Fertilización nitrogenada en caña de azúcar. Síntesis de resultados de investigación en la zona cañera de Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Scheer, C.; Del Grosso, S. J.; Parton, W. J.; Rowlings, D. W. & Grace, P. R. (2014). Modeling nitrous oxide emissions from irrigated agriculture: testing DayCent with high-frequency measurements. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 24(3), 528–38. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24834738>
- Sterman, J. D. (2002). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world* (Irwin/McGr).
- Waldron, C.; Harnisch, J.; Lucon, O.; Mckibbin, R.; Saile, S.; Wagner, F. & Walsh, M. (2006). Capítulo 3: Combustión móvil. In *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 3.1–3.78 Vol. 2). Hayama, Japón: IGES.
- Wang, Reeves, Salter, Moody, & Dalal. (2016). Effects of urea formulations, application rates and crop residue retention on N₂O emissions from sugarcane fields in Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 137-146. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.035>