

Evaluación de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov)

Evaluation of greenhouse gases (GHG) in different livestock systems with kikuyo grass (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov)

Amanda Silva¹, M. Sc.; Arturo Gómez², Ph. D.; Bonnie Landazury³, Ing.; Bryan Preciado³, Ing.

Resumen

El objetivo de este estudio fue estimar la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en tres sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum*. S₁ pradera degradada (PD), S₂ pradera recuperada (PR) y S₃ arreglo silvopastoril de pasto kikuyo + *Acacia decurrens* (SSP) donde la emisión de gases (mg/m²) se evaluó a través de cámaras atmosféricas cerradas durante nueve meses. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con arreglo factorial, donde los factores correspondieron a los sistemas (S) y a los diferentes días de evaluación (DE). Se presentaron diferencias estadísticas entre sistemas, días de evaluación y en la interacción S*DE. Los sistemas SSP y PR se convirtieron en sumideros y sistemas reguladores de las emisiones de metano durante el tiempo evaluado, con mayores contribuciones en el SSP, alcanzándose valores superiores a -200 mg/CH₄/m² a los 60 días. La emisión de metano fue mayor (1.886,89 mg/m²) en PD y menor (148,28 mg/m²) en SSP, mientras que PR presentó valores intermedios (1.180,11 mg/m²). La interacción sistemas por días de evaluación mostró flujos negativos para SSP y PR entre los 52 y 245 días. Con respecto al óxido nitroso, el mayor emisor por unidad de área fue PD (735,6 mg/m²) frente a PR 647,93 mg/m² y SSP 389,89 mg/m² (p<0,01). Las menores emisiones de CO₂ en la atmósfera (234 mg/CO₂/m²) se dieron en el SSP. El sistema silvopastoril (SSP) evaluado mostró la factibilidad de incorporar cambios que contribuyan de manera sustancial en la mejora del balance de GEI en sistemas ganaderos.

Palabras clave: Degradación de pasturas, emisión de gases, secuestro de carbono, sistemas silvopastoriles.

Abstract

This study was conducted to estimate the Green House Gases (GHG) in three farming systems associated with kikuyo grass, *Pennisetum clandestinum*: S₁ degraded pasture (PD), S₂ pasture recovery (PR) and S₃ silvopastoral system, *Pennisetum clandestinum* + *Acacia decurrens* (SSP), where gas emission (mg/m²) was evaluated by using closed atmosphere chambers during a period of nine months. A field design was used with randomized complete block with factorial arrangement was used to analyze the data. The systems SSP and PR became sinks and regulatory methane emissions during the period evaluated, with greater contributions in the SSP, finding values greater than 200 mg/CH₄/m² at 60 days. As a results, CH₄ gas emission was significantly higher in PD (1.886,89 mg/m²) and lower in SSP (148,28 mg/m²), whereas PD has an intermediate value effect of (1.180,11 mg/m²). The evaluation interaction systems x day showed negative flows for the SSP and PR from 52 to 245 days. The PD was the significantly larger emitter of nitrous oxide per unit (735,6 mg/N₂O/m²) compared to PR (647,93 mg/m²) and SSP (389,89 mg/m²) systems. The SSP showed the lower CO₂ emission to the atmosphere. In conclusion, the silvopastoral system SSP appear to have capacity to regulate methane gas emission under the evaluated environmental conditions and balance of greenhouse gases in livestock systems.

Keywords: Degradation of pastures, gas emissions, carbon sequestration, silvopastoral systems.

¹ Profesor catedrático, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas. Candidata Ph. D. Programa en Agronomía. Ciencia do Solo. FCAV/Universidade Estadual Paulista-UNESP. Campus de Jaboticabal, SP, Brasil.

² Candidato Ph. D. Programa en Zootecnia, Producción animal. FCAV/Universidade Estadual Paulista-UNESP. Campus de Jaboticabal, SP, Brasil.

³ Egresados Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Nariño.

Recibido para publicación: Julio 20, 2013; Aceptado para publicación: Septiembre 30, 2013.

Este trabajo fue financiado por el Programa de Ingeniería Agroforestal de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño.

Cómo citar este artículo: Silva A, Gómez A, Landazury B, Preciado B. Evaluación de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov). Revista Colombiana de Ciencia Animal 2013, 6: 36-43

Autor de correspondencia a doctora Amanda Silva Parra, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. Tel. (2) 7311449. Correo electrónico: amanda.silvaparra@gmail.com

Copyright © 2013. Revista Colombiana de Ciencia Animal, Universidad del Tolima

El crecimiento de la población y economía mundial está promoviendo un aumento de la demanda por alimentos de origen animal. Se estima que en el año 2050 la población mundial será de 9.000 millones, siendo necesario un aumento en la producción mundial de carne y leche (Food and Agriculture Organization [FAO], 2006).

Dentro de los diversos gases de efecto invernadero (GEI), los sistemas agropecuarios contribuyen de forma significativa con la emisión de tres de ellos: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O) (Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT], 2009). El gas metano presenta un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO_2 y el tiempo de vida en la atmósfera es de 9 a 15 años, siendo su tasa anual de crecimiento de 7 % (Intergubernamental Panel of Climate Change [IPCC], 2006). Se considera que el metano resultante en los sistemas pecuarios provenientes del suelo se puede generar por la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, deposición de excrementos en las pasturas, tratamientos anaeróbicos de los residuos animales y quema de biomasa (Holter y Young, 1992; Murray et al., 1996).

El desafío en los sistemas productivos pecuarios es desarrollar estrategias para el uso y manejo de los suelos, de manejo del pastoreo, que minimicen la producción relativa de metano, posibilitando una mayor eficiencia productiva y reducción en la contribución de GEI del sector pecuario para el calentamiento global (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], 2009). El óxido nitroso (N_2O) es considerado uno de los tres más importantes GEI del planeta. La nitrificación y desnitrificación son procesos que dan origen a las emisiones de N_2O en los suelos. Según Millar et al. (2004), con relación a la actividad pecuaria, las emisiones son el resultado, principalmente, de la deposición de desechos animales en las pasturas, uso de fertilizantes nitrogenados, residuos de cosecha, compactación de los suelos, dentro de otros que contribuyen para las emisiones de N_2O . Las emisiones de CO_2 en los sistemas pecuarios son provenientes de cambios en los usos del suelo, en particular de la conversión de bosques para implementación de praderas y por la adición de cal agrícola a los suelos (Ruggiere et al., 2011).

Dentro de las alternativas de producción pecuaria con potencial para la recuperación de praderas degradadas y contribución para la reducción de GEI, se destacan los sistemas silvopastoriles (SSP). Un SSP es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de las leñosas perennes (árboles o arbustos), interactuando con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales),

y todos ellos están bajo un sistema de manejo integral (Ibrahim et al., 2007). Con un buen manejo, la ganadería asociada a los arreglos silvopastoriles contribuirá a reducir las emisiones netas de GEI de estos sistemas productivos cuando se comparan con sistemas de praderas sin árboles (Abarca, 2002). El uso de prácticas de manejo adecuadas en pasturas, sobre todo de la reposición de la fertilidad del suelo en los SSP, posibilita el acúmulo de C en los suelos a una tasa de 0,3 t C/ha/año (IPCC, 2000), lo que corresponde, aproximadamente, a la mitigación de 1,1 t CO_2 equivalente/ha/año a la atmósfera. Ese valor bastante conservador sería suficiente para anular cerca de 80 % de la emisión anual de metano de un bovino para producir carne de corte adulto, estimado en 57 kg (IPCC, 1996). Por lo tanto, las pasturas productivas y manejadas adecuadamente, además de propiciar condiciones favorables para aumentos significativos en el desempeño animal, también pueden absorber gran parte del carbono emitido por la actividad, tornándose en un componente importante en los flujos de GEI de la actividad ganadera.

El presente trabajo de investigación permitió determinar las emisiones de GEI en tres sistemas de producción asociados con pasto kikuyo, *Pennisetum clandestinum*, correspondientes a 1) pradera degradada, 2) pradera recuperada y 3) un SSP de *P. clandestinum* asociado con acacia (*Acacia decurrens* Lam), con el fin de proponer alternativas de manejo más adecuado de los sistemas productivos pecuarios y contribuir a reducir las emisiones de GEI sobre el medio ambiente.

Materiales y métodos

Localización

El estudio se realizó en el centro experimental de la Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa), ubicado en el corregimiento de Obonuco, municipio de Pasto, Nariño (Colombia), con coordenadas geográficas de latitud $1^{\circ}12'52.48''\text{N}$ y de longitud $7^{\circ}16'41.22''\text{O}$, temperatura promedio de 12°C , humedad relativa de 70 %, con 2710 msnm, y el suelo correspondió a un Vitric haplustands (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1988). Se realizó un análisis físico-químico de suelos al inicio del experimento, aplicando las metodologías sugeridas por Unigarro y Carreño (2005), con el fin de correlacionar los resultados obtenidos con las variables de estudio; para ello, se tomó una muestra compuesta de 10 sitios de muestreo en cada sistema a una profundidad de 0,20 m (tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis de suelos en los diferentes sistemas de producción asociados a pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum*, Fedepapa, Obonuco, Nariño, 2011

Sistemas	pH	MO (%)	P-disp mg/kg	CIC cmolcarga/Kg	N-total (%)	Da (g/cc)	ρ (%)	C-orgánico (%)
SSP	5,4	9,45	20,5	22,0	0,4725	0,90	48,57	5,46
PD	4,5	6,5	6,27	12,5	0,325	1,45	17,14	3,76
PR	5,0	8,5	25,0	20,5	0,425	1,05	40,00	4,91

pH: potenciométrico Suelo: Agua (1:1). MO: materia orgánica (Walkley-Black colorimétrico). P-dis: fósforo disponible (Bray II-Kurtz). CIC: capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1N pH 7,0). N-total: nitrógeno total con base en la materia. DA: densidad aparente (cilindro gravimétrica). ρ : porosidad, cálculo $(1-Da/Dr) \times 100$, asumiendo $Dr = 1,75$ g/cc. C-orgánico: (Walkley-Black colorimétrico).

Tratamientos

Se trabajó en tres sistemas de producción asociados con pasto kikuyo, *P. clandestinum*, caracterizados de la siguiente manera:

Sistema 1 = pradera degradada (PD) sembrada con kikuyo, en pastoreo continuo con ganado de leche, donde no se han realizado prácticas de recuperación, con síntomas de degradación, como son parches de plantas amarillas y pajosas, presencia de calvas, reducción en la proporción de pasto deseable, baja palatabilidad por parte del ganado.

Sistema 2 = pradera recuperada (PR), pradera donde se venían realizando labores de recuperación con mezcla de trébol rojo (*Trifolium pratense*) y fertilizaciones con urea en dosis de 150 kg/N/ha después de cada pastoreo.

Sistema 3 = una pradera en un SSP de pasto kikuyo asociado con árboles de *Acacia decurrens* Lam de 15 años de edad dispuestos en cercas vivas a distancias de 3 x 3 m, donde no se han realizado prácticas de fertilización con urea. En cada uno de los tratamientos se dispusieron 5 vacas de la raza Normando (*Bos taurus*) en producción con un peso medio aproximado de 450 kg en pastoreo rotativo. Las parcelas de estudio fueron delimitadas de tal forma que los tratamientos se encontraban lo más próximos posibles para mantener las mismas condiciones agroclimatológicas; disponían de una área de 2500 m² cada una. Se instalaron 4 cámaras atmosféricas cerradas en cada sistema; las evaluaciones se realizaron cada 30 días por un periodo de 9 meses para la toma de lecturas de gases en 4 tiempos (0, 10, 15 y 30 min) por cámara. Las épocas de evaluación coincidieron con una época seca al inicio y una lluviosa al final.

Diseño experimental

El diseño experimental correspondió a un bloque completo al azar BCA en arreglo factorial, donde el factor A correspondió a los tres sistemas evaluados y el factor B a los días de evaluación, contabilizados durante 9 meses. El total de muestras correspondió entonces a los 3 sistemas de producción evaluados x 9 evaluaciones (meses) x 4 repeticiones (cámaras) x 4 tiempos para 432 muestras. Las mediciones de las cantidades de (CH₄) metano, (N₂O) óxido nitroso y (CO₂) dióxido de carbono se realizaron de la siguiente forma, siguiendo las metodologías descritas por Holland et al. (1999), Rondón (2000) y CIAT (2009).

Instalación de cámaras

Al inicio del estudio se ubicaron 4 anillos, de cámaras de PVC. Siendo esta la cantidad mínima recomendada para la toma de GEI (se instalaron los 4 anillos sin tapa, altura de la base del anillo 8 cm, $\emptyset = 25$ cm y las dimensiones de la cámara son 10 cm de altura y $\emptyset = 25$ cm). La parte inferior o anillos se enterraron 5 cm en el suelo; estos permanecieron en las parcelas durante todo el periodo de estudio (CIAT, 1999). La altura de las cámaras fue consecuente con la altura del forraje.

Muestreo de los GEI

En el momento de cada muestreo, se colocó la cámara de PVC sobre el anillo de PVC previamente instalado en la parcela, con el fin de formar la cámara cerrada. Para evitar fugas en la cámara cerrada, se utilizó una banda de caucho en la unión de la cámara y el anillo; se tomaron 4 muestras individuales de aire (minuto 0, previo a la colocación de la cámara, minuto 10, 20 y 30 a partir de la colocación de la cámara). Las muestras de aire se extraían de la cámara cerrada a través de un séptum con una jeringa con válvula adaptada; posteriormente, se introdujeron en frascos de vidrio al vacío para su

envío a laboratorios especializados del CIAT. Dentro de la primera cámara cerrada de cada parcela se registró la temperatura con un termómetro. No se estandarizó la hora de muestreo ni tampoco la hora del día, solo se tuvo en cuenta realizar las mediciones en horas de la mañana.

Procedimiento de muestras

En el laboratorio de isótopos estables en el CIAT, se establecieron las concentraciones de N_2O y CH_4 (usando un cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14A, equipado con detectores FD (detector por captura de electrones para N_2O) y ECD (detector por ionización de llama para CH_4). Para la determinación de las concentraciones de CO_2 , se utilizó un analizador de gases (Qubit Systems S151 con tecnología infrarroja IRGA).

Determinación de los flujos de GEI

Las concentraciones de N_2O , CH_4 y CO_2 registradas por el cromatógrafo de gases y el analizador de gases, las dimensiones de la cámara (volumen y área de base de la cámara cerrada) y la temperatura dentro de la cámara se procesaron en una hoja electrónica para obtener los flujos de GEI, utilizando la ecuación:

$$\text{Flujo} = \text{Densidad del gas} \times (\Delta \text{Concentración} / \Delta \text{Tiempo}) \times (\text{Volumen} / \text{Área}) \times \text{temperatura.}$$

La unidad de flujo de cada gas está expresada como mg/m^2 . Los valores positivos de los flujos de GEI representan una emisión desde el suelo hacia la atmósfera; y los valores negativos, un flujo desde la atmósfera al suelo. A partir de los flujos de N_2O , CH_4 y CO_2 , se calcularon los flujos acumulados durante los 9 meses de evaluación, para cada uno de los gases y en cada uno de los tratamientos siguiendo la metodología del CIAT (2009). Los valores se corrigieron por temperatura y humedad.

Análisis estadístico

La comparación de los flujos GEI de metano y óxido nitroso se realizaron aplicando un análisis de varianza (ANOVA) para un BCA con arreglo factorial, y en diferencias estadísticas entre tratamientos, días de evaluación y la interacción se realizaron pruebas de comparación LSD (diferencia mínima significativa). El análisis estadístico de estas variables se realizó mediante el paquete estadístico del Statistical Analysis System (SAS) versión 6.2.

Resultados y discusión

Producción de metano

El análisis de varianza para la variable emisión de metano indicó que se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas entre los diferentes días de evaluación (DE), y estos valores también difirieron entre sistemas (S) y en la interacción S*DE ($p < 0,01$).

La figura 1 indica el comportamiento de la emisión de CH_4 en el SSP a través del tiempo; se observaron flujos negativos a los 60, 150 y 240 días en la mayoría de las cámaras, lo cual indica que estos sistemas están actuando como reguladores en la producción de metano a la atmósfera, mitigando, de alguna manera, las emisiones positivas obtenidas. Ferreira et al. (2008) reportaron que el Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ) y el bosque secundario (BS) fueron sumideros netos de CH_4 , con $-102,48 mg/m^2$ y $-36,08 mg/m^2$, en tanto que el SSP evaluado superó a los anteriores cuando se midió a los 60 días con valores superiores a $-200 mg/m^2$. Estos flujos negativos en los SSP se deben, posiblemente, a que los árboles ejercen algún tipo de acción benéfica en la porosidad de estos suelos por efecto de aumentos en la materia orgánica del suelo, acción benéfica de las raíces, aumentos de la macrofauna del suelo; factores que contribuyen también a disminuir los procesos de compactación, permitiendo una mayor oxigenación de los suelos y predominando así las bacterias metanótrofas, las cuales consumen CH_4 , y por tanto las emisiones de metano pueden verse reducidas (Ferreira et al., 2008).

Existen estimaciones que afirman que la ganadería contribuye en 18 % al cambio climático, produciendo 9 % de las emisiones de dióxido de carbono, 37 % de las emisiones de gas metano y 65 % de óxido nitroso (Steinfeld et al., 2006). El metano producido en sistemas de producción bovina se origina, principalmente, de la fermentación entérica (85 a 90 %), siendo el restante producido a partir del estiércol en las pasturas, su manejo y su contribución desde los suelos (IPCC, 1996). Los SSP con producciones ganaderas sostenibles también pueden contribuir a mitigar la emisión de gas metano por medio del efecto positivo que tienen las dietas balanceadas con leguminosas, gramíneas y otras especies arbóreas donde se generan menores problemas por emisiones de CH_4 en el estiércol (DeRamus et al., 2003).

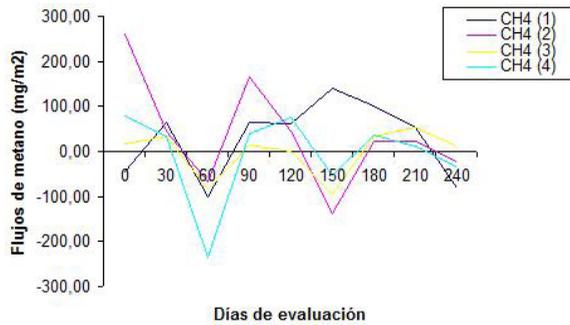


Figura 1. Comportamiento del flujo de metano ($\text{mg CH}_4/\text{m}^2$) medido en cuatro cámaras en un sistema SPP de *P. clandestinum* + *Acacia decurrens*.

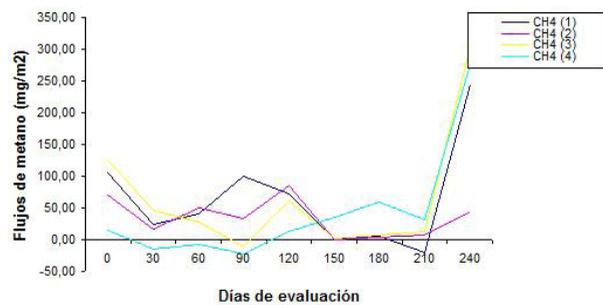


Figura 2. Comportamiento del flujo de metano ($\text{mg CH}_4/\text{m}^2$) medido en cuatro cámaras en el sistema pradera degradada (PD) de *P. clandestinum* sin árboles.

En la figura 2, se observa cómo la producción de metano en el sistema PD fue altamente significativa con respecto a los valores obtenidos en el sistema SSP; su comportamiento fue el de aumentar desde los 0 hasta los 240 días. Los flujos cambiantes en el tiempo que más pueden explicar el comportamiento de las efusiones de CH_4 del suelo en el sistema PD pudieron deberse, posiblemente, a la coincidencia con épocas de sequía y lluvia, preparación del suelo en condiciones inadecuadas de humedad a través del tiempo, laboreos excesivos, utilización frecuente de maquinaria agrícola pesada y por largo tiempo, como también el sobrepastoreo que han ocasionado procesos de degradación de estas praderas y baja aireación de los suelos, presentándose altos grados de compactación. Los valores de densidad aparente arrojados en el análisis de suelo de la PD fue de $1,45 \text{ g/cm}^3$ con respecto al SSP y PR que fueron de $0,9$ y $1,05 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, indicando una reducción del espacio poroso en el suelo y pérdida en la profundidad efectiva del suelo, esto indica una limitación en los procesos aeróbicos y un aumento en los flujos de CH_4 ; estos factores, a su vez, se vieron acompañados de menores porcentajes de materia orgánica, predominando, posiblemente, un mayor número de bacterias metanógenas o productoras de CH_4 , como lo afirman Ferreira et al. (2008). Según Andrade e Ibrahim (2003), en SSP en asocio de gramíneas con leguminosas, estas circunstancias tienden a disminuir la producción de gas metano a la atmósfera (los animales alimentados con dietas altamente fibrosas poseen mayor capacidad de producción de metano a diferencia de los que son alimentados con dietas isoenergéticas e isoprotéicas).

En la figura 3, se enseña que el sistema PR mostró producciones de CH_4 bastante bajas con respecto a PD; la recuperación de praderas incluyó la incorporación de una leguminosa de trébol rojo (*Trifolium pratense*) a la gramínea, factor que pudo

estar influyendo en un menor deterioro del suelo, mayor aireación y baja compactación de los suelos. Se observan flujos negativos a los 30, 90 y 210 días, lo cual confirma que también actúa como sistema secuestrador de CH_4 , aunque en menor proporción que el SSP. Se considera que los sistemas solo pastos, a diferencia de los SSP, poseen un ciclo continuo de iniciación, crecimiento y muerte de unidades individuales (tallos aéreos, rizomas o estolones en gramíneas, ramas y raíces en leguminosas), los cuales generan materia orgánica convirtiéndose también en sumideros importantes de carbono, aunque en una menor escala que los SSP (Fabio y Escobar, 2001).

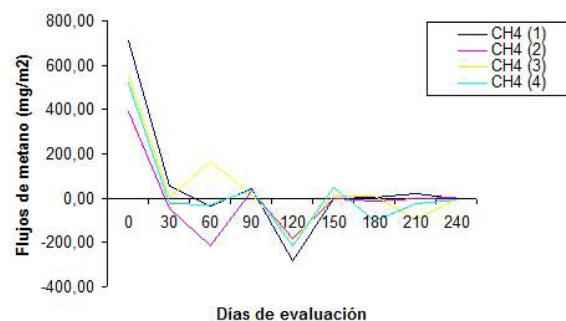


Figura 3. Comportamiento del flujo de metano ($\text{mg CH}_4/\text{m}^2$) medido en cuatro cámaras en sistema pradera recuperada (PR) de *P. clandestinum*.

Sumando los flujos negativos y positivos, el análisis de varianza permitió establecer diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) para la producción de metano entre los distintos tratamientos (figura 4).

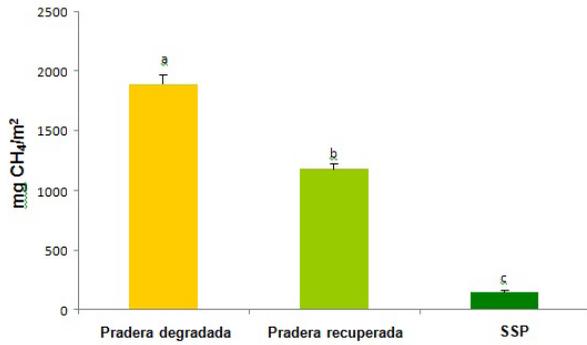


Figura 4. Flujos de metano (mg CH₄/m²) acumulados en los tres sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*P. clandestinum*).

Las praderas degradadas mostraron un flujo acumulado de 1.886,89 mg/m² de CH₄ a una (p<0,01) cuando se compararon con los flujos de los sistemas PR y SSP con valores de 1.180,11 y 148,28 mg/m², respectivamente, siendo todos estadísticamente diferentes. Ferreira et al. (2008) relacionan las altas emisiones de CH₄, de acuerdo con un primer componente que explica 37,8 % de la variabilidad y que está relacionado con el espacio poroso (altos valores de densidad aparente y de susceptibilidad a la compactación y bajos valores de macroporosidad), estableciéndose, de esta manera, una dependencia del comportamiento en la evolución de CH₄ con características físicas de los suelos, y que también fueron claras en esta investigación con respecto a los valores obtenidos más bajos de densidad aparente y alta porosidad en el SSP.

La figura 5 muestra que también se presentaron diferencias estadísticas significativas (p<0,05) en la interacción sistemas y días de evaluación (S × DE), observándose que los sistemas PR y SSP presentaron flujos negativos significativos en comparación al sistema PD entre los 52, 120 y 245 días de evaluación. Ferreira et al. (2008) mencionan que la única fuente neta emisora de CH₄ fue tala y quema, con 150 mg CH₄ m²/año. Todos los tratamientos fueron sumideros de N₂O y CO₂ relacionados con procesos naturales y de manejo.

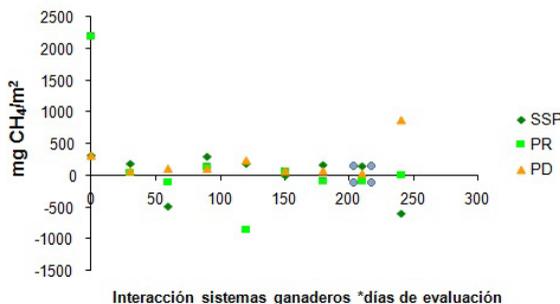


Figura 5. Interacción de los sistemas evaluados* días de evaluación sobre la producción de metano (mg CH₄/m²).

Producción de óxido nitroso

Para la producción de óxido nitroso, se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas (p<0,01) entre los tratamientos evaluados (figura 6).

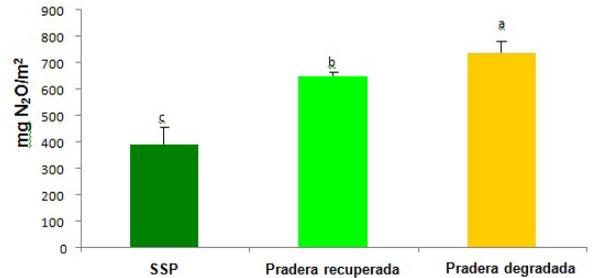


Figura 6. Flujos acumulados de óxido nitroso (mg N₂O/m²) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*P. clandestinum*).

La producción de óxido nitroso (N₂O) fue menor en el SSP comparado con los sistemas PR y PD (p<0,05), algunas especies de leñosas forrajeras que se han destacado por su uso en SSP ya sea en bancos forrajeros, cultivo en callejones o en cercas vivas en su mayoría son leguminosas las cuales aportan N al suelo y se disminuye la producción de N₂O a la atmósfera ya que está actuando una fijación de tipo biológica y natural que ocasionan bajas pérdidas por volatilización (Millar et al., 2004). El sistema PD ocasionó valores altos en la producción de N₂O, los procesos de compactación de los suelos permiten bajas condiciones de aireación en los suelos y se incrementan los procesos de desnitrificación o reducción de nitratos hasta formas volátiles como el N₂O. Ferreira et al. (2008) reportaron rangos de las emisiones de N₂O desde 687,56 mg/m²/año para SAQ fertilizado a 307,4 mg/m² en SAQ no fertilizado, valores cercanos a los reportados en este estudio para PR y SSP.

Producción de dióxido de carbono

Se presentaron diferencias estadísticas (p<0,01) en los tratamientos evaluados; no se dieron efectos en los días de evaluación ni en la interacción tratamientos × días de evaluación. El test LSD (p<0,05) mostró diferencias en todos los tratamientos evaluados. En la figura 7 se observa que el SSP presentó menores emisiones de CO₂ del suelo a la atmósfera (234 mg/m²) comparado con los otros dos sistemas evaluados PR y PD con valores de 567 y 667 mg/CO₂/m², siendo diferentes todos entre sí. Ferreira et al. (2008) mencionan con respecto al CO₂ que existió una diferencia altamente significativa entre el BS y todos los otros usos de la tierra evaluados, siendo menor en BS. En América Central, un alto porcentaje de las tierras en pasturas (>35 %) se encuentran en

estados avanzados de degradación, debido a ello los árboles de uso múltiple pueden desempeñar un papel importante en la restauración ecológica de estas, mientras contribuyen con la sostenibilidad económica de los sistemas de producción ganadera (Toledo y Torres, 1990).

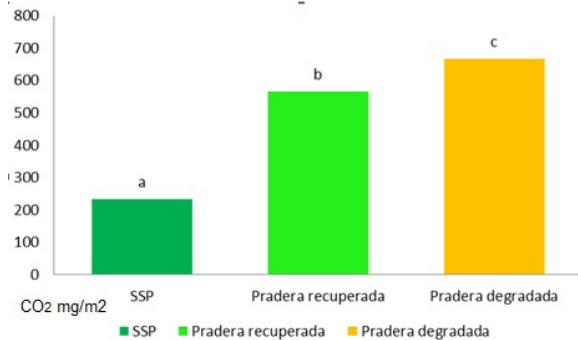


Figura 7. Producción de CO₂ en los sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*P. clandestinum*).

Los SSP en sistemas de producción animal ganadera pueden contribuir a mitigar la emisión principalmente de dióxido de carbono a través del "secuestro" de este en sus diferentes estratos (Andrade e Ibrahim, 2002). En el SSP, el carbono puede acumularse en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo. Los sistemas radiculares representan la biomasa bajo el suelo y constituyen otro sumidero de carbono (Andrade e Ibrahim, 2003). En proyectos de fijación de carbono, este componente es importante, ya que corresponde a entre 10 y 40 % de la biomasa total (MacDiken, 1997). Lo anterior permite establecer, entonces, el efecto positivo del SSP en la disminución de CO₂ en la atmósfera. Varios estudios han demostrado que la inclusión de árboles en áreas agrícolas y pecuarias, en general, mejora la productividad de los sistemas, ofreciendo oportunidad para aumentar el secuestro de carbono (Dixon et al., 1993; Rondón, 2000; Montagnini y Nair, 2004; Ibrahim et al., 2007; Andrade et al., 2008). De acuerdo con proyectos recientes, el área mundial plantada con sistemas agrosilvopastoriles aumentará sustancialmente en un futuro próximo. Sin duda, esto tendrá un gran impacto sobre el almacenamiento y el flujo de carbono a largo plazo en la biosfera terrestre (Dixon, 1993; Macdiken, 1997).

Conclusiones

El SSP kikuyo *P. clandestinum* + *Acacia decurrens* mostró flujos negativos importantes de CH₄, considerándose, por tanto, como un sistema que actúa como sumidero de GEI a diferencia del

sistema pradera degradada PD, siendo un emisor importante de CH₄ a través del tiempo evaluado.

Las mayores emisiones de GEI se presentaron en el sistema pradera degradada (PD), y en menor proporción en el SSP, con un efecto intermedio en el sistema pradera recuperada PR. El SSP evaluado representa una alternativa de producción pecuaria importante en la mitigación de GEI, donde su incorporación a los sistemas de producción ganaderos de la zona podría mitigar los efectos negativos de estos frente al calentamiento global.

Agradecimientos

A la Federación Nacional de Productores de papa (Fedepapa), al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (Colombia) y al Programa de Ingeniería Agroforestal de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, San Juan de Pasto (Colombia).

Referencias

- Abarca, R., 2009. Los Sistemas Silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense* 26, 17-24.
- Andrade, H., Ibrahim, M., 2003. ¿Cómo Monitorear el secuestro de carbono en los Sistemas Silvopastoriles?. *Agroforestería en las Américas* 10, 39-40.
- Carmona, J., Bolívar, D., Giraldo, L., 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 18, 49-63.
- Centro Internacional De Agricultura Tropical (CIAT), 2009. Proyecto de captura de carbono.
- Corpoica, 2009. Seminario-Taller Internacional sobre Cambio Climático y los Sistemas Ganaderos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia y Universidad de EMBRAPA en Brasil.
- Deramus, H., Clement, T., Giampola, D., 2003. Methane emissions of beef cattle on forrages: efficiency of grazing management systems. *Journal of Environment Quality* 32, 269-277.
- Dixon, R., Winjum, J., Schroeder, P., 2003. Conservation and sequestration of carbon the potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change* 3, 159-173.
- Dixon, R., Wimjum, J., 1994. Integrated system: assessing of promising agroforest and alternative land-use/land-use practices to enhance carbon conservation and sequestration. *Climate Change* 30, 1-23.
- Fabio, H., Escobar, A., 2001. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales en Yaracuy, Venezuela. *Livestock Research for Rural Development* 13, 7-14.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. Pastoreo Sostenible. *Agricultura* 21. Enfoques/2006. Departamento de Agricultura y Protección del consumidor.
- Fisher, M. J., Rao, I. M., Ayarza, C. E., Lascano, C. E., Sanz, J. I., Thomas, R. J., Vera, R. R., 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31, 236-238.

- Ferreira, O. I., Rondón, M. A., Hirtado, M. P., 2008. Flujos de gases de efecto invernadero del sistema agroforestal quesungual, sistema de tala y quema y del bosque secundario, en el sur de Lempira, Honduras. *Revista Técnico Científica de la Escuela Nacional de Ciencias Forestales* 20, 99-111.
- Holter, J., Young, A., 1992. Methane production in dry and lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 75, 2165-2175.
- Holland, E., Robertson, G., Greenberg, J., Groffman, P., Boone, R., Gosz, J., 1999. Soil CO₂, N₂O and CH₄ exchange. *Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research*, 185-201.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2006. Subdirección de Agrología, Suelos de Colombia, Bogotá. pp.460.
- Ibrahim, M., Chacon, M., Cuartas, C., 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45, 27-36.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996. Guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual. Cambridge: University Press. pp, 297.
- IPCC, 2000. Land use, land use change and forestry. A special report of the IPCC. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Maddiken, K. A., 1997. Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. USA. pp, 87.
- Millard, N., Ndufa, J., Cadisch, G., Baggs, E., 2002. Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. *Global Biogeochem Cycle* 18, 1032.
- Montagnini, F., Nair, P., 2004. Carbon sequestration: An under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281-295.
- Murray, R., Bryant, A., Leng, R., 1976. Rates of production of methane in the rumen and large intestines of sheep. *British Journal Nutrition* 36, 1-14.
- Pexo, D., Ibrahim, M., 1996. Sistemas silvopastoriles una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. Pastoreo intensivo en zonas tropicales: 1^{er} Foro internacional. FIRA, Banco de México, Veracruz, México. pp. 35.
- Rondón, M., 2000. Land use and balance of greenhouse gases in Colombian Tropical Savannas. Ph.D. thesis. Cornell University. USA. pp. 211.
- Rondón, A., 2004. Opportunities to mitigate Greenhouse gas emission in Latin American Agriculture. CIAT. Cali: Colombia.
- Rugierri, A., Brito, L., Magalhaes, M. O., 2011. Pasto como mitigador de gases de efeito estufa na atividade pecuária. *Universidade Federal de Vicosa, Brasil*. pp. 53-77.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., De Haan, C., 2006. *Livestock's long Shadow*. Environmental issues and options, LEAD-FAO. Roma. pp. 390.
- Toledo, J., Torres, F., 1990. Potencial of silvopastoral system in the rain forest. In: *Proceedings of a special session on Agroforestry Land use systems*. E. Moore. Anaheim, California. NFTA-IITA. pp. 35-52.
- Unigarro, A., Carreño, M., 2005. Métodos químicos para el análisis de suelos. Editorial Universidad de Nariño. pp. 72.