

Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático

Opciones y perspectivas

José Manuel Palma García
José Antonio Torres Rivera
Eduardo Valdés Velarde
COORDINADORES



UNIVERSIDAD DE COLIMA

© UNIVERSIDAD DE COLIMA, 2022
Avenida Universidad 333
C.P 28040, Colima, Colima, México
Dirección General de Publicaciones
Teléfonos: 312 316 1081 y 312 316 1000, extensión: 35004
Correo electrónico: publicaciones@ucol.mx
<http://www.ucol.mx>

Derechos reservados conforme a la ley
Impreso en México / *Printed in Mexico* - Publicado en México / *Published in Mexico*

ISBN eBook: 978-607-8814-24-4
DOI: 10.53897/LI.2022.0011.UCOL



Este libro está bajo la licencia de Creative Commons, Atribución – NoComercial - CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Usted es libre de: Compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material bajo los siguientes términos: Atribución: Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. NoComercial: Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. CompartirIgual: Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

You are free to: Share: copy and redistribute the material in any medium or format. Adapt: remix, transform, and build upon the material under the following terms: Attribution: You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use. NonCommercial: You may not use the material for commercial purposes. ShareAlike: If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

Portada

Dueño de la obra: Colegio Mexicano de Agroforestería Pecuaria
Terrisoicaro | Víctor M. Rodríguez | 2008
Técnica: Litoespátula | 50 x 70 cm

Proceso editorial certificado con normas ISO desde 2005
Dictaminación y edición registradas en el Sistema Editorial Electrónico PRED
Registro: LI-004-21
Recibido: Junio de 2021
Publicado: Septiembre de 2022

IV.2. Beneficios de la *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles utilizados por ganado vacuno y su efecto en la emisión del óxido nitroso

Francisca Avilés Nova^{1*}
Tania Guadalupe Osorio Montor¹
Octavio A. Castelán Ortega²
Francisco Salazar Sperberg³

¹ Centro Universitario UAEM-Temascaltepec. Universidad Autónoma del Estado de México.
² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma del Estado de México.
³ Instituto Nacional de Investigación Agrícola. Remehue Chile.
*Autor de correspondencia: franavilesnova@yahoo.com.mx

Introducción

La emisión de gases efecto invernadero (GEI) y el consecuente cambio climático son, en la actualidad, un tema de amplio interés mundial. En particular, los países agrícolas y ganaderos presentan la problemática de emisiones de GEI como consecuencia de esa actividad productiva. Las emisiones por ganadería son provocadas por la fermentación entérica, los desechos de animales y el cambio en el uso de la tierra (FAO, 2018). Los principales GEI emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2013). El N₂O y el CH₄ poseen un poder de calentamiento 298 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ en un escenario proyectado a 100 años (IPCC, 2013). De acuerdo a la FAO (2019) las cadenas de producción ganadera en el año 2010 emitieron globalmente un total de 8 100 gigatoneladas de CO₂eq, donde el ganado vacuno es el mayor emisor de GEI con alrededor de 5 000 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), que representan el 62% del total de emisiones del sector ganadero.

La adaptación de los sistemas de producción agrícola y pecuaria a los cambios ambientales y la mitigación de las emisiones de GEI son acciones urgentes para confrontar el proceso climático y las limitaciones del clima. Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa para convertir a la ganadería en una práctica sostenible, mejorar la productividad y rentabilidad, al promover mejor uso de los recursos naturales y aportar alternativas de adaptación al cambio climático (Sotelo *et al.*, 2017a). Los SSP combinan gramíneas, leguminosas, leñosas arbóreas y ganado, brindan diferentes beneficios como disminución de la aplicación de insumos externos, fijación de nitrógeno a nivel edáfico, bienestar animal, ciclos productivos cortos y dietas con mejor calidad (Sotelo *et al.*, 2017b).

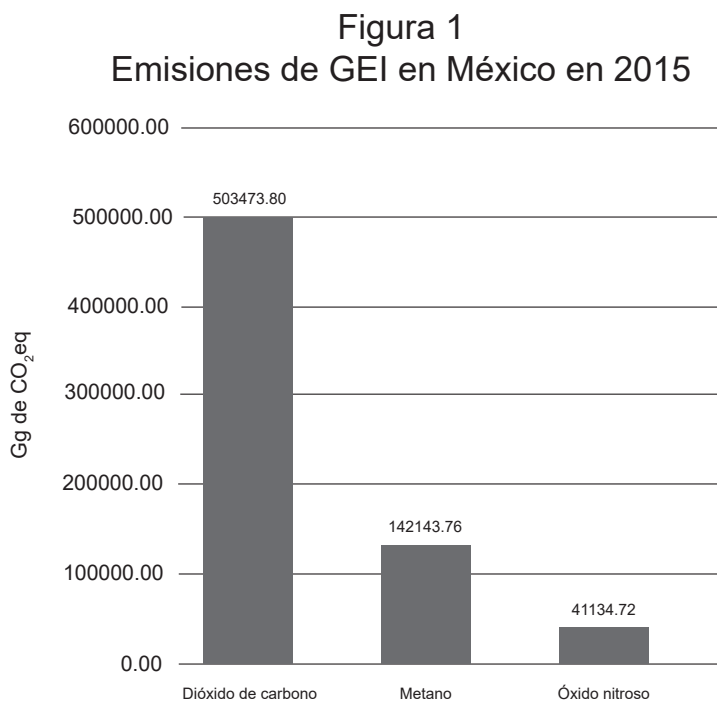
Rochette y Janzen (2005) mencionaron que es importante considerar que la inclusión de especies leguminosas en los SSP, como estrategias de mitigación de GEI, puede

ser cuestionado, argumentando que los procesos de nitrificación/desnitrificación del N excretado en heces y en orina y por el N del suelo mediante fijación biológica, incrementan la entrada de N₂ en el suelo produciendo incremento en las emisiones de N₂O a la atmósfera y, en consecuencia, un aumento de las emisiones de GEI totales. Sin embargo, aun hoy es escasa la bibliografía científica disponible sobre el efecto real que tiene la utilización de las plantas leguminosas en las emisiones finales de N₂O.

El objetivo del capítulo es revisar los beneficios de la *Leucaena* en los sistemas silvopastoriles utilizados por ganado vacuno, así como los mecanismos de formación y las fuentes de emisión de N₂O en los SSP. Lo anterior a través de la consulta de artículos científicos, capítulos y enciclopedias, en bases de datos como *Scielo*, *Science Direct*, *ResearchGate* y *Google Académico*, publicados durante los años 1985-2020.

El gas efecto invernadero, óxido nitroso

El N₂O es uno de los GEI más importantes con potencial de calentamiento global de 298 CO₂eq para un horizonte temporal de cien años. La concentración de N₂O en la atmósfera aumentó a una tasa de 0.73 ±0.03 ppb/año durante las últimas tres décadas, principalmente debido a reacciones de nitrificación y desnitrificación del nitrógeno reactivo en los suelos y en el océano (Barbera *et al.*, 2018). Las emisiones de GEI reportadas en el territorio mexicano en el 2015, originadas por las actividades antropogénicas corresponden a 700 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente de gases efecto invernadero (GEI), que incluye las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, y hexafluoruro de azufre. El análisis de la tendencia a lo largo del tiempo muestra que entre 1993 y 2015, México incrementó sus emisiones en un 57% (INECC, 2018). La emisión por gas en México en 2015, según el Protocolo de Kioto, se presentan en la figura 1.



Fuente: INECC (2018).

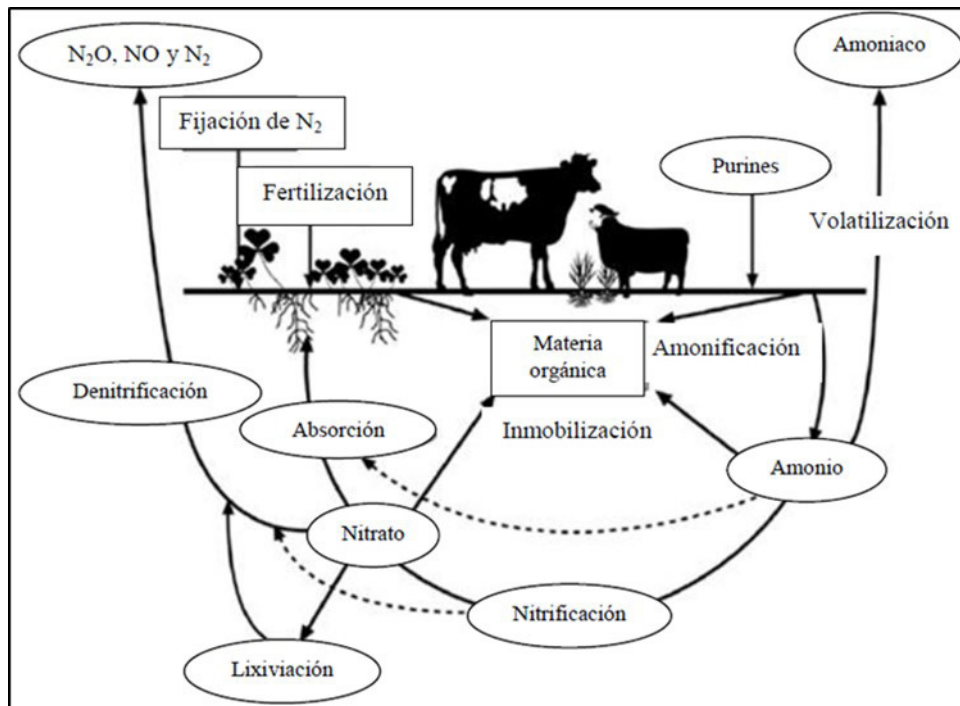
El sector ganadero en México emite 66 131.52 Gg de CO₂eq de CH₄, 4 436.08 Gg de CO₂eq de N₂O y 70 567.60 Gg de CO₂eq netas. Dentro de este sector, el ganado bovino emite 50 121.38 Gg de CO₂eq de CH₄, sin aplicar para los demás gases (INECC, 2018).

Mecanismos de formación del óxido nitroso (N₂O)

Ciclo de emisión del óxido nitroso

La emisión del N₂O en los SSP puede ingresar en el suelo desde la atmósfera mediante la deposición seca y húmeda, por fijación y por fertilizantes orgánicos y sintéticos (Verhulst *et al.*, 2015). El ciclo del N, a nivel de suelo, implica una serie de procesos como la fijación, mineralización, nitrificación, desnitrificación y volatilización (figura 2). La producción de N₂O ocurre como resultado de la actividad microbiana, durante los procesos de nitrificación como de desnitrificación.

Figura 2
Ciclo del N en pasturas



Fuente: Adaptado de Sagar *et al.* (2013).

Proceso de nitrificación

La nitrificación consiste en la oxidación del amonio (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) vía NH₂OH, y luego a nitrato (NO₃⁻). Es un proceso aeróbico que produce N₂O como subproducto. Este proceso es generado por una amplia variedad de bacterias autotróficas capaces de obtener energía a partir de estas reacciones.

Proceso de desnitrificación

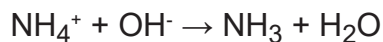
La formación de N₂O por desnitrificación es el proceso por el cual el nitrato (NO₃⁻) y el nitrito (NO₂⁻) son reducidos para dar óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y dinitrógeno (N₂).

En este caso el proceso es anaeróbico, requiere carbono reducido como suplemento de energía y NO₃⁻ como sustrato. Esta transformación se realiza por microorganismos anaeróbicos facultativos que, al momento de no haber oxígeno disponible, utiliza al NO₃⁻ como aceptor terminal de electrones. El pH óptimo para este proceso es de 7.0-8.0 (Hayatsu *et al.*, 2008).

Mineralización, volatilización y lixiviación

La descomposición de la materia orgánica convierte parte del N orgánico en N mineral, de allí el término mineralización, denominación que se aplica a los iones amonio, NH₄⁺, nitrito NO₂⁻ y nitrato NO₃⁻. El N mineral, principalmente amonio y nitrato, es absorbido por las plantas o asimilado por los microorganismos y convertido a N orgánico.

El proceso de volatilización es la pérdida de gas amoníaco desde el suelo bajo condiciones alcalinas, los iones amonio son convertidos a moléculas de amoníaco (NH₃) en solución las cuales después pueden ser liberadas a la atmósfera del suelo:



Este proceso es estrictamente químico y no hay intervención de microorganismos. La lixiviación del nitrato es el proceso por el cual el nitrato se pierde desde el suelo por flujo de masa a las aguas de drenaje. El nitrato no es adsorbido por las partículas del suelo a menos de que ellas generen cargas positivas (ejemplo, suelos ácidos de origen volcánico, y húmedos del trópico) (Portalfrutícola, 2017).

Estos procesos ocasionan la salida del N del sistema: la lixiviación de nitratos, la nitrificación y la desnitrificación, vía emisiones gaseosas de N₂O, NO y N₂, y la volatilización de NH₃ (Hayatsu *et al.*, 2008; Verhuls *et al.*, 2015).

Factores que determinan las emisiones de N₂O en el sistema silvopastoril

Dentro del SSP la mayor fuente de N₂O es debido a las excreciones de estiércol y de orina por parte de los animales a través de los cuales se eliminan entre el 75 y el 90% del N consumido por los animales en pastoreo (Li *et al.*, 2015). La nitrificación y desnitrificación están influenciados por factores climáticos: temperatura y precipitación y del suelo (características físicas y químicas).

La producción de N₂O por parte del suelo dependerá de la disponibilidad de los sustratos para ambos procesos: NH₄⁺ para el caso de nitrificación, y NO₃⁻ para la desnitrificación. Los reguladores en ambos procesos son: presión parcial del oxígeno, temperatura, pH, humedad del suelo, salinidad y manejo del suelo. En lo que se refiere a la humedad del suelo, cuando el porcentaje del espacio poroso lleno con agua se mantiene por debajo del 40%, el proceso dominante es la nitrificación. Por encima del 60-70%, se limita la difusión de oxígeno, dando lugar a la desnitrificación. La emisión de N₂O aumenta con la temperatura (Saggar *et al.*, 2004). Todos estos factores están regulados por el clima, la vegetación, y por las propiedades físicas y condiciones químicas del suelo (Matthews *et al.*, 2010).

El factor hidrológico es el que mayor control ejerce sobre la emisión de N₂O. Los picos de emisión generalmente coinciden con mayor precipitación (Brumme *et al.*, 1999). El contenido de agua del suelo está influenciado por las condiciones de difusión de oxígeno disponible, lo cual controla la cantidad de N₂O producido (Robertson y Tiedje, 1987).

Beneficios de la *Leucaena* en los sistemas silvopastoriles

De acuerdo a Peri *et al.* (2016) los SSP con *Leucaena* pueden ser más productivos, rentables y sostenibles que el cultivo forestal especializado o la producción animal basada sólo en pastoreo de pastos debido a que ofrecen los siguientes beneficios: interacciones ecológicas positivas a través del incremento en la producción por unidad de área, mejor eficiencia en el uso de recursos, provisión de servicios ambientales (captura de carbono, fijación de nitrógeno, reciclaje de nutrientes, conservación del suelo, provisión de refugio para el ganado y mejora del bienestar animal) y producción de madera. Los sistemas silvopastoriles al integrar árboles, forrajes y ganado se consideran una práctica de manejo agroforestal que mejora la fertilidad del suelo y que recupera pastos degradados (Apolinario *et al.*, 2016; Vandermeulen *et al.*, 2018). Estos sistemas debido a que intercalan árboles o arbustos con pastos, aumentan la biomasa, lo que permite el almacenamiento de carbono e intensifica el ciclo de nutrientes, y esta práctica de manejo promueve la conservación de la biodiversidad al proporcionar hábitats para diferentes organismos y especies (López-Santiago *et al.*, 2019; Sá *et al.*, 2017).

Lok *et al.* (2006) evaluaron durante dos años el comportamiento de indicadores de la estabilidad del suelo en un sistema silvopastoril con novillas lecheras basado en *Cynodon nlemfuensis* y una mezcla de especies arbóreas: *Lysiloma bahamensis*, *Leucaena leucocephala*, *Albizia falcataria*, *Gmelina arborea*, *Azadirachta indica* y *Erythrina misonensis* y reportaron que mejoraron la estabilidad estructural del suelo, las condiciones de retención de humedad y el estado de agregación de sus partículas, así como la diversidad biológica.

Báez *et al.* (2021) destacan la importancia de la valoración económica ambiental de los sistemas silvopastoriles, como instrumento para lograr el manejo sostenible e integral de todos los componentes que conforman el ecosistema ganadero, de modo que sea posible lograr su resiliencia. Identificaron seis funciones ambientales que se agruparon de acuerdo con la teoría del valor económico total (VET) en: valor de uso directo: producción de leche, valor de uso indirecto: retención de carbono, fijación de nitrógeno, fertilidad del suelo y calidad del suelo, valor opcional: energía renovable y biodiversidad.

Producción animal

López-Vigoa *et al.* (2017) mencionan que los SSP con *Leucaena* en ambientes tropicales de América Latina y el Caribe pueden sostener cargas de 2 a 5 UA/ha, este intervalo es una mejoría con respecto a praderas de gramíneas tropicales. El consumo de follaje de *Leucaena* entre 1.5 y 2.3 kg de MS animal/día promueven la productividad de bovinos sin riesgo de efectos negativos (López *et al.*, 2015). Otros estudios señalan que con el uso de la *Leucaena*, en un SSP, se registraron producciones de 14 a 17 kg de leche vaca/día y 3 360 a 4 080 kg de leche/lactancia e intervalo entre partos no mayor a 14 meses (Sierra *et al.*, 2017; Sierra-Montoya *et al.*, 2017); y en un SSP banco de proteína con *Leucaena*,

con acceso de 3 h por día, novillos mostraron GDP mayor en 377 g/novillo a la registrada en los novillos pastando una pradera de *Megathyrus maximus* (guinea). En sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) gramíneas, leguminosas herbáceas y arbóreas con alta densidad (15 000 plantas/ha), la dieta ofrecida a bovinos, es de mejor calidad nutricional, al presentar mayor componente de leguminosas que de gramíneas, y se amplía la carga a 2.5 UA/ha y se reduce la oferta de forraje de 25-30 kg de MS/vaca/día (Hernández *et al.*, 2011). En Colombia bajo un SSPi con *Leucaena*, pasto estrella y árboles maderables, la cantidad de carne producida incrementó de 74 kg (peso vivo) ha/año a 1 060 kg/ha/año (Mahecha *et al.*, 2011). En México existen reportes de producción de carne de 456 kg/ha/año en pasturas mejoradas a 1 971 kg ha/año en un SSP con *L. leucocephala* (Sorlorio-Sánchez *et al.*, 2011).

Secuestro de carbono

Los SSP acumulan en el suelo carbono orgánico y recuperan el suelo. Contreras-Santos *et al.* (2020) evaluaron el potencial para incorporar carbono al suelo de cuatro sistemas silvopastoriles de diferente grado de complejidad estructural, frente a una pastura sin árboles (cuadro 1), en un sistema ganadero con carga animal de 4 animales/ha y densidad de 39 árboles/ha. Los resultados mostraron que en promedio los arreglos silvopastoriles presentaron una acumulación de carbono en el suelo que varía del 58.2 y 69.9% en comparación con el sistema tradicional. Esto demuestra los efectos benéficos de los SSP en el secuestro del carbono y representan una alternativa viable para mitigar los GEI, debido a su capacidad para capturar carbono atmosférico e inmovilizarlo en el suelo.

Lok *et al.* (2015) estudiaron el comportamiento del carbono almacenado en el suelo en tres tiempos y a diferente profundidad (0-15 cm, 15-30 cm, y 30-45 cm) de tres sistemas de pastizales: a) silvopastoril basado en *Megathyrus maximus* y *Leucaena leucocephala*; b) monocultivo de *Megathyrus maximus* y c) asociación de gramíneas con una mezcla de leguminosas rastreras. Además, reportan que a medida que se incrementó la profundidad de muestreo, en los tres sistemas, hubo tendencia a poseer valores menores de este indicador. Esto se relacionó con los contenidos de materia orgánica del suelo que disminuyen de manera natural con el incremento de la profundidad. Así mismo reportan que, con el aumento del tiempo de explotación, el sistema silvopastoril y el de mezcla de leguminosas incrementaron el carbono almacenado en el suelo (CAS) en la profundidad de 0 a 45 cm. En el primero de ellos fue de 54.4 a 65.3 t/ha, mientras que en el segundo varió de 50.6 a 60.4 t/ha. El sistema de monocultivo disminuyó el CAS, de 60.4 a 43.7 t/ha.

La utilización de *Leucaena leucocephala* en los SSP se maneja con éxito por el aporte nutricional, capacidad de fijación de nitrógeno, rápido crecimiento y adaptación al ramoneo; además, tiene efecto directo en la mitigación de las emisiones de N₂O del suelo (Murgueitio *et al.*, 2015). Sin embargo, existe escasa información que muestre que los sistemas silvopastoriles mitigan las emisiones de N₂O. En México no existen reportes de estudios realizados sobre la medición de la emisión de N₂O en sistemas silvopastoriles. Las emisiones de N₂O en los sistemas silvopastoriles pueden tener diferente origen siendo necesario conocer cuáles son las fuentes de emisión del N₂O en el sistema silvopastoril.

Cuadro 1
Carbono orgánico acumulado en el suelo (COS) en cuatro sistemas silvopastoriles en comparación con una pastura sin árboles

Sistema	t/ha de C
(Ps) Pastura sin árboles	38.30
(SSP1) Pastura + arbusto forrajero	65.10
(SSP2) Pastura + árboles forrajeros	60.60
(SSP3) Pastura + arbusto forrajero + árboles forrajeros	81.80
(SSP4) Pastura + arbusto forrajero + árboles forrajeros + árboles maderables	62.93

SSP1: Pasto establecido en los SSP; guinea (*Megathyrus maximus*) cv Mombasa; especies arbustivas: *leucaena* (*Leucaena leucocephala*) y totumo (*Crescentia cujete*); SSP2: especies arbóreas forrajeras: guácimo (*Guazuma ulmifolia*), cañafistula (*Cassia fistula*) y samán (*Albizia saman*); SSP3: SSP1 + SSP2; SSP4: árboles maderables: ceiba tolúa (*Pachira quinata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

Fuente: Contreras Santos *et al.* (2020).

Fuentes de emisión del N₂O en el sistema silvopastoril

Las fuentes principales de emisión del N₂O en un sistema silvopastoril a continuación se analizan.

Microfauna del suelo

Los estudios sobre los beneficios ambientales de los sistemas silvopastoriles demostraron que las existencias de C y N del suelo y la calidad química del suelo mejoran (Shibu y Dollinger, 2019; Lira *et al.*, 2020), pero estudios sobre la influencia de estos sistemas sobre la estructura del suelo y la diversidad microbiana son escasos. La síntesis de amoníaco monooxigenasa se lleva a cabo por bacterias oxidantes de amoníaco (BOA) y en arqueas (AOA).

Se demostró que AOA y BOA coexisten en la mayoría de los suelos agrícolas, aunque la población BOA parece ser responsable de la emisión de N₂O de la nitrificación bajo altos suministros de nitrógeno (Di *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2017). La disminución en las reservas de C y nutrientes, y la calidad y cantidad de materia orgánica del suelo MOS posterior a los eventos de cosecha de biomasa pueden tener efectos adversos en la estructura, tamaño y función de las comunidades microbianas (Colombo *et al.*, 2016; Foote *et al.*, 2015). Las comunidades microbianas son consideradas reguladoras de los ciclos de nutrientes por su intervención en el proceso de descomposición y porque controlan la disponibilidad de éstos para la vegetación, mediante la inmovilización o mineralización (Falkowski *et al.*, 2008). Sin embargo, la elevación del N causa efectos directos sobre la fisiología microbiana y sobre la actividad enzimática, que potencialmente explicarían la disminución en la mineralización (Noormets *et al.*, 2014). Entre los microorganismos del suelo destacan las bacterias basadas en el ciclo del N relacionado con la fijación biológica del N (BNF) y la nitrificación, donde el nitrógeno atmosférico (N₂) es convertido en

amonio (NH_4) por microorganismos diazotróficos (Ashworth *et al.*, 2015) y nitrificantes que oxidan secuencialmente el NH_4 a NO_3^- (Canfield *et al.*, 2010).

Se sabe que la cobertura vegetal y el manejo y las características fisicoquímicas son los principales factores responsables de las variaciones en la comunidad microbiana del suelo (Paz-Ferreiro y Fu, 2016; Qu *et al.*, 2016). Cubillos *et al.* (2016) observaron diferencias significativas en las estructuras de la comunidad bacteriana total de suelo y de bacterias oxidantes de amoníaco entre el manejo silvopastoril con una leguminosa (*Prosopis juliflora*) y un pastizal monocultivo en Colombia. Barros *et al.* (2018) observaron que la introducción de las leguminosas *Gliricidia sepium* y *Mimosa caesalpinifolia* en un sistema silvopastoril con *Brachiaria decumbens* cambió la estructura de la comunidad bacteriana total del suelo y bacteriana oxidante de amoníaco y se produjo mayor abundancia de diazótrofos.

Macrofauna del suelo

El deterioro de la calidad del suelo es uno de los problemas más graves que experimentan los sistemas de producción agropecuaria en los últimos años, debido fundamentalmente a prácticas agrícolas inapropiadas. Los problemas más significativos en la conservación del suelo a escala global, según la FAO (2016), son la erosión, la pérdida del carbono orgánico y el desequilibrio de los nutrientes. La ganadería tradicional se caracteriza por utilizar aquellos suelos de menor valor productivo y, por tanto, en ellos las características citadas se incrementan (Lok, 2016). En este sentido, Veresoglu *et al.* (2015) plantearon que la biodiversidad del suelo también debe ser considerada como guardián de la seguridad alimentaria y de los servicios de los ecosistemas frente al cambio climático, debido a que propicia una estructura más compleja y mucho más resistente.

Entender las funciones de la macrofauna edáfica permite determinar su aporte a la sostenibilidad, lo que la convierte en un indicador importante a nivel de sistema. La biota edáfica desempeña un papel importante en los procesos biogeoquímicos del suelo en los sistemas silvopastoriles, y sus funciones incluyen: la descomposición de la hojarasca, el reciclaje de nutrientes, la síntesis y la mineralización de la materia orgánica y la modificación de la estructura del suelo, entre otras; ello influye en la integridad y en la productividad del sistema (Sánchez *et al.*, 2011).

Chávez-Suárez *et al.* (2016) destacan la importancia de algunas clases y órdenes en la transformación del suelo (*Annelida: Oligochaeta*), en la formación de poros (*Insecta: Hymenoptera, e Isopoda*) y en la trituración de restos vegetales (*Coleoptera, Diplopoda, Isopoda, Gastropoda*). Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020) caracterizaron la composición trófica de la macrofauna del suelo en dos sistemas ganaderos convencionales y en dos sistemas silvopastoriles como banco de proteína (cuadro 2) y la diferencia entre sistemas estuvo marcada por el número de individuos encontrados en las familias *Formicidae* y *Termitidae* (4 150 y 2 126 individuos/m², respectivamente), las que representaron 54% del total de individuos presentes en el sistema silvopastoril. La composición de familias estuvo asociada a una funcionalidad relativa a cambios en la estructura del suelo, determinada por familias del grupo de ingenieros del suelo (*Formicidae, Termitidae, y Lumbricidae*). Le siguieron las que forman parte del gremio de depredadores (*Scolopendridae, Theraphosidae, Salticidae*, entre otras), lo que sugiere una presencia importante

de controladores biológicos en los SSP. La diferencia en la composición de las familias, en número como en la importancia de grupos funcionales entre sistemas, sugiere distintos niveles de activación biológica del suelo, con ventaja para el silvopastoril (Gutiérrez-Bermúdez *et al.*, 2020).

Cuadro 2

Clasificación taxonómica y rol trófico de la macrofauna edáfica de dos sistemas ganaderos: sistema ganadero convencional con gramíneas (SGC) y sistema silvopastoril (SSP) banco de proteína

Clase	Orden	Familia	Número de individuos		Rol trófico
			SGC	SSP	
<i>Clitellata</i>	<i>Haplotaxida</i>	<i>Lumbricidae</i>	144	768	Ingenieros
<i>Arachnida</i>	<i>Araneae</i>	<i>Salticidae</i>	75	227	Depredadores
		<i>Theraphosidae</i>	80	423	Depredadores
<i>Diplopoda</i>	<i>Scolopendromorpha</i>	<i>Scolopendridae</i>	102	522	depredadores
<i>Insecta</i>	<i>Blattodea</i>	<i>Blatellidae</i>	48	32	Ingenieros

Especies *Leucaena*, *Cratylia*, *Gliricidia*, *Guazuma* y *Moringa*.

Fuente: Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020).

La fijación de nitrógeno

La fijación biológica del N, en el suelo, hace referencia a la reducción de nitrógeno a amonio, la cual es efectuada por la alianza simbiótica de bacterias de vida libre de los géneros *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* y *Azorhizobium* con leguminosas (Fernández *et al.*, 2002). La presencia de leguminosas en los potreros tiene un efecto directo en la mitigación de las emisiones de N₂O del suelo al disminuir la disponibilidad de nitrato para la desnitrificación (Gallego-Castro *et al.*, 2014).

La leguminosa *Leucaena* puede fijar de 75 a 200 kilos de nitrógeno/ha/año permitiéndole buena adaptación aun en sitios con limitantes de nutrición y de humedad; es considerada como mejoradora de la fertilidad del suelo (González, 2018). Bueno y Camargo (2015) mencionan que los contenidos de N amoniacal y total en el suelo incrementan hasta 249.31 kg/ha/año de N en SSP de *Leucaena leucocephala* con densidad de 10 000 plantas/ha, donde la cantidad inicial de N total en el suelo antes de establecer *Leucaena* era de 88.86 kg/ha y en la semana 28, después de la siembra, los promedios de N en el suelo eran de 175 kg/ha y 162 kg/ha a 25 y 50 cm de profundidad, respectivamente, en el suelo, lo cual muestra que el sistema silvopastoril basado en leguminosas arbóreas aumenta el contenido de nitrógeno (N) del suelo por fijación biológica (Apolinario *et al.*, 2015); por lo tanto, es una actividad de conservación y de recuperación ambiental efectiva.

Las características fisicoquímicas (pH, humedad y temperatura) del suelo

La producción de N_2O en los suelos es un proceso complejo controlado directa e indirectamente por parámetros edafoclimáticos como el pH del suelo, la temperatura y el contenido de agua, la textura y estructura de los agregados del suelo (Liu *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2016). Las bajas temperaturas aumentan la acumulación de materia orgánica en el suelo, mientras que las altas ($25\text{ }^\circ\text{C}$) favorecen el crecimiento y el metabolismo microbiano de bacterias (desnitrificantes y nitrificantes), así como la mineralización de la materia orgánica (Braker *et al.*, 2010). Además, la compactación del suelo puede ocasionar también reducción de la biomasa de raíces y menor absorción de N, lo cual aumenta el potencial de pérdidas de N del ecosistema, a través de la lixiviación y desnitrificación.

Asimismo, las labores culturales de los suelos afectan algunos mecanismos de estabilización física de nutrientes en los agregados, porque dejan expuesta la materia orgánica del suelo (MOS) ocluida al ataque microbiano e incrementan la pérdida de nutrientes provocada por los procesos de descomposición y de mineralización (Jia *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017).

El ganado: carga animal y excretas

En la ganadería de pastoreo existen grandes ingresos de nitrógeno al suelo en forma de excretas (heces y orina), debido al bajo aprovechamiento de las proteínas en el sistema digestivo de rumiantes (McSweeney *et al.*, 2001). La deposición de éstos en puntos de alta concentración de N en el suelo permite procesos de nitrificación y desnitrificación, lo que fácilmente se podría traducir en la pérdida de N como N_2O , principalmente el nitrógeno (N) procedente de la orina debido a su alta susceptibilidad a la degradación (Luo *et al.*, 2010).

Según el IPCC (2006), el total de N excretado por unidad animal (U.A), en Sudamérica, se estima en 162 g de N/día. Las emisiones directas de N_2O de las excreciones bovinas (heces y orina) equivalen al 2% del N presente en las excretas. 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 UA/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 kg de N- N_2O o 0.39 kg N_2O /ha/año. La emisión de N_2O por parte de los parches de orina se da gracias al aumento de nitrito, y puede ser explicada por la desnitrificación química, una reacción que ocurre entre compuestos menores de la orina (aminoácidos) y los constituyentes del suelo.

Las pérdidas de N como N_2O y otras formas como NO_3^- por lixiviación o NH_3 por volatilización, lo convierten en un nutriente limitante en los suelos agrícolas, además es probable que el N se encuentre en formas no disponibles para las plantas o que simplemente no se encuentre en el suelo, limitando el potencial productivo de los sistemas agropecuarios (Follet, 2001; Van Groenigen *et al.*, 2015).

Según Naranjo *et al.* (2012), conforme se aumenta la carga animal (UA/ha) de sistemas extensivos de praderas degradadas a sistemas silvopastoriles intensivos SPPI, los flujos de emisiones de N_2O debidas a heces y a orinas también aumentan pasando de 355.2 a 1 230 kg CO_2eq ha/año. Según Parra-Silva (2015), los flujos de las emisiones to-

tales en sistemas ganaderos de una zona Andina de Nariño, se vieron influenciados por la carga animal por hectárea.

La Leucaena leucocephala en los SSP

Naranjo *et al.* (2012) evaluaron, en Colombia, las emisiones de óxido nitroso en SSPi intensivos con *Leucaena*, donde tomaron tres escenarios de referencia (cuadro 3). El sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena* de más de 10 000 plantas/ha y el sistema silvopastoril intensivo + maderable (500 árboles/ha de *Eucalyptus*) presentaron mayores emisiones de N₂O (1 230.0 CO₂eq ha/año) relacionado con heces y orina excretada por animales en pastoreo.

Para construir una base de datos global de flujos de emisiones de N₂O se necesitan mediciones extensas y confiables de las emisiones de N₂O en las condiciones diferentes de suelos, así como el manejo de cultivos. Ésta es esencial para probar y desarrollar modelos de emisión. Esta información también ayudará a mejorar los inventarios y a desarrollar estrategias de mitigación con el objetivo de reducir la liberación N₂O a la atmósfera (Longoria-Ramírez *et al.*, 2003).

Cuadro 3

Emisiones de N₂O en los diferentes escenarios de pastoreo de referencia

Fuente	Escenario de pastoreo de referencia							
	PD	%	PM	%	SSPi	%	SSPi + Maderable	%
Fertilización con N sintético (200 kg N/ha/año)	0	0	876.9	13.3	0	0	0	0
Fijación biológica de N	0	0	0	0	876.9	11.0	876.9	11.0
Heces y orina	355.2	17.0	961.1	14.9	1 230.0	15.0	1 230.0	15.0

PD=Pasturas degradadas (pasturas nativas, productividad de biomasa de 7.0 t/MS/ha/año y carga animal/ha de 0.85 UA [UA=450 kg peso]); PM= pasturas mejoradas (productividad vegetal máxima de 19.2 t MS/ha/año y fertilización anual de 200 kg N/ha/año y 2.3 UGG/ha); SSPi=Sistema silvopastoril intensivo (densidad de más de 10 000 plantas /ha con *Leucaena*, asociada con pastos mejorados de alta producción de biomasa (20 t MS/ha/año) bajo pastoreo rotacional intensivo); SSPi + maderable= (igual que el SSPi, con 500 árboles maderables/ha de *Eucalyptus tereticornis*).

Fuente: Naranjo *et al.* (2012).

Métodos de medición del GEI óxido nitroso en suelos agrícolas

La precisión de las mediciones de GEI es crucial para actualizar y para mejorar los actuales inventarios de gases de efecto invernadero que cada país necesita para desarrollar su plan de mitigación y reducción de emisiones. La metodología para la medición de GEI *in situ* se divide en dos técnicas, que son las más usadas: técnicas basadas en cámaras dinámicas que integran un analizador de gases y sofisticado sistema automatizado que minimiza los errores de muestreo, sin embargo, los costos de operación las hacen menos accesibles; y cámaras estáticas cerradas, que poseen un diseño de bajo costo, sencillo y

práctico para trabajo en campo y las técnicas basadas en herramientas micro meteorológicas o Eddy Covarianza y como complemento de modelación ambiental (Alfaro y Muñoz, 2012; Jones *et al.*, 2011).

El uso de cámaras estáticas de medición de GEI puede emplearse para estimar el efecto en las emisiones del uso de distintas alternativas de fertilización orgánica e inorgánica o de sistemas de pastoreo tradicionales o como el SSPi. Estas cámaras se insertan en el suelo, y a través de un sistema de cierre hermético y jeringas colectoras permiten tomar muestras de aire en periodos de tiempo determinados, evaluando así la acumulación de los GEI (figura 3 [Alfaro y Muñoz, 2012]).

Procesos que mitigan o inhiben la producción de N₂O

Durango *et al.* (2017) mencionan que la mitigación de la producción de los gases de efecto invernadero representa un reto para la actividad agrícola en todo el mundo, para lo cual se depositan los mayores esfuerzos en la búsqueda de estrategias para reducir dichas emisiones que van encaminadas directamente hacia un manejo adecuado de las praderas hacia el mejoramiento de la calidad de los pastos, así como diseñar prácticas que mejoren las condiciones físico-químicas del suelo, ya que éstos son factores claves para la sostenibilidad dentro de los sistemas agropecuarios. Existen varias opciones de manejo que posibilitan la mitigación de la emisión de N₂O por parte de las pasturas destinadas al pastoreo, como el uso de inhibidores de los procesos de producción de N₂O, uso de fertilizantes de lenta liberación y manejo del pastoreo (Singurindy *et al.*, 2009).

Figura 3

Cámaras estáticas empleadas para la determinación de las emisiones de GEI en praderas:

A) cámara abierta.

B) cámara cerrada durante el muestreo



Fuente: Alfaro y Muñoz (2012).

Reflexión final

Entre los beneficios de la *Leucena leucocephala* en los suelos de los sistemas silvopastoriles destacan la mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo y la mayor activación biológica debido al rol trófico de la macrofauna edáfica. En los animales es claro que mejoran la producción de carne y de leche, al ofrecer una dieta diversa y rica en nutrientes, principalmente proteína. Así, es importante señalar la necesidad de desarrollar investigaciones futuras bajo un enfoque transdisciplinario e integral para abordar la problemática de la emisión de GEI, y del óxido nitroso en los sistemas ganaderos.

Sin embargo, también es importante considerar que en los sistemas silvopastoriles con *Leucaena* bajo pastoreo de ganado vacuno existen fuentes de emisión de N_2O , debido a los grandes ingresos de nitrógeno al suelo en forma de excretas (heces y orina), ocasionado por el bajo aprovechamiento de las proteínas en el sistema digestivo de rumiantes. La deposición de estos puntos (mancha de orina) de alta concentración de N en el suelo permite procesos de nitrificación y desnitrificación, lo que se traduce en la pérdida de N como de N_2O . En esta revisión se documentó que, al aumentar la carga animal en los SSPi, los flujos de emisión de N_2O , debido a heces y a orina, incrementan. Así mismo los SSPi con más de 10 000 plantas/ha utilizados con animales en pastoreo presentan mayor emisión de N_2O relacionado con heces y orina. Existen varias opciones de manejo de los sistemas silvopastoriles que posibilitan la mitigación de la emisión de N_2O por parte de las pasturas destinadas al pastoreo.

Estas estrategias se enfocan en los diferentes procesos del sistema silvopastoril: nutrición animal, sistema de pastoreo: rotacional y disminución de horas de pastoreo en arreglos en bancos de proteína. Control de las horas de consumo animal en pradera de alta densidad de plantas leguminosas (>10 000 árboles leguminosos/ha) y el uso de inhibidores de los procesos de producción de N_2O .

Pero es necesario realizar mediciones extensas y confiables de las emisiones de N_2O para construir una base de datos de los flujos de emisión de los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* y crear inventarios regionales, bajo condiciones diferentes de suelos, de clima, densidades de árboles, arreglos de árboles en el sistema, así como del manejo. Esta información también ayudará a mejorar los inventarios y a desarrollar estrategias de mitigación con el objetivo de reducir la liberación N_2O a la atmósfera.

Aspectos destacados

1. Se analizan los mecanismos de formación del GEI N_2O en el suelo de los sistemas silvopastoriles pastoreados por bovinos.
2. Se revisan los factores que determinan las emisiones de N_2O en el sistema silvopastoril y las fuentes de emisión.
3. Se nombran las técnicas de medición del GEI N_2O , para obtener referentes y/o factores de emisión en estos sistemas.

Literatura citada

- Alfaro, M. y Muñoz, C. (2012). Ganadería y gases de efecto invernadero. Informativo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Remehue. http://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc08150d1724.pdf
- Apolinário, V.X.O.; Dubeux, J.C.B.; Lira, M.A.; Ferreira, R.L.C.; Mello, A.C.L.; Coelho, D.L.; Muir, J.P. y Sampaio, E.V.S.B. (2016). Decomposition of arboreal legume fractions in a silvopastoral system. *Crop Science*. 56: 1356–1363. DOI: 10.2135/cropsci2015.09.0588
- Apolinário, V.X.O.; Dubeux, J.C.B.; Lira, M.A.; Ferreira, R.L.C.; Mello, A.C.L.; Santos, M. V.F.; Sampaio, E.V.S.B. y Muir, J.P. (2015). Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warm-climate silvopasture systems. *Agronomy Journal*. 107: 1915–1921. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0624>
- Ashworth, A.J.; West, C.P.; Allen, F.L.; Keyser, P.D.; Weiss, S.A.; Tyler, D.D.; Taylor, A. M.; Warwick, K.L. y Beamer, K.P. (2015). Biologically fixed nitrogen in legume intercropped systems: comparison of nitrogen-difference and nitrogen-15 enrichment techniques. *Agronomy Journal*. 107: 2419–2430. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0639>
- Báez, N.; Lok, S. & Gómez C. (2021). Determinación del valor económico ambiental de una lechería típica tropical de Mayabeque, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 55 (2). <http://www.cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/1012>
- Barbera, A.C.; Vymazal, J. y Maucieri, C. (2018). Greenhouse Gases Formation and Emission. Encyclopedia of Ecology (Second Edition). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10895-4>
- Barros, F.M. do R.; Fracetto, G.G.M.; Fracetto, F.J.C.; Mendes, J.J.P.; Araújo, V.L.V.P. De. y Lira, J.M.A. (2018). Silvopastoral systems drive the nitrogen-cycling bacterial community in soil. *Cienc. Agrotec.* 42(3): 281–290. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018423031117>
- Braker, G.; Schwarz, J. y Conrad, R. (2010). Influence of temperature on the composition and activity of denitrifying soil communities. *Federation of European Microbiological Societies*. 73(1): 134–148. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00884.x>
- Brumme, R.; Borken, W. y Finke, S. (1999). Hierarchical control on nitrous oxide emission in forest ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*. 13(4): 1137–1148. <https://doi.org/10.1029/1999GB900017>
- Bueno, L.L. y Camargo, G.J. (2015). Nitrógeno edáfico y modulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica*. 64(4): 349–354. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>
- Canfield, D.E.; Glazer, A.N. y Falkowski, P.G. (2010). The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*. 330: 192–196. <https://doi.org/10.1126/science.1186120>
- Chávez-Suárez, L.; Labrada, H.Y. y Álvarez, F.A. (2016). Macrofauna del suelo en ecosistemas ganaderos de montaña en Guisa, Granma, Cuba. *Pastos y Forrajes*. 39(3): 111–115. <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269148030005.pdf>
- Colombo, F.; Macdonald, C.A.; Jeffries, T.C.; Powell, J.R. y Singh, B.K. (2016). Impact of forest management practices on soil bacterial diversity and consequences for soil processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 94: 200–210. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.11.029
- Contreras-Santos, J.L.; Martínez-Atencia, J.; Cadena-Torres, J. y Falla-Guzmán, C.K. (2020). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del caribe colombiano. *Agronomía Costarricense*. 44(1): 29–41. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/39999/40540>
- Cubillos, A.M.; Vallejo, V.E.; Arbeli, Z.; Terán, W.; Dick, R.P.; Molina, C.H.; Molina, E. y Roldan, F. (2016). Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. *European Journal of Soil Biology*. 72: 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.003>
- Di, H.J.; Cameron, K.C.; Sherlock, R.R.; Shen, J.P.; He, J.Z. y Winefield, C.S. (2010). Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia-oxidizing bacteria and archaea. *Journal of Soils and Sediments*. 10: 943–954 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0174-x>
- Duan, Y.F.; Kong, X.W.; Schramm, A.; Labouriau, R.; Eriksen, J. y Petersen, S.O. (2017). Microbial N transformations and N₂O emission after simulated grassland cultivation: effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Appl. Environ. Microbiol.* 83(1): doi: 10.1128/AEM.02019-16

- Durango, S.; Gaviria, X.; Gonzalez, R.; Sotelo, M.; Gutierrez, J.; Chirinda, N.; Arango, J. y Barahona, R. (2017). Iniciativas de mitigación al cambio climático en sistemas de producción de carne bovina en países tropicales. CCAFS Info Note. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Falkowski, P.G.; Fenchel, T. y Delong, E.F. (2008). The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles. *Science*. 320(5879): 1034 –1039. doi: 10.1126/science.1153213
- FAO (2016). Estado mundial del recurso suelo. Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- FAO (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/I8098ES/i8098es.pdf>
- FAO (2019). GLEAM 2.0 - Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/gleam/results/es/>
- Fernández, P.M.; Nuria de, M. y de Felipe, M. R. (2002). Fijación biológica del nitrógeno: factores limitantes. Ciencia y Medio Ambiente - Segundas jornadas científicas sobre medio ambiente del CCMA- CSIC.
- Follet, R.F. y Hatfield J.L. (2001). Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management. In Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. *TheScientificWorld*, 1: 920-926. DOI 10.1100/tsw.2001.269
- Foote, J.A.; Boutton, T.W. y Scott, D.A. (2015). Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *Forest Ecology and Management*. 355: 48–57. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.036
- Gallego-Castro, L.A.; Mahecha-Ledesma, L. y Angulo-Arizala, J. (2014). Potencial forrajero de *Tithonia diversifolia* Hemsl. A Gray en la producción de vacas lecheras. *Agronomía Mesoamericana*. 25(2): 393-403. DOI 10.15517/am.v25i2.15454
- González, M. (2018). Leguminosas arbóreas para optimizar la producción de leche y carne. Zootecnia y Veterinaria es mi Pasión. <https://zoovetespasion.com/pastos-y-forrajes/leguminosas-arboreas-para-optimizar-la-produccion-de-leche-y-carne/> (Consultado 8 diciembre 2018).
- Gutiérrez-Bermúdez, C.C.; Mendieta-Araica, B.G. y Noguera-Talavera, Á. (2020). Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el corredor seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*. 43(1): 32-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086403942020000100032&lng=en.
- Hayatsu, M.; Tago, K. y Saito, M. (2008). Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*. 54(1): 33-45. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00195.x>
- Hernández, D.; Carballo, M. y Reyes, F. (2011). *Manejo racional de una multisociación árboles-pastos*. En: Milagros Milera, ed. André Voisin. Experiencia y aplicación de su obra en Cuba. Matanzas, Cuba: EEPF Indio Hatuey. Pp. 513-535.
- INECC (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Resumen Informativo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). Agriculture, Forestry and Other Land Use. En H.S. Eggleston, L. Buendía, L.K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe (eds). Hayama, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japón: The Intergovernmental Panel on Climate Change. Institute for Global Environmental Strategies (Iges). 595p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Cambio climático 2013 - La base de las ciencias físicas: Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017 / CBO9781107415324
- Jia, J.; Yu, D.; Zhou, W.; Zhou, L.; Bao, Y.; Meng, Y. y Dai, L. (2015). Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*. 35(2): 1–7. doi: 10.1016/j.chnaes.2014.03.008
- Jones, S.K.; Famulari, D.; Di Marco, C.F.; Nemitz, E.; Skiba, U.M.; Rees, R.M. y Sutton, M.A. (2011). Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber

- measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 4(10): 2179-2194. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2179-2011>, 2011
- Li, J.; Luo, J.; Shi, Y.; Houlbrooke, D.; Wang, L.; Lindsey, S. y Li, Y. (2015). Nitrogen gaseous emissions from farm effluent application to pastures and mitigation measures to reduce the emissions: a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research.* 58(3): 339–353. <http://dx.doi.org/10.1080/00288233.2015.1028651>
- Lira, M.A.; Nascimento, L.R. y Fracetto, G.G. (2015). Legume-rhizobia signal exchange: promiscuity and environmental effects. *Front. Microbiol.* 6: 945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00945>.
- Liu, R.; Hayden, H.; Suter, H.; He, J. y Chen, D. (2015). The effect of nitrification inhibitors in reducing nitrification and the ammonia oxidizer population in three contrasting soils. *J. Soils Sediments.* 15: 1113–1118. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1086-6>
- Lok, S.; Crespo, G.; Frometa, E. y Fraga, S. (2006) Estudio de indicadores de estabilidad del pasto y el suelo en un sistema silvopastoril con novillas lecheras. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola.* 40(2): 229-239. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017714014>
- Lok, M.S. (2016). Soils dedicated to cattle rearing in Cuba: Characteristics, management, opportunities and challenges. En *Cuban Journal of Agricultural Science.* 50(2): 279-290. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S207934802016000200013yInglng=esytInglng=en
- Lok, S.; Díaz, J.; Crespo, G. & Torres, V. (2015). “Servicios ambientales generados por la aplicación de tecnologías ganaderas en sistemas agropecuarios tropicales”. In: VIII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, La Habana, Cuba: Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura y Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, ISBN: 978-959-296-039-8.
- Longoria-Ramírez, R.; Carbajal-Benítez, G.; Mar-Morales, B.E. y Ruíz-Suárez, G. (2003). Nitrous oxide flux in maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during “El Niño” year 1998. *Atmósfera.* 16(4): 231-244. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8515/7985>
- López, O.; Lamela, L.; Montejo, L.L. y Sánchez, T. (2015). Influencia de la suplementación con concentrado en la producción de leche de vacas Holstein x Cebú en silvopastoreo. *Pastos y Forrajes.* 38(1): 46-54. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269138824005>
- López-Santiago, J.G.; Casanova-Lugo, F.; Villanueva-López, G.; Díaz-Echeverría, V.F.; Solorio-Sánchez, F.J.; Martínez-Zurimendi, P.; Aryal, D.R. y Chay-Canul, A.J. (2019). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforest. Syst.* 93: 199–211. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>
- Lopez-Vigoa, O.; Sánchez-Santana, T.; Iglesias-Gómez, J.M.; Lamela-López, L.; Soca-Pérez, M.; Arece-García, J. y Milera-Rodríguez, M. de la C. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes.* 40(2): 83-95. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0864-03942017000200001yInglng=esynrm=iso
- Luo, J.; de Klein, C.A.M.; Ledgard, S.F. y Saggar, S. (2010). Management options to reduce nitrous oxide emissions from intensively grazed pastures: a review. *Agriculture Ecosystems y Environment.* 136(3-4): 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.12.003>
- Mahecha, L.; Murgueitio, M.; Angulo, J.; Olivera, M.; Zapata, A.; Cuartas, C.A.; Naranjo, J.F., y Murgueitio, E. (2011). Desempeño animal y características de la canal de dos grupos raciales de bovinos doble propósito pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.* 24: 470.
- Matthews R.A.; Chadwick, D.R.; Retter A.I.; Blackwell, M.S.A. y Yamulki, B. (2010). Nitrous oxide emissions from small scale farmland features of UK livestock farming systems. *Agriculture, Ecosystems y Environment.* 136: 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.011>
- McSweeney, C.S.; Palmer, B.; McNeill, D.M. y Krause, D.O. (2001). Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. *Animal Feed Science and Technology.* 91(2): 83-93. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2)
- Murgueitio, E.; Flores, M.; Calle, Z.; Chará, J.; Barahona, R.; Molina, C. y Uribe, F. (2015). Productividad en sistemas silvopastoriles intensivos en América Latina. Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H. y Eibl, B. (eds.), *Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie Técnica.* Informe Técnico 402. Editorial CIPAV. Cali, Colombia. Pp. 59-101.

- Naranjo, J.F.; Cuartas, C.A.; Murgueitio, E.; Chará, J. y Barahona, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*. 24(8).
- Noormets, A.; Epron, D.; Domec, J.C.; McNulty, S.G.; Fox, T.; Sun, G. y King, J.S. (2014). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*. 355: 124–140. doi: 10.1016/j.foreco.2015.05.019
- Parra-Silva, A. (2015). Greenhousegas balance in the conversion from extensive pasture to other agricultural systems in Andean region of Colombia. *Environment Development and Sustainability*. 21(4): 1-14. DOI: 10.1007/s10668-017-0034-6
- Paz-Ferreiro, J. y Fu, S. (2016). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation y Development*. 27(1): 14–25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>
- Peri, P.L.; Dube, F. y Varella, A. (2016). Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: An overview. En: Peri, P.L., Dube, F. y Varella, A. (eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Chapter 1, Advances in Agroforestry. Springer International Publishing, Switzerland. Pp 1–8.
- Portalfruticola (2017). El ciclo del nitrógeno en el suelo y su importancia en la fertilización vegetal. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/10/23/el-ciclo-del-nitrogeno-en-el-suelo-y-su-importancia-en-la-fertilizacion-vegetal/> (Consultado 15 febrero 2021).
- Qu, T.; Du, W.; Yuan, X.; Yang, Z.; Liu, D.; Wang, D. y Yu, L. (2016). Impacts of grazing intensity and plant community composition on soil bacterial community diversity in a steppe grassland. *PLoS One*. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159680>
- Robertson, G.P. y Tiedje, J.M. (1987). Nitrous oxide sources in aerobic soils: nitrification, denitrification and other biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 19(2): 187-193. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90080-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90080-0)
- Rochette, P. y Janzen, H.H. (2005). Towards a Revised Coefficient for Estimating N₂O Emissions from Legumes. En *Nutr Cycl Agroecosyst*. 73: 171–179. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-0357-9>
- Sá, J.C. de M.; Lal, R.; Cerri, C.C.; Lorenz, K.; Hungria, M. y de Faccio Carvalho, P.C. (2017). Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ. Int*. 98: 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>
- Saggar, S.; Andrew, R.; Tate, K.; Hedley, C.; Rodda, N. y Townsend, A. (2004). Modelling nitrous oxide emissions from New Zealand dairy grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 68(3): 243-255. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000019463.92440.a3>
- Saggar, S.; Jha, N.; Deslippe, J.; Bolan, N.S.; Luo, J.; Giltrap, D.L. y Tillman, R.W. (2013). Denitrification and N₂O: N₂ production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of the Total Environment*. 465(1): 173-195. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.050
- Sánchez, S.; Milera, M.; Hernández, M.; Crespo, G. y Simón, L. (2011). La macrofauna y su importancia en los sistemas de producción ganaderos. En Milagros Milera, André Voisin (ed.), *Experiencia y aplicación de su obra en Cuba*. Matanzas, Cuba: EEPF Indio Hatuey. Pp. 316-348.
- Shi, X.; Hu, H.; He, J.; Chen, D. y Suter, H. (2016). Effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrification and the abundance and community composition of soil ammonia oxidizers in three land uses. *Biol Fertil Soils*. 52: 927–939. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1131-7>
- Shibu, J. y Dollinger, J. (2019). Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*. 93: 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00366-8>
- Sierra, M.E.; Chará, J.D. y Barahona-Rosales, R. (2017). The nutritional balance of early lactation dairy cows grazing in intensive silvopastoral systems. *Ciência Animal Brasileira*. 18: 1-12. <http://dx.doi.org/10.1590/1089-6891v18e-40419>
- Sierra-Montoya, E.; Barahona-Rosales, R. y Ruiz-Cortés, Z.T. (2017). Reproductive behavior of crossbred dairy cows grazing an intensive silvopastoral system under tropical dry forest conditions. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. 69(1): 1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-8712>
- Singurindy, O.; Molodovskaya, M.; Richards, B.K. y Steenhuis, T.S. (2009). Nitrous oxide emission at low temperatures from manure-amended soils under corn (*Zea Mays* L.). *Agriculture Ecosystems y Environment*. 132(1): 74-81. DOI: 10.1016/j.agee.2009.03.001
- Solorio-Sánchez, F.J.; Bacab-Pérez, H.M. y Ramírez-Avilés, L. (2011). Sistemas silvopastoriles intensivos: Investigación en el Valle de Tepalcatepec, Michoacán. En Xóchitl-Flores, M., Solorio-Sánchez, B.

- (eds.), *Establecimiento de sistemas silvopastoriles intensivos para la producción de leche y carne en el trópico de México*. Primera etapa del proyecto estratégico de prioridad nacional. SAGARPA, Fundación Produce Michoacán, COFUPRO, UADY, Morelia, México, 15 p.
- Sotelo, M.; Gutiérrez, J.F.; Hincapié, B. y Arango, J. (2017a). La base de la ganadería sostenible. Los sistemas silvopastoriles son una de las estrategias para frenar la expansión de la frontera agropecuaria y disminuir la tasa de deforestación en los bosques a nivel mundial. *Revista Productor Agropecuario*. 72: 60–62.
- Sotelo, M.; Suárez, S.J.; Álvarez, C.F.; Castro N.A.; Calderón, S.V. y Arango, J. (2017b). Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico - Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable? Publicación CIAT No. 448. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. <http://hdl.handle.net/10568/89088>
- Van Groenigen, J.W.; Huygens, D.; Boeckx, P.; Kuyper, T.W.; Lubbers, I.M.; Rütting, T. y Groffman, P.M. (2015). The soil N cycle: new insights and key challenges. *Soil*. 1: 235-256. doi:10.5194/soil-1-235-2015
- Vandermeulen, S.; Ramírez-Restrepo, C.A.; Beckers, Y.; Claessens, H. y Bindelle, J. (2018). Agroforestry for ruminants: a review of trees and shrubs as fodder in silvopastoral temperate and tropical production systems. *Anim. Prod. Sci.* 58: 767–777. <https://doi.org/10.1071/AN16434>
- Veresoglou, S.D.; Halley, J.M. y Rillig, M.C. (2015). Extinction risk of soil biota. *Nature Communications*. 6(1). doi:10.1038/ncomms9862
- Verhulst, N.; Grahmann, K.; Cox, R. y Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. CIMMYT; MasAgro. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/4411/56988.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wu, X.; Wei, Y.; Wang, J.; Wang, D.; She, L.; Wang, J. y Cai, C. (2017). Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *CATENA*. 156: 205–215. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.017