

Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia

Juan Fernando Naranjo*, César Augusto Cuartas*, Enrique Murgueitio, Julián Chará y Rolando Barahona**

Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria, CIPAV
jnaranjo@cipav.org.co

* *Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia*

** *Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*

Resumen

En este trabajo se siguieron los protocolos del IPCC y algunas fuentes secundarias para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi), solos y asociados a árboles maderables. Paralelamente se calcularon las emisiones de dos escenarios de referencia (pasturas degradadas y pasturas mejoradas) con el propósito de tener una aproximación sobre la contribución de las distintas fuentes de emisión de GEI dentro de los sistemas ganaderos considerados e identificar si alguno de ellos puede ser considerado como una tecnología que permite mitigar el cambio climático.

Se estimó que las pasturas degradadas y mejoradas son emisoras netas de GEI con un valor que equivale a 3153 y 3259 kg CO₂ eq/ha/año, respectivamente; mientras que los SSPi remueven GEI de la atmósfera, es decir, tienen un balance positivo de 8800 y 26,565 kg CO₂ eq/ha/año solos y asociados a árboles maderables, respectivamente. Se concluye que los SSPi son tecnologías que pueden contribuir a la mitigación del cambio climático porque por su capacidad productiva (vegetal y animal) poseen un capital natural que les permite alcanzar un balance GEI positivo.

Palabras clave: captura de carbono, cambio climático, dióxido de carbono, especies fijadoras de N, ganadería, metano, óxido nitroso

Greenhouse gases in intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* in Colombia

Abstract

This work has followed the protocols of the IPCC and used secondary information to calculate greenhouse gas (GHG) emissions in intensive silvopastoral systems (ISS) alone and associated with timber trees. Additionally, emissions were calculated for two baseline scenarios: degraded pastures and improved pastures in order to estimate the contribution of different GHG's emissions in livestock systems and determine if the ISS could be an alternative for GHG sequestration and hence be considered as a technology that can mitigate climate change.

Degraded and improved pasture generated net GHG emissions of 3153 and 3259 kg CO₂ eq /ha/year respectively; while ISS removed GHG from the atmosphere, with positive balances of 8800 and 26,565 kg CO₂ eq/ha/year alone or associated with timber trees, respectively. It is concluded that the ISS is a technology that can contribute to mitigate climate change due to its production capacity (both plant biomass and animal productivity) that enables this system to have a positive GHG balance.

Key words: carbon dioxide, carbon storage, cattle, climatic change, methane, nitrous oxide, n-fixing species

Introducción

Uno de los objetivos del Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana (FEDEGAN 2006) es que para el 2019 la ganadería sea una actividad moderna, rentable, socialmente responsable y ambientalmente sostenible, para el bienestar del ganadero. En consonancia, recientemente se inició en el país, con el apoyo del Banco Mundial y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el proyecto “Ganadería Colombiana Sostenible”, en el cual se implementarán 45,500 hectáreas de sistemas silvopastoriles (SSP) en cinco (5) regiones del país (Chará et al 2011).

El proyecto cuenta con el enfoque de *agricultura baja en carbono* (Norce 2012) que busca principalmente, adelantar programas de desarrollo donde se ejecuten paralelamente actividades orientadas a la adaptación y a la mitigación del cambio climático. De igual forma, uno de los propósitos principales del proyecto, es contribuir a la intensificación natural de la ganadería, con la implementación de sistemas silvopastoriles, el impulso de la industria forestal ligada a la ganadería, y la conservación de bosques y corredores biológicos de importancia global.

La principal contribución de este proyecto desde el punto de vista científico, son los estudios encaminados a profundizar el entendimiento de los SSP desde el componente técnico, en lo relacionado con la consolidación de los sistemas y contribución a la sostenibilidad de los mismos. En esto, deben tenerse en cuenta tanto las condiciones ambientales, como los efectos de los diferentes sistemas promovidos por el proyecto y realizar análisis en escenarios ganaderos convencionales con el propósito de identificar puntos críticos de emisión de GEI y hacer las comparaciones que sean posibles.

Según el *Inventario Nacional de Fuentes y Sumideros de Gases de Efecto Invernadero (GEI) 2000-2004*, que presentó Colombia en la *Segunda Comunicación* ante la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático* (IDEAM 2010), la participación de la agricultura (incluye las actividades agrícolas y ganaderas) y el módulo de Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés), es bastante significativa y representa el 53% del inventario nacional en los años evaluados. Así, las emisiones totales para los años 1990, 1994, 2000 y 2004 fueron 129,368, 149,867, 177,575 y 180,008 Gg CO₂ eq, respectivamente (IDEAM 2010).

Debe reconocerse que las estimaciones de las emisiones del sector agrícola, en contraste con otras industrias, están sujetas a una gran incertidumbre. En el caso de la ganadería, es común que se utilicen coeficientes genéricos simples para todos los animales, sin tener en cuenta las diferencias en la eficiencia productiva entre especies y sistemas. Los factores actuales de las emisiones se reportan con una incertidumbre de ± 30 a 50%. Es probable que en el futuro, el IPCC reporte modelos más ajustados a las condiciones de cada país y por lo tanto, se puedan generar estimaciones más específicas del sistema. Mientras eso sucede, es recomendable utilizar éstos protocolos para tener valores de referencia que puedan ser tenidos en cuenta cuando se obtienen datos experimentales o cuando se incluye un sector particular en los inventarios nacionales.

La Federación Colombiana de Ganaderos – FEDEGAN-FNG, El Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV y varias universidades colombianas, vienen impulsando el análisis de diversos sistemas ganaderos sostenibles, que incluyen la introducción de árboles y arbustos con diferentes fines y a los cuales se les ha determinado costos, rendimientos e indicadores de rentabilidad, con el propósito de que esa información pueda ser tenida en cuenta para favorecer la adopción de mejores prácticas ganaderas, que involucren la implementación de SSP como herramienta de apoyo del proyecto “*Ganadería Colombiana Sostenible*”.

Diversas instituciones, empresas y personas vienen promoviendo los SSPi, que permiten alcanzar altas cargas animales y alta producción natural de leche y carne. Las justificaciones para la promoción y difusión de estos sistemas son, entre otras, el incremento de la producción, la protección y aumento de la biodiversidad, y la reducción de la vulnerabilidad de estos sistemas a cambios meteorológicos extremos. Además, existe una serie

de prácticas y tecnologías asociadas a la producción ganadera sostenible que pueden ser herramientas que contribuyan a mitigar y adaptarse al cambio climático (Murgueitio et al 2011).

El presente estudio se realizó con el propósito de estimar las emisiones de GEI en sistemas ganaderos en Colombia bajo diferentes condiciones de manejo, a fin de contribuir al entendimiento de cómo la adopción de diferentes sistemas de producción puede afectar las emisiones de GEI asociadas con la ganadería en Colombia. Con este fin, se siguieron las recomendaciones de FAO (2011) para realizar un levantamiento rápido del inventario de GEI en proyectos que involucren el mejoramiento productivo de la ganadería con la introducción de árboles y arbustos en los sistemas, y pretendan hacer negocios de transacción de emisiones removidas y evitadas en los diferentes mercados de carbono.

Uno de los propósitos del presente estudio es evaluar las principales fuentes de emisión de GEI en sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) con *Leucaena leucocephala*. Para esto se tuvo en cuenta la productividad vegetal, la capacidad de carga y el desempeño animal, información necesaria para calcular el balance de GEI al interior de estos sistemas. En el presente ejercicio se utilizó información primaria, secundaria y ecuaciones de predicción recomendadas según las circunstancias particulares. La evaluación se llevó a cabo también para otros dos sistemas que representan los escenarios de referencia típicos de los sistemas ganaderos en Colombia.

Métodos

Escenarios de referencia para los cálculos

Pasturas degradadas: Se consideran las pasturas nativas y mejoradas que evidencian algún grado de degradación y deterioro por diferentes razones (compactación por sobrepastoreo, agotamiento de nutrientes). Estas praderas son manejadas en general bajo sistemas extensivos de pastoreo, con cargas animales variables en relación a la disponibilidad de biomasa. Para este estudio se asumieron pasturas con una productividad máxima de biomasa de 7.0 toneladas MS/ha/año y una carga animal por hectárea de 0.85 UGG (Unidades Gran Ganado: 450 kg de peso (Cajas et al 2011a)

Pasturas mejoradas: Pasturas de especies mejoradas, con indicadores de productividad vegetal máximos de 19.2 toneladas MS/ha/año y con buenas prácticas de manejo, con una fertilización anual de 200 kg N/ha/año. La carga animal utilizada para este sistema fue de 2.3 UGG/ha promedio anual (Cajas et al 2011b)

Sistemas silvopastoriles intensivos: SSPi con altas densidades de arbustos forrajeros (más de 10,000/ha) como la acacia forrajera *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, asociados a pastos mejorados de alta producción de biomasa (hasta 28 toneladas MS/ha/año bajo modelos de pastoreo rotacional intensivo con cercas eléctricas y oferta permanente de agua de abrevadero y sal mineral.

Sistemas silvopastoriles intensivos + maderables: Igual que el SSPi, pero adicionalmente cuenta con 500 árboles maderables/ha de *Eucalyptus tereticornis* Sm.

Los parámetros productivos y de carga animal para cada uno de los sistemas ganaderos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros productivos y capacidad de carga de cada escenario de referencia.

Componente del Sistema	Escenario de referencia			
	PD	PM	SSPi	SSPi + Maderables*
Productividad Vegetal; toneladas MS/ha/año	7.0	19.2	28.0	28.0
Carga UGG/ha (1 UGG=450 kg)	0.85	2.34	3.00	3.00
Productividad Animal; kg carne/ha/año	77.6	341.6	711.8	711.8

PD: Pastura degradada; PM: Pastura mejorada; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SSPi + Maderables: Sistema silvopastoril intensivo con 500 árboles maderables/ha de *Eucalyptus tereticornis* Sm.

**A pesar que la siembra e implementación de los árboles maderables reduce durante le primer año de pastoreo, el área efectiva disponible para le consumo de los animales en un 15%, los indicadores de productividad vegetal y animal, parecen no verse afectados significativamente aplicando unas estrictas prácticas de manejo del pastoreo. Así Córdoba et al (2010) reportan producciones vegetales entre 27 y 30 toneladas MS/ha/año en diferentes SSPi con y sin maderables, en el Caribe seco colombiano. Galindo et al (2011) demuestran que a pesar que los árboles y arbustos reducen la radiación fotosintéticamente activa, la producción de las pasturas asociadas en los SSPi logra estabilizarse y no se presentan diferencias entre los SSPi con maderables y sin maderables. En el presente trabajo no se consideran aumentos ni depresiones en la calidad de forraje por la implementación de los árboles maderables, aunque se ha reportado que en SSP la presencia del componente arbóreo mejora la calidad nutritiva de las pasturas (Barahona y Sánchez, 2005).*

VARIABLES CONSIDERADAS Y CÁLCULO DE LAS FUENTES DE EMISIÓN Y REMOCIÓN DE GEI

En la Tabla 2 se presentan las fuentes principales de GEI dentro de los sistemas ganaderos evaluados, la descripción del cálculo realizado y la referencia usada para cada uno de los casos.

Tabla 2. Fuentes de GEI en los sistemas ganaderos (emisiones y remociones), descripción del cálculo realizado y referencia.

GEI	Fuente de emisión o remoción de GEI	Factor utilizado	Referencia
Metano (CH ₄)	Fermentación Entérica	21.6 g/kg de MS consumido.	IPCC 2006, Radrizzani et al 2011.
	Heces y orina.	Excreción de proteína cruda: 480 kg/toneladas de biomasa animal/año.	IPCC 2006.
	Fertilización con nitrógeno sintético.	0.01 kg de N volatilizado/kg de N aplicado como fracción de fertilizante nitrogenado sintético que se volatiliza como NH ₃ y NOx. Aplicación de 200kg de N/ha/año en PM.	Guías del IPCC 2006, Tabla 11.3, volumen 4.
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Fijación biológica de nitrógeno	En el SSPi se estimó que la cantidad de N fijado biológicamente fue de 200 kg N/ha/año. 0.01 kg N ₂ O-N/kg N fijado como Factor de emisión para N ₂ O, debido al aporte de N de las especies fijadoras de N al suelo de las praderas.	Dalzell et al 2006. Camacaro et al 2004, Unkovich et al 2008.
	Tasa de fijación anual por sistema.	Tasa de fijación anual de -0.29 para pasturas degradadas, 0.91 para pasturas mejoradas y 4.64 para sistemas silvopastoriles intensivos, Incluye carbono orgánico del suelo, biomasa radical, biomasa aérea de gramíneas y leguminosas arbustivas (donde aplique). Incremento medio anual de los maderables - IMA: 12 m ³ /ha/año.	World Bank 2008, Ibrahim et al 2010a
Dióxido de Carbono	Almacenamiento por parte de las especies leñosas.	Densidad de la madera 850 kg/m ³ . Fracción de carbono de la MS: 0.5.	MADR, CONIF, Proexport, 2009 Cifuentes and Medina 2005 IPCC 2006

Para el análisis de las tasas de remoción de GEI, se usaron distintas modelaciones realizadas en el programa CO₂Fix (Schelhass et al 2004); desarrollado por investigadores de la Universidad de Wageningen (Holanda), la Universidad Nacional Autónoma de México, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), y el Instituto Forestal de Europa (EFI). El programa se alimenta de datos procedentes del campo y de información secundaria y ha sido recomendado por el IPCC. El programa es una herramienta útil para explorar

los cambios del almacenamiento de carbono en los usos de la tierra porque permite estimar a través del tiempo las reservas de carbono en la biomasa aérea, el suelo y en el humus del suelo y para períodos de tiempo significativos que evidencien los cambios en las prácticas de manejo sobre el suelo.

Para la cuantificación de las emisiones de metano y óxido nitroso, se siguieron los protocolos del IPCC (2006) y la guía de buenas prácticas de este mismo grupo de expertos. Para el cálculo de remoción de GEI por parte de los árboles maderables asociados a los SSPi (500/ha) se utilizaron valores de Incremento Medio Anual – IMA para *Eucalyptus* spp. con turno de corte entre 8 y 10 años según MADR, CONIF y PROEXPORT (2009) y valores de densidad de la madera para *Eucalyptus tereticornis* según Cifuentes y Medina (2005).

En relación al N_2O , es importante considerar que en proyectos forestales de remoción de GEI se ha cuestionado la inclusión de especies leguminosas argumentando que por los procesos de nitrificación/desnitrificación de N del suelo mediante su fijación biológica se incrementan las entradas de N_2 en el suelo produciendo un incremento en las emisiones de N_2O a la atmósfera y, en consecuencia, un aumento de las emisiones de GEI totales (Rochette P and Janzen H H 2005, UNFCCC 2003, Salinas Z and Hernández P 2008, Vallejo A 2005). Sin embargo, aún hoy es escasa bibliografía científica disponible sobre el efecto real que tiene la utilización de este tipo de plantas en las emisiones finales de N_2O y cómo se cuantifican dichas emisiones en un proyecto forestal de remoción de GEI. Para el cálculo de las emisiones de óxido nitroso, se utilizaron las ecuaciones aprobadas por el IPCC (2006) y utilizadas por FAO (2011)

Aunque las emisiones de GEI en sistemas ganaderos se deben discriminar en emisiones dentro y fuera de la finca (van Kernebeek and Gerber 2008), para los casos considerados en este trabajo sólo se consideraron las emisiones relacionadas con cada escenario ganadero considerado y no se tuvieron en cuenta las emisiones por fuera de la finca como las asociadas al uso de combustibles fósiles para automotores o para labores en la finca misma.

Resultados y discusión

En la Tabla 3 se presentan las emisiones y remociones de los principales GEI en los diferentes escenarios de pastoreo de referencia y su respectivo balance. Los valores expresados en rojo, denotan una emisión neta de GEI; mientras que los que aparecen en verde, indican remoción o fijación efectiva de GEI.

Tabla 3. Emisiones y remociones de los principales GEI (kg CO_2 eq/ha/año) en los diferentes escenarios de pastoreo de referencia.

Parámetro	GEI	Fuente	Escenario de pastoreo de referencia							
			PD	% ¹	PM	%	SSPi	%	SSPi + Maderables	%
Emisiones	CH ₄	Fermentación entérica	1734.8	83.0	4758.2	72.1	6105.8	74.0	6105.8	74,0
	N ₂ O	Fertilización con N sintético ²	0	0	876.9	13.3	0	0	0	0
		Fijación biológica de N ³	0	0	0	0	876.9	11.0	876.9	11,0
Remoción	CO ₂	Heces y orina	355.2	17.0	961.1	14.9	1230.0	15.0	1230.0	15,0
		Tasa Fijación anual	+1063.3		-3336.67		-17013.3		-34778.3	
Balance			+3153.0		+3259.5		-8800.6		-26565.6	

PD: Pastura degradada; PM: Pastura mejorada; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SSPi + Maderables: Sistema silvopastoril intensivo con 500 árboles maderables/ha de *Eucalyptus tereticornis*; CH₄: Metano; N₂O: Óxido nitroso; CO₂: Dióxido de carbono; kg CO_2 eq/ha/año: kg de dióxido de carbono equivalente/ha/año.

¹ Porcentaje de contribución de cada fuente de emisión, respecto al total de las emisiones.

² Se refiere a la fertilización de la PM con 200 kg de nitrógeno/ha/año.

³ Se calculó respecto a la fijación biológica de nitrógeno realizada por la *L. leucocephala*/ha/año, calculada en 200 kg de nitrógeno/ha/año (Camacaro et al 2004, Dallzel et al 2006).

Emisiones de metano

Las emisiones de CH₄ por fermentación entérica calculadas en el presente estudio para cada uno de los sistemas evaluados fueron 1.7 toneladas CO₂ eq/ha/año para PD; 4.8 para PM; y 6.1 para SSPi y SSPi + Maderables. Aunque varios trabajos experimentales recomiendan hacer modificaciones a los valores usados por el IPCC para hacer los cálculos de las emisiones de metano (Primavesi et al 2004, Mieres et al 2003), las ecuaciones sugeridas por el IPCC se consideran válidas para reportar valores nacionales y regionales (FAO 2011).

En un estudio realizado en Brasil por Primavesi et al (2004), se encontraron emisiones de metano de 1.7 a 3.09 toneladas CO₂ eq/ha/año en pasturas de *Panicum maximum* y *Brachiaria decumbens* fertilizados y de 1.38 a 1.52 en pasturas sin fertilizar, datos similares a los calculados en el presente estudio para PD y PM. Los valores de emisión son mayores a los medidos en regiones templadas en condiciones de pastoreo. El trabajo resalta la alta influencia de la calidad de forraje en las emisiones y también los efectos raciales de los animales porque parecen existir diferencias en la eficiencia en el uso de los forrajes, que podrían deberse a diferencias en el contenido y degradabilidad de la fibra en estos sistemas de producción (Barahona y Sánchez, 2005, Molina y Barahona, 2011).

También en Brasil, Demarchi et al (2003) realizaron un estudio con ganado de la raza Nelore en invierno y primavera, bajo condiciones de pastoreo de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. Sus resultados sugieren que la variación de la calidad del forraje explica la diferencia de emisiones entre invierno y verano. Los valores de emisión promedio en invierno y primavera son de 0.78 y 1.05 toneladas CO₂ eq/ha/año. La emisión de CH₄ del ganado de carne característico de Brasil sería de 51.8 kg de CH₄/cabeza/año y existe una alta correlación entre emisiones y peso vivo del animal. En Uruguay, Mieres et al (2003) encontraron emisiones de 0.76 y 0.90 toneladas CO₂ eq/ha/año, para novillos en pastura mejorada y pastura natural respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas. Estos estudios sugieren que aún las determinaciones de emisiones están sujetas a una alta variabilidad y por tanto, las ecuaciones recomendadas por el IPCC siguen siendo válidas para aproximaciones particulares.

De otro lado, es interesante resaltar que aunque en general, los valores *por defecto* del IPCC para las emisiones de CH₄ para las mismas condiciones tropicales, de animales y de forrajes (digestibilidad *in vitro*) son mayores a los encontrados experimentalmente; sigue siendo apropiado para realizar comparaciones entre sistemas cuando no se cuente con información detallada que permita ajustar los cálculos. Este hecho es de especial importancia entendiendo que la dieta de los SSPi ofrece unas características nutricionales mejores y que es posible que los animales tengan un comportamiento distinto al sugerido por el IPCC en relación con las emisiones de los animales. En Australia, se evaluó el efecto de la inclusión de la leucaena (*Leucaena leucocephala*) sobre la emisión de metano, y se encontró que ésta puede reducir hasta un 30% las emisiones de CH₄/kg de MS consumida (Charmley 2009). En México Solorio (2011) encontró que en los SSPi con leucaena se reduce en un 38% la emisión de CH₄ anual por animal. Para el presente estudio se asumió un nivel de emisiones similar por kilogramo de MS consumido en los diferentes sistemas, aunque se esperaría una reducción de emisiones por unidad de consumo en los SSPi como lo sugieren estos estudios.

Emisiones de óxido nitroso

Según el IPCC (2006), el total de N excretado por Unidad Animal (U.A) en Suramérica, se estima en 162 g de N/día. Las emisiones directas de N₂O de las excreciones bovinas (heces y orina), equivalen al 2% del N presente en las excretas (IPCC 2006). Como emisiones directas, por cada kilo de N en forma de excreta

depositada en el suelo, 20% se volatiliza y 30% se lixivia. Del 20% que se volatiliza, el 1% es emitido como N_2O y del 30% lixiviado, un 75% es emitido como N_2O (IPCC 2006). Así, una U.A./ha produce 59.13 kg N/ha/año como excretas; es decir, en forma directa se emiten 0.59 kg de N- N_2O o 0.93 kg N_2O /ha/año e indirectamente se emiten 0.25 de N- N_2O o 0.39 kg N_2O /ha/año. Los cálculos en este estudio en emisiones de N_2O por heces y orina en kg CO_2 eq/ha/año, fueron de 355 para PD, 961 para PM, 1230 para SSPi y SSPi + Maderables, lo que equivale a decir, que en bovinos de carne, una U.A. emite anualmente 1.2 kg N_2O /ha/año que equivalen a 410.5 kg CO_2 eq/ha/año.

Aunque los factores de emisión utilizados para la realización de los cálculos de la fertilización nitrogenada y la fijación biológica de nitrógeno, fueron los mismos, es importante tener en cuenta que la fijación biológica de nitrógeno por las leguminosas, se produce a partir de la energía solar; mientras que la producción de fertilizantes nitrogenados requiere cantidades significativas de combustibles fósiles no renovables o de otras fuentes de energía comerciales (Crews and People 2004).

Remoción y fijación de dióxido de carbono

Existen opciones tecnológicas con cuya implementación se puede mejorar la capacidad de los sistemas ganaderos de adaptarse al cambio climático. Entre ellas se encuentra el desarrollo de germoplasma forrajero adaptado a condiciones particulares de los suelos, excesos o déficit de lluvias, heladas, así como la implementación de sistemas agro y silvopastoriles (Tiemann et al 2009, Hess et al 2006, Narváez and Lascano 2004, Barahona 2002).

La cantidad de CO_2 que puede fijar anualmente un sistema ganadero está influenciado por diferentes aspectos, como el manejo, la historia del uso suelo, la textura, el clima, la producción, entre otros (t Mannetje 2007, Fisher et al 2007). Es así como Fisher et al (2007) haciendo un análisis en diferentes tipos de pasturas, reportó que las pérdidas por degradación y malos manejos pueden llegar a representar 1.5 toneladas CO_2 eq/ha/año, valor similar al encontrado en este estudio. Por lo tanto, para poder garantizar la fijación de CO_2 en sistemas ganaderos, es necesario mejorar las prácticas de manejo, mantener productivo el sistema y diseñar estrategias de manejo que permitan conservarlo, como en los SSPi.

Los resultados de este estudio, sugieren que las PD no remueven GEI de la atmósfera; al contrario, se presentan con una tasa de emisión anual de 1.06 toneladas CO_2 eq/ha mientras que las PM y los SSPi y SSPi + maderables, presentan tasa de fijación anual de 3.3; 17.0 y 34.8 toneladas CO_2 eq/ha, respectivamente. Los cálculos del balance de GEI, presentan entonces que las PD y las PM, son emisoras netas (3.2 y 3.3 toneladas CO_2 eq/ha para PD y PM respectivamente); mientras que los SSPi solos y asociados a maderables; se presentan como sistemas que remueven GEI de la atmósfera (8.8 y 26.6 toneladas CO_2 eq/ha para SSPi y SSPi + maderables, respectivamente), como ha sido reportado en otros estudios (World Bank 2008, Ibrahim et al 2010b).

A pesar de que los resultados en la estimación de tasas de fijación de CO_2 en sistemas agroforestales y SSP, difieren mucho en su estimación, según los métodos empleados para las mismas (Nair et al 2010), en la región existen trabajos que pueden servir para entender las estimaciones calculadas en este estudio. Amézquita et al (2010) en la Amazonía colombiana reportaron tasas de fijación para sistemas ganaderos con *Brachiaria brizantha* de 12.8; *B. brizantha* asociada a *Arachis pintoi* de 15.0 y para *Hyparrhenia rufa* de 13.6 toneladas CO_2 eq/ha. Mora (2001) en Costa Rica encontró tasas de fijación de 19.1 y 18.7 toneladas CO_2 eq/ha en monocultivo de *Pennisetum clandestinum*, y en *P. clandestinum* con árboles respectivamente; y de 17.6 y 18 toneladas de CO_2 eq/ha en *Cynodon nlenfuensis* en monocultivo y con árboles respectivamente.

En términos generales, los procesos fisiológicos que presentan la mayor intensidad de emisiones de GEI en sistemas ganaderos en pastoreo son la fermentación entérica y la deposición de los residuos sólidos y líquidos

bien sea directamente por los animales o cuando se acumulan y luego se aplican al suelo (GAMMA 2010, Romero 2009).

Como se puede observar en la Tabla 3, la mayor contribución de GEI se produce por los procesos fisiológicos de los animales. En los SSPi, está cercano al 90%, lo que sugiere que es necesario profundizar en los mecanismos de utilización eficiente de los nutrientes, desde la perspectiva animal y vegetal; porque con estas aproximaciones aún es desconocido qué porcentaje puede ser reducido y qué porcentajes pueden modificarse con las tecnologías silvopastoriles.

A través de la óptica de la mitigación al cambio climático, se deben hacer diferencias entre las emisiones evitables, reducibles y compensables. Por ejemplo, las emisiones producto de los procesos fisiológicos se consideran como reducibles pero no evitables, en cambio otras emisiones pueden ser evitables y reducibles dentro y fuera de la finca (Ibrahim et al 2010a, 2010b). El total de emisiones de GEI son compensables dependiendo del potencial del capital natural para dicho logro o la intención de compensar por medio del mercado de bonos de carbono, en caso de acceder a negociaciones sobre remoción o compensación de emisiones. En este caso y dadas las condiciones de productividad vegetal de los SSPi, es posible afirmar que tienen un alto capital natural con capacidad para ser una estrategia de mitigación al cambio climático.

Baethgen y Martino (2001) reportan que los productores uruguayos emiten 1 kg CH₄/kg carne producido, lo cual equivale a 21 kg CO₂ eq. Con los datos obtenidos en el balance de GEI para cada uno de los sistemas considerados en este estudio puede decirse que para PD se emitirían 94.4 kg CO₂ eq/kg carne, las PM compensarían la producción de 35.8 kg de carne; mientras que los SSPi podrían compensar la producción de 444.4 y 1290.3 kg carne, para SSPi y SSPi + Maderables respectivamente.

La contribución del cambio de uso de la tierra a mayores emisiones de dióxido de carbono ha despertado recientemente la atención de investigadores y decisores de política. La deforestación y sus vínculos con la ganadería extensiva vuelve a ser un punto crítico desde la perspectiva del cambio climático, relación negativa que ya es aceptada también con la pérdida de biodiversidad (Steinfeld et al 2006). Por ejemplo, si en las cuentas nacionales de Brasil se incluye el análisis de las emisiones por deforestación, el balance deja de ser positivo y el país pasa a ser emisor importante en el contexto global (CBO 2012). Buena parte de las áreas deforestadas en Brasil pasan a ser pastizales para ganado. Lo mismo sucede en Colombia donde el 55% de las casi 300,000 ha deforestadas por año en el último quinquenio pasan a pasturas (Cabrera et al 2011). En este contexto una de las estrategias más recomendadas para mitigar las emisiones es incrementar el tamaño del sumidero de carbono terrestre más estable, lo que implica conservar los bosques y ampliar las áreas forestadas puras o asociadas con agricultura y ganadería. Escalar los sistemas silvopastoriles hacia una multiplicación masiva es un camino cada vez más interesante.

Conclusiones

- Los SSPi, solos y asociados a maderables, pueden contribuir mitigar el cambio climático, porque cuentan con una tasa de remoción anual GEI de 17,013 y 34,778 kg CO₂ eq/ha/año respectivamente.
- Bajo los escenarios considerados en este estudio, tanto las pasturas degradadas como las mejoradas, se presentaron como emisoras netas de GEI, con emisiones anuales de 3153 y 3260 kg CO₂ eq/ha/año, respectivamente.
- Según los cálculos realizados en este estudio, puede afirmarse que la prevención para la inclusión de leguminosas arbóreas en proyectos de remoción de emisiones, no debe existir porque, el N₂O emitido por estas especies fijadoras de nitrógeno es compensado por una mayor captura en la biomasa aérea y el suelo.

Agradecimientos

Al Doctorado en Ciencias Animales de la Universidad de Antioquia y al programa Formación del Bicentenario mediante las Becas Doctorales “Francisco José de Caldas” de COLCIENCIAS y al Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José De Caldas. A la Federación Colombiana de Ganaderos - FEDEGAN-FNG, a The Nature Conservancy - TNC, a El Fondo Acción, a El Banco Mundial - WB y al Global Environment Facility – GEF.

Referencias

- ’t Mannetje L 2007** The role of grasslands and forests as carbon stores. *Tropical Grasslands* 41:50–54.
- Amézquita M C, Murgueitio E, Ibrahim M and Ramírez B 2010** Carbon sequestration in pasture and silvopastoral systems compared with native forests in ecosystems of tropical America. In: Abberton M, Conant R and Batello C (Editors). Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change. Integrated Crop Management 2010 FAO, Rome,
- Baethgen W E and Martino D L 2001** Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal 9(2): 127-134.
- Barahona R 2002** The use of leguminous shrubs and trees as forages in tropical ruminant production systems. Chamorro D R, Barahona R, Arreaza L C, Conde A and Cuesta A (Editors). Manejo de la proteína en la Producción de Ganado Bovino. Bogotá, Neiva y Cartagena. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA; Agencia Colombiana de Cooperación Internacional ACCI, Ministerio De Agricultura y Desarrollo Rural MADR, Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas UDCA.
- Barahona R y Sánchez S 2005** Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. Revista Corpoica 6 (1): 69-82.
- Cabrera E, Vargas D M , Galindo G, García M C y Ordóñez M F 2011** Memoria Técnica: Cuantificación de la tasa de Deforestación para Colombia, Periodo 1990-2000, 2000-2005. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 22 p.
- Cajas S, Cuesta P, Martínez J, Arreaza L y Barahona R 2011a** Desarrollo y validación de tecnologías para mejorar la competitividad de los sistemas de ceba bovinos en el Valle del Sinú, Colombia. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 24:3 p 470.
- Cajas S, Cuesta P, Martínez J, Arreaza L y Barahona R 2011b** Implementación de estrategias tecnológicas para mejorar la productividad y sostenibilidad de sistemas de doble propósito en las sabanas de la Región Caribe colombiana. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 24:3 p 495
- Camacaro S, Garrido J y Machado M 2004** Fijación de nitrógeno por *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* y *Albizia lebeck* y su transferencia a las gramíneas asociadas. Zootecnia Tropical 22 (1) 49-69.
- CBO 2012** Deforestation and Greenhouse Gases. The Congress of the United States O Congressional Budget Office. Pub. No. 4216. 21p.
- Chará J D, Murgueitio E, Zuluaga A y Giraldo C 2011** Ganadería Colombiana Sostenible. Mainstreaming Biodiversity in Sustainable Cattle Ranching. Fundación CIPAV. 158p.
- Charmley E 2009** Reducing methane emissions from livestock and the role of *Leucaena*. The *Leucaena* Network 2009 Conference and Annual General Meeting. <http://www.leucaena.net/conference.htm>
- Cifuentes F y Medina J 2005** Determinación de las propiedades físicas, mecánicas y durabilidad natural de Teca (*Tectona grandis*) y Eucalipto (*Eucalyptus tereticornis*) procedencia Fundación (Magdalena). Trabajo Universidad distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Laboratorio de Tecnología de maderas “José Anatolio Lastra Rivera”. Bogotá, Colombia.
- Córdoba C, Murgueitio E, Uribe F, Naranjo J y Cuartas C 2010** Productividad vegetal y animal bajo sistemas de pastoreo tradicional y sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en el Caribe seco colombiano. Congreso Internacional de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. CATIE; CIPAV, Turrialba 160 p

Crews T E and Peoples M B 2004 Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 102: 279–297

Dalzell S A, Shelton H M, Mullen B F, Larsen P H and McLaughlin K G 2006 *Leucaena*: a guide to establishment and management. Meat and Livestock Australia Ltd. Sydney, Australia.

Demarchi J A, Manella M Q, Lourenco A J, Alleoni G F, Frighetto T and Lima M A 2003 Preliminary results on methane emission by Nelore cattle in Brasil grazing *Brachiaria brizanta* cv. Marandú. In: 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference, 2003, Beijing, China.(II). p. 80-84.

FAO 2011 Methodology for Sustainable Grassland Management (SGM). Methodology Verified Carbon Standard. Methodology VCS, Versión 3. 65p. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/FAO-SGM-Methodology.pdf

FEDEGAN 2006 Plan estratégico de la ganadería colombiana. Federación Colombiana de Ganaderos – FEDEGAN – FNG. Bogotá D.C. 296p.

Fisher M J, Braz S P, Dos Santos R S M, Urquiaga Alves B J R and Boddey R M 2007 Another dimension to grazing systems: Soil Carbon. *Tropical Grasslands* 41:65-83.

Galindo V A, Murgueitio M, Zapata A, Naranjo J, Cuartas C y Murgueitio E 2011 Interceptación de la luz por leguminosas arbóreas en sistemas silvopastoriles intensivos de *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit y su efecto en la producción de biomasa en pastos mejorados de *Cynodon plectostachyus* (K.Schum.) Pilg. y C, en el bosque seco tropical de la Terraza de Ibagué. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 24(3): 523.

Gamma 2010 Programa de fomento de la producción agropecuaria sostenible (PFPAS) programa de ganadería y manejo del medio ambiente (GAMMA) estudio determinación del balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad sp no: 14-2009. informe final, junio del 2010.

Gaviria X, Restrepo J C y Barahona R 2011 Comparación del consumo y digestibilidad de nutrientes y de la producción de carne de novillos cebú en un sistema de confinamiento y en un sistema silvopastoril intensivo *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 24: 468

Hess D, Gómez J y Lascano C (Editors) 2006 Taller Taninos en la Nutrición de Rumiantes en Colombia (2, 2006, Cali, Colombia). Memorias/editores: Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) 52 p. (Publicación CIAT no. 352)

Ibrahim M, Guerra L, Casasola F and Neely C 2010a Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits In: FAO. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change. Integrated Crop Management Vol. 11–2010 FAO, Rome

Ibrahim M, Tobar D, Guerra L, Sepulveda C y Ríos N 2010b Determinación del balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región Chorotega, Costa Rica como elemento de referencia para mejorar la competitividad. En Ibrahim M y Murgueitio E. Memorias VI Resúmenes VI Congreso Internacional de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. CATIE - CIPAV Turrialba, C.R. 160 p.

IDEAM 2010 Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM– Bogotá, Colombia.

IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T and Tanabe K (Editors). The Intergovernmental Panel on Climate Change. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. 595p.

MADR CONIF Proexport 2009 Sector forestal, invierte en Colombia. v.1, n1. Bogotá. ISSN 2027 – 3908. 25p.

Mieres J, Olivera L, Martino D, La Manna A, Fernandez E, Palermo R and Gremminger H 2003 Methane emission from Holstein heifers grazing contrasting pastures in Uruguay. In: Proceedings of the 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference, Beijing, China.

Molina I C y Barahona R 2011 Estimación de las emisiones de metano por novillos cebados en dos sistemas contrastantes de producción de carne bovina *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 24 (3): 378.

Muñoz J, Córdoba C y Barahona R 2009 Estimación y comparación del consumo de bovinos pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos y potreros remanentes del cultivo de arroz mediante el método de alcanos *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 22(3): 532

Murgueitio E, Calle Z, Uribe F, Calle A and Solorio B 2011 Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management* 261:1654-1663

- Nair P K R, Nair V D, Kumar B M and Showalter J M 2010** Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy* 108: 237-307.
- Narváez N y Lascano C E 2004** Caracterización química de especies arbóreas tropicales con potencial forrajero en Colombia. *Pasturas Tropicales* 26 (3): 1-8.
- Norse D 2012** Low carbon agriculture: Objectives and policy pathways. *Environmental Development* 1: 25–39
- Primavesi O, Frighetto R T, Pedreira M D S, De Lima M A, Berchielli T T and Barbosa P F 2004** Dairy cattle enteric methane measured in Brazilian tropical conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39 (3): 227-283.
- Radrizzani A, Shelton M, Scott A, Dalzei A and Kirchhof C 2011** Soil organic carbon and total nitrogen under *Leucaena leucocephala* pastures in Queensland. *Crop and Pasture Science* 62: 337-345
- Rochette P and Janzen H H 2005** Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73:171–179.
- Romero J C 2008** Metodología para estimar la remoción y la reducción de gases efecto invernadero por prácticas de manejo mejoradas en pastizales bajo el Estándar de Carbono Voluntario. Tesis Mag. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica 126 p.
- Salinas Z y Hernández P 2008** Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. 2008. Serie Técnica, Manual Técnico N° 83. Turrialba, C. R. 171p.
- Schelhass M J, van Esch P W, Groen TA, de Jong B H J, Kanninen M, Liski J, Masera O, Mohren G M J, Nabuurs G J, Palosou T, Pedroni L, Vallejo A, and Vilen T 2004** CO₂FIX V 3.1 – A Modelling Framework for Quantifying C Sequestration in Forest Ecosystems. Alterra-rapport 1068. Wageningen, Alterra, 120 pp.
- Solorio F 2011** Los sistemas silvopastoriles intensivos: avances de investigación en el Valle de Tepalcatepec, Michoacán. Memorias del tercer congreso sobre sistemas silvopastoriles intensivos para la ganadería sostenible del siglo XXI. 2, 3 y 4 de marzo de 2011. Morelia y Tepalcatepec, Michoacán.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M and de Haan C 2006** Livestock's long shadow, environmental issues and options. LEAD-FAO. Rome. 390 p.
- Tiemann T T, Franco L H, Peters M, Frossard E, Kreuzer M, Lascano C E and Hess H D 2009** Effect of season, soil type and fertilizer on the biomass production and chemical composition of five tropical shrub legumes with forage potential. *Grass and Forage Science* 64: 255–265.
- UNFCCC 2003** Options paper on modalities for addressing socio-economic and environmental impacts, including impacts on biodiversity and natural ecosystems. Bonn, DE, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA) [Eighteenth session, 2–13 June 2003].
- Unkovich M, Herridge D, Peoples M, Cadisch G, Boddey R, Giller K, Alves B and Chalk P 2008** Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. ACIAR Monograph No. 136, 258 pp.
- Vallejo A 2005** Maia - software para el monitoreo de proyectos de remoción de carbono bajo el Mecanismo para un Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto. Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito parcial para optar al grado de Magister scientiae. Turrialba, C. R. 88p.
- van Kernebeek H and Gerber P 2008** Environmental Life Cycle Analysis of milk production in Ropar, India. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 34p.
- World Bank 2008** Colombia, Costa Rica and Nicaragua, Integrated Silvopastoral Approaches to Ecosystem Management Project. Implementation Completion and Results Report. Environmentally and Socially Sustainable Development, Central American Department Latin America and Caribbean Region.

Received 27 January 2012; Accepted 24 July 2012; Published 1 August 2012

[Go to top](#)